

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf



fosta@stahlforschung.de
www.stahlforschung.de



Bauen im Bestand - Lösungen für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise

Building Redevelopment – Solutions for Roof and Façade Systems using Lightweight Steel Constructions

Forschung für die Praxis P 1098 / IGF-Nr. 18623 N

Forschungsprojekt P 1098 / IGF-Nr. 18623 N

Bauen im Bestand - Lösungen für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise

Building Redevelopment – Solutions for Roof and Façade Systems using
Lightweight Steel Constructions

Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne

Dipl.-Ing. Matthias Brieden

Lehrstuhl für Stahlbau, TU Dortmund

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann

Dipl.-Ing. Alexander Wiegand

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Dr. Gregor Nüsse

Das IGF-Vorhaben 18623 N der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde vom Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, RWTH Aachen, sowie vom Lehrstuhl für Stahlbau, TU Dortmund, durchgeführt.

Beteiligte am Projektbegleitenden Ausschuss:

ArcelorMittal Construction Deutschland GmbH, Sandersdorf-Brehna
ArcelorMittal Global R&D, Zelzate, Belgien
BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde
EJOT Baubefestigungen GmbH, Bad Laasphe
Fischer Profil GmbH, Nethpen
Hilti Deutschland AG, Kaufering
IFBS - Internationaler Verband für den Metalleichtbau, Krefeld
Ingenieur- und Sachverständigenbüro Korff, Kreuztal
iS-engineering GmbH, Darmstadt
Kalzip GmbH, Koblenz
Kingspan GmbH, Wesel
KLIB - Ingenieurbüro für Bautechnik, Korschenbroich
MAAS Profile GmbH, Ilshofen
Pöter & Möller GmbH, Siegen
Pröckl GmbH, Arnstorf
Radabau GmbH Ingenieur- und Leichtbausysteme Schlichter Niederlassung Süd,
Zwingenberg
Reisser-Schraubentechnik GmbH, Ingelfingen-Criesbach
Rockwool Benelux B.V. Rockwool Core Solutions, Roermond, Belgien
ROCKWOOL Operations GmbH & Co. KG, Gladbeck
Roma Dämmsysteme GmbH, Buttenwiesen
Romakowski GmbH & Co. KG, Buttenwiesen
RSB Rudolstädter Systembau GmbH, Rudolstadt
Rudolf Wiegmann Industriemontagen GmbH, Bersenbrück
Salzgitter Bauelemente GmbH, Salzgitter
Schrag Kantprofile GmbH, Hilchenbach
SFS intec GmbH, Oberursel
Sika Deutschland GmbH, Bad Urach
SSF Ingenieure AG Beratende Ingenieure im Bauwesen, Berlin
thyssenkrupp Steel Europe AG, Duisburg
Zambelli RIB-ROOF GmbH & Co. KG, Stephansposching
ZBN Civil Engineers Ltd., Nottuln

© 2021 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1098
ISBN 978-3-96780-009-8

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

Die energetische Sanierung und das Bauen im Bestand gewinnen im Rahmen der Klimaschutzpolitik zunehmend an Bedeutung. Verschiedene Studien belegen, dass eine deutliche Reduktion der Emissionen und des Energieverbrauchs im Gebäudebereich nur durch energetische Sanierungen im Bestand erzielt werden kann. Insbesondere bei Industrie- und Gewerbebauten entspricht die in der Vergangenheit realisierte thermisch-energetische Qualität der Gebäudehülle oft nicht mehr den Anforderungen.

In diesem Forschungsvorhaben wird der Ansatz verfolgt, energetische Sanierungen im laufenden Betrieb (also ohne kostenintensive Nutzungsausfälle) durchführen zu können. Um die thermische Qualität der Bestandsfassade zu verbessern, sollen außenseitig zusätzliche wärmedämmende Bauteile installiert werden. Als besonders vielversprechend wird dabei der Einsatz von Bausystemen des Stahl- bzw. Metalleichtbaus angesehen.

Sandwichelemente mit beidseitigen Stahldeckschichten und Polyurethan- bzw. Mineralwollkern stellen in diesem Zusammenhang eine äußerst effektive Möglichkeit da. Sie besitzen nicht nur sehr gute thermische Eigenschaften, sondern können auch besonders schnell und wirtschaftlich verbaut werden. Daneben bieten sog. modulare Bausysteme des Metalleichtbaus eine weitere Alternative, Bestandsgebäude energetisch zu ertüchtigen. Vorrangig werden Bestandsgebäude betrachtet, deren Dach- und Fassadenbereich bereits in Metalleichtbauweise erstellt wurden, wobei der Fokus auf Stahlkassettens Fassaden liegt. Darüber hinaus sind aber auch vorhandene Fassaden und Dächer in massiver Bauweise hinsichtlich einer möglichen Sanierung mit Bausystemen in Metalleichtbauweise Gegenstand des Forschungsvorhabens.

Aus bauphysikalischer Sicht werden nicht nur die Aspekte des Wärmeschutzes untersucht, sondern auch Fragestellungen, die sich aus der Veränderung des feuchtetechnischen Verhaltens des zu sanierenden Bauteils ergeben. Auch baustatische Randbedingungen müssen bei energetischen Sanierungen beachtet werden. Von der Sanierung berührte Bestandsbauteile müssen auf Grundlage aktueller technischer Regelwerke erneut statisch nachgewiesen werden und die Ansätze für Wind- und Schneelasten unterlagen in den letzten Jahrzehnten starken Veränderungen. Nach einer systematischen Erfassung der normativen Entwicklung in diesem Sektor werden Möglichkeiten untersucht, die energetisch sanierten Bauelemente unter Ansatz der dann zusätzlich vorhandenen Metalleichtbausysteme mit entsprechend veränderten Lastannahmen nachzuweisen.

Als Ziel des Forschungsvorhabens werden Regeln und Bemessungsansätze entwickelt, die zum einen Aussagen zur mit der Sanierung erreichbaren energetischen Qualität und deren Auswirkungen auf das feuchtetechnische Bauteilverhalten erlauben. Zum anderen werden Möglichkeiten erarbeitet, die die baukonstruktiven Aspekte erfassen, die sich in der Kombination aus dem vorhandenen Nachweis der Bestandskonstruktion und den aktuellen Lastannahmen in Verbindung mit der Sanierungsmaßnahme ergeben.

Abstract

Energy related refurbishments and building in existing structures gain in the framework of climate protection policy in importance. Various studies show that a significant reduction of emissions and energy consumption in the building sector can only be achieved by the refurbishment of existing buildings. Particularly upon industrial and commercial buildings, the thermal and energetic quality of the building envelope realized in the past often no longer meet the current and future requirements.

In this research project the approach to carry out the energetic refurbishment during operation (without cost-intensive downtime) is pursued. In order to improve the thermal quality of the existing façade, additional heat-insulating components should be installed on the outside. Particularly promising is the use of building systems in lightweight steel or metal construction.

Sandwich panels with double-sided steel face layers and polyurethane or mineral wool insulation core provide a highly effective option in this context. They not only have very good thermal properties but can also be installed very quickly and economically. In addition, so-called modular lightweight steel build-up systems offer a further alternative to energetically reinforce existing building envelopes. Priority will be given to existing buildings whose roofs and façades have already been constructed in lightweight steel construction, with a focus on steel liner tray façades. In addition, existing roofs and façades in solid construction are considered with regard to a possible lightweight steel construction renovation.

From a building physics point of view, not only the aspects of thermal insulation are examined, but also questions arising from the change in the moisture-technical behavior of the rehabilitated component.

Also structural design boundary conditions must be considered among energetically refurbishments. Existing building components that are affected by the refurbishment need a renewed static proof based upon present technical rules and the assumptions for wind- and snow loads were subject to significant changes in recent decades. After a systematic record of the normative development in this sector, possible means for the static proof of the refurbished components concerning the additional lightweight steel construction systems and the changed load assumptions will be investigated.

The aim of the research project is to develop rules and structural design approaches that allow statements on the energetic quality achievable with the renovation and their effects on the moisture-related component behavior. On the other hand, possibilities are developed that capture the structural aspects resulting from the combination of the existing static proof of the existing construction and the current load assumptions in connection with the consideration of the remediation measure.

FOSTA - Research Association for Steel Application

January 2021

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung Introduction	1
1.1	Problemstellung Problem definition	1
1.2	Motivation Motivation.....	6
1.2.1	Gebäudebestand und energetische Qualität Building stock and energetic quality	6
1.2.2	Klimaschutzpolitik und energetische Sanierung Climate protection policy and energetic renovation.....	10
1.3	Zielsetzung Objective	10
2	Stand der Technik – Bestandsgebäudehüllen State of the art – Existing building envelopes.....	13
2.1	Konstruktionstypen Construction types	13
2.1.1	Außenwandkonstruktionen Exterior wall constructions	13
2.1.2	Dachkonstruktionen Roof constructions	16
2.1.3	Ausgewählte Konstruktionstypen Selected construction types.....	17
2.2	Bauphysikalische Aspekte Building physical aspects.....	20
2.2.1	Thermische Qualität Thermal quality.....	20
2.2.2	Hygrische Qualität Hygric quality	29
2.2.3	Luftdichtheitsqualität Air tightness quality.....	67
2.3	Statische Aspekte Statical aspects.....	68
2.3.1	Dach- und Wandkonstruktionen in Stahlleichtbauweise Roof- and façade in lightweight steel construction	68
2.3.2	Baustatische Randbedingungen für Dach- und Fassadensanierungen Structural boundary conditions for renovation of roof and façade systems	82
2.3.3	Lastannahmen Current Load specifications	84
3	Bauphysikalische Untersuchungen Building physical investigations.....	86
3.1	Anforderungen und Zusammenhänge Requirements and interrelations	87
3.2	Thermische Qualität Thermal quality.....	88
3.2.1	Sanierung von Stahlleichtbaufassaden Refurbishment of lightweight steel façades	88
3.2.2	Sanierung von massiven Fassadenkonstruktionen Refurbishment of massive façade constructions	104
3.2.3	Sanierung von Dächern Refurbishment of roofs	111

3.3	Hygrische Qualität Hygric quality	117
3.3.1	Sanierung von Stahlleichtbaufassaden Refurbishment of lightweight steel façades	117
3.3.2	Sanierung von massiven Fassadenkonstruktionen Refurbishment of massive façade constructions.....	140
3.4	Luftdichtheit Air tightness.....	143
3.5	Lastfall Temperatur bei Hybridelementen Load case temperature for hybrid elements	144
3.5.1	Allgemeines Preface.....	144
3.5.2	Experimentelle Untersuchung Experimental investigation.....	144
3.5.3	Numerische Untersuchung Numerical investigation	148
3.6	Praktische Energieeinsparpotential auf Gebäudeebene Practical energy saving potentials on building level	151
3.6.1	Allgemeines Preface.....	151
3.6.2	Definition der Musterhallenvarianten Definition of sample hall variations	151
3.6.3	Sanierungsziel und thermische Qualität der Außenwand Target of refurbishment and thermal quality of the external wall.....	153
3.6.4	Ergebnisse Results.....	154
4	Statische Untersuchungen Statical investigations.....	157
4.1	Veränderte Lastannahmen Changed load specifications.....	157
4.1.1	Allgemeines Preface.....	157
4.1.2	Betrachtete Normen Considered standards.....	158
4.1.3	Entwicklung der Windlastnormen Evolution of wind load standards ..	159
4.1.4	Auswertung anhand von Beispielgebäuden Analysis based on example buildings	167
4.1.5	Umrechnungsverfahren für Hallen mit Flachdächern Calculation procedure for hall buildings with flat roofs.....	184
4.1.6	Entwicklung der Schneelastnormen Evolution of snow load standards.....	188
4.1.7	Auswertung und Zusammenfassung Schneelasten Evaluation and comparison snow loads	193
4.1.8	Fazit Schneelasten Conclusion snow loads.....	197
4.2	Maßtoleranzen Dimensional deviation.....	197
4.2.1	Allgemeines Preface.....	197
4.2.2	Mögliche Folgen zu großer Maßabweichungen Possible impacts of dimensional deviations	198

4.2.3	Herstellungstoleranzen für Produkte des Metalleichtbaus Production tolerances for lightweight steel constructions	198
4.2.4	Toleranzanforderungen an die Ausführung Tolerance demands for construction	202
4.2.5	Zu erwartende Toleranzen beim Bauen im Bestand Expected tolerances for existing buildings	205
4.2.6	Messung bestehender Gebäude Measurement of existing buildings	208
4.2.7	Zusammenfassung Summary	217
4.3	Sanierung von Stahlleichtbaufassaden Refurbishment of lightweight steel construction façades	218
4.3.1	Allgemeines Preface	218
4.3.2	Veränderte Lastannahmen Changed load assumptions.....	218
4.3.3	Maßtoleranzen Dimensional tolerances	218
4.3.4	Sanierung von Sandwichelementfassaden Refurbishment of sandwich panel façades.....	219
4.3.5	Sanierung von Kassettenprofilfassaden Refurbishment of liner tray façades.....	220
4.4	Sanierung von massiven Fassaden Refurbishment of solid construction façades.....	300
4.4.1	Allgemeines Preface	300
4.4.2	Statische Untersuchungen Static investigations.....	300
4.4.3	Vergleich möglicher Ausführungsvarianten Comparison of possible construction variants	303
4.4.4	Beispiel: Energetische Sanierung einer massiven Fassade Example: Energy-oriented refurbishment of a solid façade	306
4.4.5	Zusammenfassung Summary	308
4.5	Sanierung von Dächern Roof refurbishment	308
4.5.1	Allgemeines Preface	308
4.5.2	Veränderte Lastannahmen Changed load assumptions.....	308
4.5.3	Bestandsaufnahme aus statischer Sicht sanierungsfähiger Dachtypen Inventory of roof types being capable for renovation from a static viewpoint	309
4.5.4	Mögliche Sanierungsmaßnahmen in Stahlleichtbauweise Possible renovation actions in lightweight steel construction.....	312
4.5.5	Beispielrechnungen: Sanierung Trapezdach Example calculation: Refurbishment trapezoidal roof	319
4.5.6	Zusammenfassung Summary	322
5	Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis Summary and recommendations for practice.....	323

6	Ausblick und weitere Forschung Perspective and further research.....	326
7	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project.....	327
8	Literaturverzeichnis Bibliography.....	328
	Anhang B1 "Vergleich der anzusetzenden Wind- und Schneelasten bei der Sanierung von Bestandsgebäuden"	334

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: ENERGIEVERBRAUCHS-ZEIT-VERLAUF MIT UND OHNE SANIERUNGSMABNAHMEN	2
ABBILDUNG 1-2: SANIERUNGSBEDÜRFTIGE SPORTHALLE	3
ABBILDUNG 1-3: PAUSCHALWERTE DER WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN UND AUSGEWÄHLTE ANFORDERUNGEN.....	4
ABBILDUNG 1-4: KASSETTENELEMENT MIT MODULAREM STAHLLEICHTBAUSYSTEM	4
ABBILDUNG 1-5: PRAXISBEISPIELE – DACH- UND FASSADENSANIERUNG MIT SANDWICHELEMENTEN.....	5
ABBILDUNG 1-6: ENDENERGIEVERBRAUCH VON WOHNGEBÄUDEN NACH BAUALTERSKLASSE [22]	7
ABBILDUNG 1-7: BESTAND VON WOHNGEBÄUDEN NACH BAUALTERSKLASSE (ANZAHL) [22]....	7
ABBILDUNG 1-8: BESTAND VON WOHNGEBÄUDEN NACH BAUALTERSKLASSE (NUTZFLÄCHE) [23]	8
ABBILDUNG 1-9: NUTZUNG VON NICHTWOHNGEBÄUDEN [23]	8
ABBILDUNG 1-10: BESTAND VON NICHTWOHNGEBÄUDEN NACH BAUALTERSKLASSE (NUTZFLÄCHE) [23].....	9
ABBILDUNG 1-11: BAUFERTIGSTELLUNGEN UND GEBÄUDEANZAHL [24]	9
ABBILDUNG 1-12: BESTANDSSANIERUNG MIT STAHLLEICHTBAUSYSTEMEN.....	12
ABBILDUNG 2-1: EINSCHALIGE UNGEDÄMMTE TRAPEZPROFILWAND.....	14
ABBILDUNG 2-2: ZWEISCHALIGE WÄRMEGEDÄMMTE TRAPEZPROFILWAND	14
ABBILDUNG 2-3: SANDWICHWANDELEMENTE	14
ABBILDUNG 2-4: KASSETTENELEMENTE	14
ABBILDUNG 2-5: UNGEDÄMMTE MASSIVWAND MIT METALLBEKLEIDUNG.....	15
ABBILDUNG 2-6: GEDÄMMTE MASSIVWAND MIT METALLBEKLEIDUNG	15
ABBILDUNG 2-7: VHF-KONSTRUKTION AUF MASSIVWAND MIT METALLBEKLEIDUNG	15
ABBILDUNG 2-8: EINSCHALIGES UNGEDÄMMTES TRAPEZ- ODER WELLPROFILDACH	16
ABBILDUNG 2-9: ZWEISCHALIGES WÄRMEGEDÄMMTES NICHTBELÜFTETES TRAPEZPROFILDACH	16
ABBILDUNG 2-10: ZWEISCHALIGES WÄRMEGEDÄMMTES NICHTBELÜFTETES DACH MIT FALZ- BZW. KLEMMPROFILIEN.....	17
ABBILDUNG 2-11: EINSCHALIGES OBERSEITIG WÄRMEGEDÄMMTES NICHTBELÜFTETES TRAPEZPROFILDACH MIT DACHABDICHTUNG.....	17
ABBILDUNG 2-12: SANDWICHDACHELEMENT.....	17
ABBILDUNG 2-13: STAHL-SANDWICHELEMENT (WAND)	18
ABBILDUNG 2-14: STAHL-KASSETTENELEMENT	18
ABBILDUNG 2-15: STAHL-SANDWICHELEMENT (DACH)	18
ABBILDUNG 2-16: MEHRSCHALIGE DACHKONSTRUKTION	18
ABBILDUNG 2-17: EINTEILUNG DER BETRACHTETEN KONSTRUKTIONSTYPEN	19
ABBILDUNG 2-18: NUMERISCHES FINITE-ELEMENTE-MODELL UND ERMITTELTE TEMPERATURVERTEILUNG	20

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 2-19: INFRAROT THERMOGRAFIE ALS BEISPIEL FÜR EIN EXPERIMENTELLES IN-SITU-VERFAHREN	21
ABBILDUNG 2-20: THERMISCHE QUALITÄT VON UNGEDÄMMTEN BESTANDSAUßENWÄNDEN IN MASSIVER BAUWEISE	22
ABBILDUNG 2-21: THERMISCHE QUALITÄT VON BESTANDSAUßENWÄNDEN AUS BETON.....	23
ABBILDUNG 2-22: THERMISCHE QUALITÄT VON BESTANDSAUßENWÄNDEN AUS PORENBETON	23
ABBILDUNG 2-23: THERMISCHE QUALITÄT VON BESTANDSAUßENWÄNDEN AUS MAUERWERK	24
ABBILDUNG 2-24: STAHL-KASSETTENELEMENT MIT TRENNSTREIFEN	25
ABBILDUNG 2-25: STAHL-KASSETTENELEMENT MIT ZUSATZDÄMMUNG	25
ABBILDUNG 2-26: THERMISCHE QUALITÄT VON BESTANDSAUßENWÄNDEN AUS KASSETTENELEMENTEN ($t_N = 1,50$ MM).....	26
ABBILDUNG 2-27: THERMISCHE QUALITÄT VON BESTANDSAUßENWÄNDEN AUS KASSETTENELEMENTEN ($t_N = 0,75$ MM).....	27
ABBILDUNG 2-28: STAHL-SANDWICHELEMENT (WAND)	27
ABBILDUNG 2-29: STAHL-SANDWICHELEMENT (DACH)	27
ABBILDUNG 2-30: LÄNGSFUGENTYPEN VON SANDWICHELEMENTEN NACH DIN EN 14509 [29]	28
ABBILDUNG 2-31: THERMISCHE QUALITÄT VON SANDWICHELEMENTEN (WAND)	28
ABBILDUNG 2-32: THERMISCHE QUALITÄT VON SANDWICHELEMENTEN (DACH)	29
ABBILDUNG 2-33: FEUCHTEBEANSPRUCHUNGEN UND -EINWIRKUNGEN	30
ABBILDUNG 2-34: FEUCHTEGEHALTE IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRACHTUNGSZEITPUNKT (QUALITATIV).....	31
ABBILDUNG 2-35: EINFLUSS DER LAGE DER LUFTDICHTHEITSEBENE (QUALITATIV)	32
ABBILDUNG 2-36: ANFORDERUNGSWERTE FÜR DEN NACHWEIS DES MINDESTWÄRMESCHUTZES	32
ABBILDUNG 2-37: „STUFEN ZUM TAUWASSERNACHWEIS“	33
ABBILDUNG 2-38: NUMERISCHE VERFAHREN DES FEUCHTESCHUTZES.....	34
ABBILDUNG 2-39: DIFFUSIONSVERHALTEN VON MAUERWERK UND SANDWICHELEMENT (QUALITATIV).....	34
ABBILDUNG 2-40: VISUALISIERUNG UNTERSCHIEDLICHER WASSERDAMPFDIFFUSIONSWIDERSTANDSZAHLEN.....	35
ABBILDUNG 2-41: EXEMPLARISCHER ABLAUF BEIM GLASERVERFAHREN	36
ABBILDUNG 2-42: BEISPIEL UND ERGEBNISSE NACH DIN EN 15026.....	39
ABBILDUNG 2-43: TEMPERATURVERLÄUFE BETONWÄNDE.....	40
ABBILDUNG 2-44: TEMPERATURVERLÄUFE PORENBETONWÄNDE	40
ABBILDUNG 2-45: TEMPERATURVERLÄUFE MAUERWERKSWÄNDE.....	41
ABBILDUNG 2-46: SÄTTIGUNGSDRUCKVERLÄUFE BETONWÄNDE	41
ABBILDUNG 2-47: SÄTTIGUNGSDRUCKVERLÄUFE PORENBETONWÄNDE.....	41
ABBILDUNG 2-48: SÄTTIGUNGSDRUCKVERLÄUFE MAUERWERKSWÄNDE.....	42
ABBILDUNG 2-49: PARTIALDRUCKVERLÄUFE BETONWÄNDE	42
ABBILDUNG 2-50: PARTIALDRUCKVERLÄUFE PORENBETONWÄNDE	43
ABBILDUNG 2-51: PARTIALDRUCKVERLÄUFE MAUERWERKSWÄNDE	43
ABBILDUNG 2-52: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE BETONWÄNDE.....	43
ABBILDUNG 2-53: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE PORENBETONWÄNDE	44
ABBILDUNG 2-54: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE MAUERWERKSWÄNDE	44
ABBILDUNG 2-55: TEMPERATURVERLÄUFE KASSETTENELEMENTE	46
ABBILDUNG 2-56: SÄTTIGUNGSDRUCKVERLÄUFE KASSETTENELEMENTE	46

ABBILDUNG 2-57: PARTIALDRUCKVERLÄUFE KASSETTENELEMENTE	47
ABBILDUNG 2-58: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE KASSETTENELEMENTE	47
ABBILDUNG 2-59: TEMPERATURVERLÄUFE SANDWICHELEMENTE.....	48
ABBILDUNG 2-60: SÄTTIGUNGSDRUCKVERLÄUFE SANDWICHELEMENTE	48
ABBILDUNG 2-61: PARTIALDRUCKVERLÄUFE SANDWICHELEMENTE	49
ABBILDUNG 2-62: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE SANDWICHELEMENTE	49
ABBILDUNG 2-63: VERGLEICH DER VERLÄUFE DER TEMPERATUREN FÜR SANDWICHELEMENTE	51
ABBILDUNG 2-64: VERGLEICH DER VERLÄUFE DER SÄTTIGUNGSDAMPFD RÜCKE FÜR SANDWICHELEMENTE	51
ABBILDUNG 2-65: VERGLEICH DER VERLÄUFE DER PARTIALDAMPFD RÜCKE FÜR SANDWICHELEMENTE	52
ABBILDUNG 2-66: VERGLEICH DER VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN FÜR SANDWICHELEMENTE	52
ABBILDUNG 2-67: VERLÄUFE DER TEMPERATUREN SANDWICHELEMENTE (PU)	53
ABBILDUNG 2-68: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN SANDWICHELEMENTE (PU).....	53
ABBILDUNG 2-69: VERLÄUFE DER TEMPERATUREN SANDWICHELEMENTE (MW)	53
ABBILDUNG 2-70: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN SANDWICHELEMENTE (MW) ...	54
ABBILDUNG 2-71: ANSATZ ZUR STATIONÄREN ERWEITERUNG DES VERFAHRENS NACH DIN 4108-3.....	54
ABBILDUNG 2-72: FE-MODELLE FÜR STATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	55
ABBILDUNG 2-73: VERTEILUNG DER TEMPERATUR FÜR STATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	55
ABBILDUNG 2-74: VERTEILUNG DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR STATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	56
ABBILDUNG 2-75: MINIMALE UND MAXIMALE RELATIVE LUFTFEUCHTE FÜR STATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	56
ABBILDUNG 2-76: KRITISCHER QUERSCHNITTSANTEIL FÜR STATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	56
ABBILDUNG 2-77: QUERSCHNITT FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108- 3	57
ABBILDUNG 2-78: TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	58
ABBILDUNG 2-79: WASSERDAMPFPARTIALDRUCK FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3	58
ABBILDUNG 2-80: ERGEBNISSE 1 FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108- 3	59
ABBILDUNG 2-81: ERGEBNISSE 2 FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108- 3	59
ABBILDUNG 2-82: ERGEBNISSE 3 FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108- 3	60
ABBILDUNG 2-83: EXEMPLARISCHE MATERIALFUNKTIONEN FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	60
ABBILDUNG 2-84: QUERSCHNITTSVARIANTEN FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	61
ABBILDUNG 2-85: KLIMARANDBEDINGUNGEN FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	61

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 2-86: ERGEBNISSE „PU ϕ “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	62
ABBILDUNG 2-87: ERGEBNISSE „PU w“ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	62
ABBILDUNG 2-88: ERGEBNISSE „MW ϕ “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	63
ABBILDUNG 2-89: ERGEBNISSE „MW w“ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	63
ABBILDUNG 2-90: ERGEBNISSE „W _{TOT} “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	63
ABBILDUNG 2-91: QUERSCHNITTSVARIANTEN „FUGE“ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	64
ABBILDUNG 2-92: ERGEBNISSE „PU FUGE ϕ “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	65
ABBILDUNG 2-93: ERGEBNISSE „PU FUGE w“ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	65
ABBILDUNG 2-94: ERGEBNISSE „MW FUGE ϕ “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	65
ABBILDUNG 2-95: ERGEBNISSE „MW FUGE w“ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	66
ABBILDUNG 2-96: ERGEBNISSE „FUGE W _{TOT} “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	66
ABBILDUNG 2-97: LUFTDICHTHEITSPRÜFSAND, BLOWERDOOR-MESSUNG UND LECKAGE- ORTUNG MIT NEBEL	67
ABBILDUNG 2-98: INDUSTRIEHALLE MIT EINER FASSADE AUS SANDWICHELEMENTEN.....	70
ABBILDUNG 2-99: ARTEN DER DECKSCHICHTPROFILIERUNG NACH [49].....	71
ABBILDUNG 2-100: SANDWICHELEMENT MIT PUR-KERN.....	72
ABBILDUNG 2-101: SANDWICHELEMENT MIT MW-KERN	72
ABBILDUNG 2-102: KONTINUIERLICHE SANDWICHERSTELLUNG IN EINER DOPPELBANDANLAGE [51]	73
ABBILDUNG 2-103: DIREKTE BEFESTIGUNG IN DURCHSTECKMONTAGE [51].....	74
ABBILDUNG 2-104: DIREKTE UND INDIREKTE VERANKERUNG VON SANDWICHELEMENTEN [51]	75
ABBILDUNG 2-105: STAHLKASSETTENPROFIL-WANDKONSTRUKTION (SCHMALE KASSETTENGURTE NACH UNTEN GERICHTET) [44]	77
ABBILDUNG 2-106: STAHLKASSETTENPROFIL-WANDKONSTRUKTION (SCHMALE KASSETTENGURTE NACH OBEN GERICHTET) [44]	77
ABBILDUNG 2-107: KASSETTENPROFILFASSADE MIT DÄMMUNG ZWISCHEN DEN STEGEN [41]..	77
ABBILDUNG 2-108: KASSETTENPROFILFASSADE MIT ZUSATZDÄMMUNG [41]	77
ABBILDUNG 2-109: KASSETTENPROFILFASSADE MIT HORIZONTAL VERLEGTER AUßENSCHALE [44]	78
ABBILDUNG 2-110: ROLLFORMANLAGE FÜR FEINBLECH	80
ABBILDUNG 2-111: ZWEISCHALIGE RIEGEL-WANDKONSTRUKTION [44].....	80
ABBILDUNG 2-112: ZWEISCHALIGES TRAPEZPROFILDACH [44]	80
ABBILDUNG 2-113: ZWEISCHALIGES DACH MIT STEHFALZPROFIL-AUßENSCHALE [44].....	81
ABBILDUNG 2-114: ZWEISCHALIGES DACH MIT STEHFALZPROFIL-AUßENSCHALE [44].....	81
ABBILDUNG 2-115: KASSETTENPROFILFASSADE MIT FASSADENPROFIL-AUßENSCHALE [44].....	82
ABBILDUNG 2-116: GEDÄMMTE MAUERWERKSWAND MIT FASSADENPROFIL-AUßENSCHALE ...	82
ABBILDUNG 3-1: HYGROTHERMISCHES DREIECK.....	87
ABBILDUNG 3-2: HYBRIDELEMENT	88
ABBILDUNG 3-3: THERMISCHES FE-MODELL DES HYBRIDELEMENTS.....	89
ABBILDUNG 3-4: TEMPERATURVERTEILUNG DES HYBRIDELEMENTS	89
ABBILDUNG 3-5: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN (T _{N,KAS} = 0,75 MM)	92
ABBILDUNG 3-6: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN (T _{N,KAS} = 1,50 MM)	92
ABBILDUNG 3-7: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES HYBRIDELEMENTS – VERSUCHSBAU	93

ABBILDUNG 3-8: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES HYBRIDELEMENTS – INFRAROTKAMERA UND ANSICHT	94
ABBILDUNG 3-9: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES HYBRIDELEMENTS – INFRAROTAUFNAHMEN DER WARMSEITE	94
ABBILDUNG 3-10: DARSTELLUNG UND ABMESSUNGEN Ω -PROFIL	97
ABBILDUNG 3-11: DARSTELLUNG UND ABMESSUNGEN Z-PROFIL	97
ABBILDUNG 3-12: EXEMPLARISCHES THERMISCHES FE-MODELL BEI MIT Ω -PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN (SYMMETRIE).....	97
ABBILDUNG 3-13: EXEMPLARISCHE TEMPERATURVERTEILUNG BEI MIT Ω -PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN (SYMMETRIE).....	97
ABBILDUNG 3-14: EXEMPLARISCHES THERMISCHES FE-MODELL BEI MIT Z-PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN	98
ABBILDUNG 3-15: EXEMPLARISCHE TEMPERATURVERTEILUNG BEI MIT Z-PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN	98
ABBILDUNG 3-16: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT Ω -PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN	99
ABBILDUNG 3-17: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT Z-PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN	100
ABBILDUNG 3-18: THERMISCHE QUALITÄT BEI SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN (VERGLEICH)	100
ABBILDUNG 3-19: THERMISCHE QUALITÄT – VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER KASSETTENSANIERUNGEN	101
ABBILDUNG 3-20: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHWÄNDEN (MF-BESTAND)	103
ABBILDUNG 3-21: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHWÄNDEN (PU-BESTAND).....	104
ABBILDUNG 3-22: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN BETONWÄNDEN ..	106
ABBILDUNG 3-23: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN PORENBETONWÄNDEN.....	107
ABBILDUNG 3-24: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN MAUERWERKSWÄNDEN.....	107
ABBILDUNG 3-25: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT MODULAREN STAHLKONSTRUKTIONEN SANIERTEN BETONWÄNDEN.....	108
ABBILDUNG 3-26: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT MODULAREN STAHLKONSTRUKTIONEN SANIERTEN PORENBETONWÄNDEN	109
ABBILDUNG 3-27: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT MODULAREN STAHLKONSTRUKTIONEN SANIERTEN MAUERWERKSWÄNDEN	110
ABBILDUNG 3-28: SCHEMATISCHE SKIZZEN ZUR SANIERUNG VON DACHKONSTRUKTIONEN ...	112
ABBILDUNG 3-29: SCHEMATISCHES VORGEHEN ZUR SANIERUNG VON SANDWICHDÄCHERN MIT SANDWICH.....	112
ABBILDUNG 3-30: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHDÄCHERN (PU-BESTAND).....	113
ABBILDUNG 3-31: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHDÄCHERN (MW-BESTAND).....	114
ABBILDUNG 3-32: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG FALZPROFILDACH.....	115

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 3-33: EXEMPLARISCHER VERGLEICH DER THERMISCHEN QUALITÄT UNTERSCHIEDLICHER KLIPPS.....	115
ABBILDUNG 3-34: THERMISCHEN QUALITÄT DES TYPISIERTEN KLIPPS.....	116
ABBILDUNG 3-35: SCHEMATISCHES VORGEHEN ZUR SANIERUNG VON SANDWICHDÄCHERN MIT FALZPROFILKONSTRUKTION.....	116
ABBILDUNG 3-36: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT FALZPROFILKONSTRUKTIONEN SANIERTEN SANDWICHDÄCHERN (PU-BESTAND).....	116
ABBILDUNG 3-37: THERMISCHE QUALITÄT BEI MIT FALZPROFILKONSTRUKTIONEN SANIERTEN SANDWICHDÄCHERN (MW-BESTAND).....	117
ABBILDUNG 3-38: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDELEMENT (KAS 145 + SE 60).....	118
ABBILDUNG 3-39: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDQUERSCHNITT (KAS 145 + SE 80).....	118
ABBILDUNG 3-40: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDQUERSCHNITT (KAS 90 + SE).....	119
ABBILDUNG 3-41: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDQUERSCHNITT (KAS 120 + SE).....	120
ABBILDUNG 3-42: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDQUERSCHNITT (KAS 160 + SE).....	120
ABBILDUNG 3-43: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDQUERSCHNITT (KAS 200 + SE).....	121
ABBILDUNG 3-44: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM HYBRIDQUERSCHNITT (KAS 240 + SE).....	121
ABBILDUNG 3-45: HYGRISCH ERFORDERLICHE SANDWICHDICKE BEIM HYBRIDELEMENT	122
ABBILDUNG 3-46: QUERSCHNITT VOM HYBRIDELEMENT FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	122
ABBILDUNG 3-47: KLIMARANDBEDINGUNGEN FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	123
ABBILDUNG 3-48: ERGEBNISSE „HYBRIDELEMENT ϕ “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026.....	123
ABBILDUNG 3-49: ERGEBNISSE „HYBRIDELEMENT w “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	123
ABBILDUNG 3-50: ERGEBNISSE „HYBRIDELEMENT“ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026 ..	124
ABBILDUNG 3-51: ERGEBNISSE „HYBRIDELEMENT w_{TOT} “ FÜR VERFAHREN NACH DIN EN 15026	125
ABBILDUNG 3-52: VERSUCHSAUFBAU FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	126
ABBILDUNG 3-53: MESSPUNKTE FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	127
ABBILDUNG 3-54: ERGEBNISSE VORABUNTERSUCHUNG FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE.....	128
ABBILDUNG 3-55: ERGEBNISSE PUNKT „KASSETTE“ FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	128
ABBILDUNG 3-56: ERGEBNISSE PUNKT „GRENZE“ FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE.....	129
ABBILDUNG 3-57: ERGEBNISSE PUNKT „SANDWICH“ FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	129
ABBILDUNG 3-58: VERGLEICH VORABUNTERSUCHUNG UND VERSUCH FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE.....	130
ABBILDUNG 3-59: MODELL FÜR NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DER HYBRIDELEMENTVERSUCHE	131
ABBILDUNG 3-60: ERGEBNISSE 1 DER NUMERISCHEN UNTERSUCHUNG DER HYBRIDELEMENTVERSUCHE.....	131

ABBILDUNG 3-61: VERGLEICH VORABUNTERSUCHUNG UND NUMERISCHER UNTERSUCHUNG FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	132
ABBILDUNG 3-62: ERGEBNISSE 2 DER NUMERISCHEN UNTERSUCHUNG DER HYBRIDELEMENTVERSUCHE	132
ABBILDUNG 3-63: VERGLEICH VERSUCH UND NUMERISCHER UNTERSUCHUNG PUNKT „KASSETTE“ FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	133
ABBILDUNG 3-64: VERGLEICH VERSUCH UND NUMERISCHER UNTERSUCHUNG PUNKT „GRENZE“ FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	134
ABBILDUNG 3-65: VERGLEICH VERSUCH UND NUMERISCHER UNTERSUCHUNG PUNKT „SANDWICH“ FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE	134
ABBILDUNG 3-66: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (PU-SE 60 + SE).....	135
ABBILDUNG 3-67: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (PU-SE 80 + SE).....	136
ABBILDUNG 3-68: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (PU-SE 100 + SE).....	136
ABBILDUNG 3-69: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (PU-SE 120 + SE).....	137
ABBILDUNG 3-70: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (PU-SE 160 + SE).....	137
ABBILDUNG 3-71: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (MW-SE 60 + SE)	138
ABBILDUNG 3-72: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (MW-SE 80 + SE)	138
ABBILDUNG 3-73: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (MW-SE 100 + SE)	139
ABBILDUNG 3-74: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (MW-SE 120 + SE)	139
ABBILDUNG 3-75: VERLÄUFE DER RELATIVEN LUFTFEUCHTEN IM MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH (MW-SE 160 + SE)	140
ABBILDUNG 3-76: VERLÄUFE VON TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE IN DER MIT SANDWICH SANIERTEN 100-MM-BETONWAND	141
ABBILDUNG 3-77: VERLÄUFE VON TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE IN DER MIT SANDWICH SANIERTEN 240-MM-BETONWAND	141
ABBILDUNG 3-78: VERLÄUFE VON TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE IN DER MIT SANDWICH SANIERTEN 100-MM-PORENBETONWAND	142
ABBILDUNG 3-79: VERLÄUFE VON TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE IN DER MIT SANDWICH SANIERTEN 500-MM-PORENBETONWAND	142
ABBILDUNG 3-80: VERLÄUFE VON TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE IN DER MIT SANDWICH SANIERTEN 100-MM-MAUERWERKSWAND	143
ABBILDUNG 3-81: VERLÄUFE VON TEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTE IN DER MIT SANDWICH SANIERTEN 490-MM-MAUERWERKSWAND	143
ABBILDUNG 3-82: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – QUERSCHNITTSBEREICHE	145
ABBILDUNG 3-83: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – VERSUCHSAUFBAU (1). 146	
ABBILDUNG 3-84: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – VERSUCHSAUFBAU (2). 146	

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 3-85: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	147
ABBILDUNG 3-86: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE	148
ABBILDUNG 3-87: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – DARSTELLUNG DER NUMERISCHEN ERGEBNISSE.....	150
ABBILDUNG 3-88: SKIZZE DER MUSTERHALLE	151
ABBILDUNG 3-89: SANIERUNGSZIEL DÄMMSTOFFMENGE.....	154
ABBILDUNG 3-90: SPEZIFISCHE TRANSMISSIONSWÄRMETRANSFERKOEFFIZIENTEN DER MUSTERHALLEN (U-WERT)	154
ABBILDUNG 3-91: REDUKTION DER SPEZIFISCHEN TRANSMISSIONSWÄRMETRANSFERKOEFFIZIENTEN DER MUSTERHALLEN (U-WERT).....	155
ABBILDUNG 3-92: SPEZIFISCHE TRANSMISSIONSWÄRMETRANSFERKOEFFIZIENTEN DER MUSTERHALLEN (DÄMMSTOFFMENGE).....	155
ABBILDUNG 3-93: REDUKTION DER SPEZIFISCHEN TRANSMISSIONSWÄRMETRANSFERKOEFFIZIENTEN DER MUSTERHALLEN (DÄMMSTOFFMENGE).....	156
ABBILDUNG 3-94: ALTERNATIVE ERGEBNISDARSTELLUNG MUSTERHALLENVARIANTEN (DÄMMSTOFFMENGE).....	156
ABBILDUNG 4-1: DRUCK- UND SOGVERTEILUNG (AUFSICHT).....	160
ABBILDUNG 4-2: GLIEDERUNG IN GEBÄUDEBEREICHE NACH [56]	162
ABBILDUNG 4-3: AUFTEILUNG DER DACHFLÄCHE UND BEIWERTE FÜR DIE WINDRICHTUNG SENKRECHT ZUM FIRST.....	162
ABBILDUNG 4-4: AUFTEILUNG DER DACHFLÄCHE UND BEIWERTE FÜR DIE WINDRICHTUNG PARALLEL ZUM FIRST	163
ABBILDUNG 4-5: AERODYNAMISCHER BEIWERTE C.....	166
ABBILDUNG 4-6: GEOMETRIE HALLE A.....	168
ABBILDUNG 4-7: LASTBILD HALLE A 1938	168
ABBILDUNG 4-8: LASTBILD HALLE A 1986	168
ABBILDUNG 4-9: LASTBILD HALLE A 2001	169
ABBILDUNG 4-10: LASTBILD HALLE A 2005	169
ABBILDUNG 4-11: LASTBILD HALLE A 2010	170
ABBILDUNG 4-12: LASTBILD HALLE A TGL 1964.....	170
ABBILDUNG 4-13: LASTBILD HALLE A TGL 1971	171
ABBILDUNG 4-14: LASTBILD HALLE A TGL 1976.....	171
ABBILDUNG 4-15: GEOMETRIE HALLE B	172
ABBILDUNG 4-16: LASTBILD HALLE B 1938	172
ABBILDUNG 4-17: LASTBILD HALLE B 1986	173
ABBILDUNG 4-18: LASTBILD HALLE B 2001	173
ABBILDUNG 4-19: LASTBILD HALLE B 2005	174
ABBILDUNG 4-20: LASTBILD HALLE B 2010	174
ABBILDUNG 4-21: LASTBILD HALLE B TGL 1964.....	175
ABBILDUNG 4-22: LASTBILD HALLE B TGL 1971.....	175
ABBILDUNG 4-23: LASTBILD HALLE B TGL 1976.....	176
ABBILDUNG 4-24: GEOMETRIE HALLE C.....	176
ABBILDUNG 4-25: LASTBILD HALLE C 1938	177

ABBILDUNG 4-26: LASTBILD HALLE C 1986	177
ABBILDUNG 4-27: LASTBILD HALLE C 2001	178
ABBILDUNG 4-28: LASTBILD HALLE C 2005	178
ABBILDUNG 4-29: LASTBILD HALLE C 2010	179
ABBILDUNG 4-30: LASTBILD HALLE C TGL 1964	179
ABBILDUNG 4-31: LASTBILD HALLE C TGL 1971	180
ABBILDUNG 4-32: LASTBILD HALLE C TGL 1976	180
ABBILDUNG 4-33: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 1 (WÄNDE)	181
ABBILDUNG 4-34: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 2 BINNENLAND (WÄNDE)	181
ABBILDUNG 4-35: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 2 KÜSTE UND INSELN OSTSEE (WÄNDE)	182
ABBILDUNG 4-36: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 3 BINNENLAND (WÄNDE)	182
ABBILDUNG 4-37: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 3 KÜSTE UND INSELN OSTSEE (WÄNDE)	182
ABBILDUNG 4-38: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 4 BINNENLAND (WÄNDE)	182
ABBILDUNG 4-39: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 4 KÜSTE NORD- UND OSTSEE UND INSELN OSTSEE (WÄNDE)	182
ABBILDUNG 4-40: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 4 INSELN DER NORDSEE (WÄNDE)	182
ABBILDUNG 4-41: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 1 (DÄCHER)	183
ABBILDUNG 4-42: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 2 BINNENLAND (DÄCHER)	183
ABBILDUNG 4-43: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 2 KÜSTE UND INSELN OSTSEE (DÄCHER)	183
ABBILDUNG 4-44: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 3 BINNENLAND (DÄCHER)	183
ABBILDUNG 4-45: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 3 KÜSTE UND INSELN OSTSEE (DÄCHER)	183
ABBILDUNG 4-46: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 4 BINNENLAND (DÄCHER)	183
ABBILDUNG 4-47: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 4 KÜSTE NORD- UND OSTSEE UND INSELN OSTSEE (DÄCHER)	184
ABBILDUNG 4-48: WINDLASTENTWICKLUNG WINDZONE 4 INSELN DER NORDSEE (DÄCHER)	184
ABBILDUNG 4-49: VERGLEICH DER ABMINDERUNGSFAKTOREN	194
ABBILDUNG 4-50: LASTBILD HALLE C TGL 1976	194
ABBILDUNG 4-51: SCHNEELASTENTWICKLUNG DORTMUND	195
ABBILDUNG 4-52: SCHNEELASTENTWICKLUNG AACHEN	195
ABBILDUNG 4-53: SCHNEELASTENTWICKLUNG MÜNCHEN	196
ABBILDUNG 4-54: SCHNEELASTENTWICKLUNG GARMISCH-PARTENKIRCHEN	196
ABBILDUNG 4-55: SCHNEELASTENTWICKLUNG HAMBURG	196
ABBILDUNG 4-56: SCHNEELASTENTWICKLUNG ROSTOCK	196
ABBILDUNG 4-57: SCHNEELASTENTWICKLUNG DRESDEN	197
ABBILDUNG 4-58: SCHNEELASTENTWICKLUNG BLANKENBURG	197
ABBILDUNG 4-59: UNDICHTS SANDWICH-LÄNGSFUGE INFOLGE WINKELABWEICHUNG	198
ABBILDUNG 4-60: HERSTELLERTOLERANZEN FÜR SANDWICHELEMENTE [45]	199
ABBILDUNG 4-61: HERSTELLERTOLERANZEN FÜR KASSETTENPROFILE MIT SICKEN [45]	200
ABBILDUNG 4-62: HERSTELLERTOLERANZEN FÜR TRAPEZPROFILE AUS STAHL [45]	201
ABBILDUNG 4-63: HERSTELLERTOLERANZEN FÜR TRAPEZPROFILE AUS STAHL NACH EPAQ [45]	201

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 4-64: ZULÄSSIGE MABABWEICHUNG EINER WAND MIT NENNMAß 10 M [77].....	204
ABBILDUNG 4-65: ZULÄSSIGE EBENHEITSABWEICHUNG EINER WAND MIT NENNMAß 10 M [77]	205
ABBILDUNG 4-66: BEISPIELGEBÄUDE MIT MASSIVER FASSADE [77].....	209
ABBILDUNG 4-67: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE NORDOST [77].....	213
ABBILDUNG 4-68: BEISPIELGEBÄUDE MIT SANDWICHELEMENT-FASSADE [77].....	213
ABBILDUNG 4-69: SANIERUNG EINER KASSETTENPROFILFASSADE MIT DISTANZBEFESTIGERN [41].....	221
ABBILDUNG 4-70: „HYBRIDSANIERUNG“ EINER KASSETTENPROFILFASSADE MIT VERTIKAL VERLEGTE SANDWICHELEMENTEN.....	222
ABBILDUNG 4-71: VERDREHBEHINDERUNG DURCH EIN SANDWICHELEMENT [89].....	223
ABBILDUNG 4-72: FUßPUNKT ALS FESTPUNKT [89].....	223
ABBILDUNG 4-73: BEISPIELGEBÄUDE ZUR BESTIMMUNG DER SCHUBSTEIFIGKEIT [89].....	225
ABBILDUNG 4-74: SCHUBSTEIFIGKEIT DER SANDWICHELEMENTE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SCHRAUBENANZAHL [89].....	225
ABBILDUNG 4-75: BILINEARES MATERIALMODELL FÜR FE-UNTERSUCHUNGEN [89].....	226
ABBILDUNG 4-76: GEOMETRIEPARAMETER DER SCHRAUBENABSTÄNDE [89].....	226
ABBILDUNG 4-77: VERFORMUNGSFIGUR SEITLICHES AUSWEICHEN BEI $k = 160 \text{ N/MM}$ [89]....	227
ABBILDUNG 4-78: VERFORMUNGSFIGUR SEITLICHES AUSWEICHEN BEI $k = 0,01 \text{ N/MM}$ [89]...	227
ABBILDUNG 4-79: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN BEI UNTERSCHIEDLICH DEFINIERTER SEITLICHER HALTERUNG [89].....	228
ABBILDUNG 4-80: ABMINDERUNGSFAKTOREN FÜR BIEGEKNICKEN DER SCHMALEN GURTE [89]	229
ABBILDUNG 4-81: BIEGEMOMENT UND AUFLAGERREAKTIONEN SANDWICHELEMENT 2 x 3000 MM.....	230
ABBILDUNG 4-82: BIEGEMOMENT UND AUFLAGERREAKTIONEN SANDWICHELEMENT 10 x 600 MM.....	231
ABBILDUNG 4-83: BIEGEMOMENT UND AUFLAGERREAKTIONEN SANDWICHELEMENT 10 x 600 MM.....	231
ABBILDUNG 4-84: ZUORDNUNG DER KASSETTENPROFILE.....	232
ABBILDUNG 4-85: STABWERKSMODELL FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	233
ABBILDUNG 4-86: VERFORMUNGSFIGUR FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	233
ABBILDUNG 4-87: QUERKRAFT FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	234
ABBILDUNG 4-88: STABWERKSMODELL FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM MIT UPE 140 IM SOCKEL- UND TRAUFBEREICH.....	234
ABBILDUNG 4-89: VERFORMUNGSFIGUR FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM MIT UPE 140 IM SOCKEL- UND TRAUFBEREICH.....	235
ABBILDUNG 4-90: VERFORMUNGSFIGUR FASSADENABSCHNITT ZWEIFELDTRÄGER 12000 x 6000 MM.....	235
ABBILDUNG 4-91: FEDERKENNLINIE ZUR MODELLIERUNG DER LÄNGSFUGEN DER SANDWICHELEMENTE [89].....	236
ABBILDUNG 4-92: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN REFERENZVERSUCHE UND FE-MODELL [89], [93], [94].....	237
ABBILDUNG 4-93: QUERSCHNITT ANSCHLUSS HYBRIDFASSADE.....	237
ABBILDUNG 4-94: LÄNGSSCHNITT ANSCHLUSS HYBRIDFASSADE.....	237
ABBILDUNG 4-95: VERFORMUNGSFIGUR LASTFALL WINDSOG 6000 x 6000 MM.....	239

ABBILDUNG 4-96: VERFORMUNGSFIGUR LASTFALL TEMPERATUR SOMMER FG III 6000 x 6000 MM	239
ABBILDUNG 4-97: BIEGEMOMENT KASSETTENPROFILE LASTFALL WINDSOG 6000 x 6000 MM	239
ABBILDUNG 4-98: BIEGEMOMENT KASSETTENPROFILE LASTFALL TEMPERATUR SOMMER FG III 6000 x 6000 MM.....	239
ABBILDUNG 4-99: QUERKRAFT KASSETTENPROFILE LASTFALL WINDSOG 6000 x 6000 MM ...	240
ABBILDUNG 4-100: QUERKRAFT KASSETTENPROFILE LASTFALL TEMPERATUR SOMMER FG III 6000 x 6000 MM.....	240
ABBILDUNG 4-101: EINFLUSS DER SANDWICHELEMENTE IN IHRER LÄNGSRICHTUNG.....	240
ABBILDUNG 4-102: VERSETZTE BEFESTIGUNG AN JEDEM ZWEITEN KASSETTENGURT 6000 X 6000 MM.....	242
ABBILDUNG 4-103: BEFESTIGUNG AN JEDEM ZWEITEN KASSETTENGURT 6000 x 6000 MM	242
ABBILDUNG 4-104: LOKALE ERTÜCHTIGUNG IM SOCKEL- UND TRAUFBEREICH.....	245
ABBILDUNG 4-105: BESTIMMUNG DER LOKALEN STEIFIGKEIT DES ANSCHLUSSES FÜR ABHEBENDE LASTEN (LÄNGE 300 MM).....	247
ABBILDUNG 4-106: BESTIMMUNG DER LOKALEN STEIFIGKEIT DES ANSCHLUSSES FÜR ABHEBENDE LASTEN (LÄNGE 1000 MM).....	247
ABBILDUNG 4-107: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN ZUGVERSUCHE.....	248
ABBILDUNG 4-108: VERSUCHSAUFBAU DRUCKVERSUCHE	248
ABBILDUNG 4-109: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DRUCKVERSUCHE	249
ABBILDUNG 4-110: STABWERKSMODELL SANDWICHELEMENT MIT STARREN AUFLAGERN (SPANNWEITE 10 x 600MM)	250
ABBILDUNG 4-111: STABWERKSMODELL SANDWICHELEMENT MIT FEDERAUFLAGERN $k = 0,200$ kN/MM (SPANNWEITE 10 x 600MM).....	250
ABBILDUNG 4-112: SEITENANSICHT VERSUCHSAUFBAU DRUCKVERSUCHE.....	251
ABBILDUNG 4-113: ISOMETRIE VERSUCHSAUFBAU DRUCKVERSUCHE.....	252
ABBILDUNG 4-114: KASSETTENPROFILE IM VERSUCHSSTAND	252
ABBILDUNG 4-115: EINBAU DER MINERALWOLLE	252
ABBILDUNG 4-116: SEITENANSICHT VERSUCHSKÖRPER	253
ABBILDUNG 4-117: LASTEINLEITUNG SANDWICHELEMENT	253
ABBILDUNG 4-118: NICHT SICHTBARE BEFESTIGUNG IN DER LÄNGSFUGE.....	253
ABBILDUNG 4-119: SICHTBARE BEFESTIGUNG IN DURCHSTECKMONTAGE	253
ABBILDUNG 4-120: C-PROFIL ZUR QUERAUSSTEIFUNG.....	253
ABBILDUNG 4-121: ABHÄNGUNG DER FREIEN RÄNDER DER KASSETTENPROFILE.....	253
ABBILDUNG 4-122: ZWEI SEILWEGAUFNEHMER IN FELDMITTE.....	254
ABBILDUNG 4-123: INDUKTIVER WEGAUFNEHMER AN DER LÄNGSFUGE DER SANDWICHELEMENTE	254
ABBILDUNG 4-124: SEITENANSICHT VERSUCHSAUFBAU ZUGVERSUCHE	254
ABBILDUNG 4-125: ISOMETRIE VERSUCHSAUFBAU ZUGVERSUCHE	255
ABBILDUNG 4-126: LAST-VERFORMUNGS-DIAGRAMM DRUCKVERSUCH	256
ABBILDUNG 4-127: EINDRÜCKEN DES SCHMALEN GURTES UND STEGBEULEN.....	256
ABBILDUNG 4-128: BEULEN DES BREITEN GURTES	256
ABBILDUNG 4-129: BEREICH DES VERSAGENS DER KASSETTENPROFILE	257
ABBILDUNG 4-130: VERSUCHSKÖRPER NACH VERSUCHSENDE	257
ABBILDUNG 4-131: BEZEICHNUNG DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER.....	257

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 4-132: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER EINES BEISPIELVERSUCHES	257
ABBILDUNG 4-133: ÜBLICHE LÄNGSRANDPROFILIERUNG MIT WEICHEM DICHTBAND	258
ABBILDUNG 4-134: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN VERSUCHSREIHE 1	258
ABBILDUNG 4-135: EINDRÜCKEN DES SCHMALEN GURTES DURCH FEHLERHAFTHE MONTAGE..	259
ABBILDUNG 4-136: ORT DES VERSAGENS VERSUCHSREIHE 2.....	259
ABBILDUNG 4-137: EINDRÜCKEN DES SCHMALEN GURTES UND STEGBEULEN VERSUCHSREIHE 2	259
ABBILDUNG 4-138: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER EINES BEISPIELVERSUCHES	260
ABBILDUNG 4-139: LÄNGSFUGE WA3 BEI VERSUCHSENDE NICHT GESCHLOSSEN	260
ABBILDUNG 4-140: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN VERSUCHSREIHE 2	260
ABBILDUNG 4-141: VERSUCHSKÖRPER OHNE MINERALWOLLE BEI $\frac{3}{4} F_{MAX}$	262
ABBILDUNG 4-142: VERSUCHSKÖRPER MIT STEIFER MINERALWOLLE	262
ABBILDUNG 4-143: VERSUCHSAUFBAU MIT LÄNGSFUGE IN FELDMITTE.....	262
ABBILDUNG 4-144: VERSAGENSBEREICH VERSUCHSREIHE 4.....	263
ABBILDUNG 4-145: EINDRÜCKEN DES SCHMALEN GURTES UND STEGBEULEN VERSUCHSREIHE 4	263
ABBILDUNG 4-146: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN VERSUCHSREIHEN 1 UND 4	263
ABBILDUNG 4-147: LÄNGSFUGE OHNE DICHTBAND.....	264
ABBILDUNG 4-148: FORMSCHLÜSSIGE VERBINDUNG LÄNGSFUGE SANDWICHELEMENTE	264
ABBILDUNG 4-149: BEZEICHNUNG DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER	264
ABBILDUNG 4-150: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER EINES BEISPIELVERSUCHES BEI VERDECKTE BEFESTIGUNG.....	264
ABBILDUNG 4-151: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVE WEGAUFNEHMER EINES BEISPIELVERSUCHES BEI SICHTBARE BEFESTIGUNG	265
ABBILDUNG 4-152: DRUCKVERSAGEN LÄNGSFUGE SICHTBARE BEFESTIGUNG NACH VERSUCHSENDE	265
ABBILDUNG 4-153: BEREICH DES VERSAGENS DER KASSETTENPROFILE	266
ABBILDUNG 4-154: INNENANSICHT VERSUCHSKÖRPER NACH VERSUCHSENDE	266
ABBILDUNG 4-155: BEZEICHNUNG DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER DER ZUGVERSUCHE...	266
ABBILDUNG 4-156: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER EINES BEISPIELVERSUCHES	266
ABBILDUNG 4-157: AUFKLAFFENDE LÄNGSFUGE	267
ABBILDUNG 4-158: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN VERSUCHSREIHE 6	267
ABBILDUNG 4-159: ORT DES VERSAGENS VERSUCHSREIHE 8.....	269
ABBILDUNG 4-160: EINDRÜCKEN DES SCHMALEN GURTES UND STEGBEULEN VERSUCHSREIHE 8	269
ABBILDUNG 4-161: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN VERSUCHSREIHE 8	269
ABBILDUNG 4-162: VERKLEBTE LÄNGSFUGE NACH VERSUCHSENDE	270
ABBILDUNG 4-163: MIT LASCHEN VERSCHRAUBTE LÄNGSFUGEN DER SANDWICHELEMENTE.	270
ABBILDUNG 4-164: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN ZUGVERSUCHE MIT VERKLEBTEN LÄNGSFUGEN	270
ABBILDUNG 4-165: BEZEICHNUNG DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER DER ZUGVERSUCHE...	271
ABBILDUNG 4-166: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER	271

ABBILDUNG 4-167: VERSAGEN DER KASSETTENPROFILE UNTERHALB DER MITTLEREN LÄNGSFUGE.....	271
ABBILDUNG 4-168: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER INDUKTIVEN WEGAUFNEHMER VERSUCH MIT LASCHEN	272
ABBILDUNG 4-169: VERSAGEN DER KASSETTENPROFILE UNTERHALB DER MITTLEREN LÄNGSFUGE VERSUCH MIT LASCHEN	272
ABBILDUNG 4-170: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN ZUGVERSUCHE MIT VERKLEBTEN UND VERSCHRAUBTEN LÄNGSFUGEN	272
ABBILDUNG 4-171: „HYBRIDANIERUNG“ EINER KASSETTENPROFILFASSADE MIT HORIZONTAL VERLEGTE SANDWICHELEMENTEN	274
ABBILDUNG 4-172: SEITENANSICHT HYBRIDQUERSCHNITT MIT HORIZONTAL VERLEGTE SANDWICHELEMENTEN.....	275
ABBILDUNG 4-173: DEHNUNGSMESSTREIFEN AM SCHMALEN GURT DER KASSETTENPROFILE.....	275
ABBILDUNG 4-174: POSITION DER DEHNUNGSMESSTREIFEN IN FELDMITTE.....	275
ABBILDUNG 4-175: MONTAGE LISENENPROFIL QHP 40 X 4 MM	276
ABBILDUNG 4-176: ANSICHT LISENENPROFIL	276
ABBILDUNG 4-177: BEULEN DER KASSETTENPROFILE	276
ABBILDUNG 4-178: KNITTERN DER INNEREN DECKSCHICHT	276
ABBILDUNG 4-179: LOKALE VERFORMUNGEN UND DELAMINATION DER INNEREN DECKSCHICHT	277
ABBILDUNG 4-180: MONTAGE DER C-PROFILE	277
ABBILDUNG 4-181: VERSUCHSKÖRPER NACH VERSUCHSENDE	277
ABBILDUNG 4-182: HERAUSZIEHEN DES BEFESTIGUNGSMITTELS AUS DEN SCHMALEN KASSETTENGURTEN.....	277
ABBILDUNG 4-183: ANSICHT MONTAGE HUTPROFIL	278
ABBILDUNG 4-184: HUTPROFILE BEI DER MONTAGE	278
ABBILDUNG 4-185: VERSUCHSKÖRPER NACH VERSUCHSENDE	278
ABBILDUNG 4-186: KNITTERN DER INNEREN DECKSCHICHT	278
ABBILDUNG 4-187: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN UNTERSCHIEDLICHER LISENENPROFILE	279
ABBILDUNG 4-188: SICHTBARE SCHRAUBENKÖPFE	280
ABBILDUNG 4-189: BEFESTIGUNG DER SANDWICHELEMENTE VERSUCHSREIHE 2	280
ABBILDUNG 4-190: LISENENPROFILE MIT REDUZIERTEM LÄNGSABSTAND.....	281
ABBILDUNG 4-191: BEFESTIGUNG DER SANDWICHELEMENTE VERSUCHSREIHE 3	281
ABBILDUNG 4-192: VERSUCHSKÖRPER VOR VERSUCHSBEGINN	282
ABBILDUNG 4-193: KNITTERN DER INNEREN DECKSCHICHT	282
ABBILDUNG 4-194: QUERKRAFTVERSAGEN AM AUFLAGER	283
ABBILDUNG 4-195: VERSTÄRKUNG DER KASSETTENPROFILE IM AUFLAGERBEREICH.....	283
ABBILDUNG 4-196: KNITTERN DES ÄUßEREN DECKBLECHES	283
ABBILDUNG 4-197: VERSAGEN DER KASSETTENPROFILE	283
ABBILDUNG 4-198: VERSUCHSKÖRPER VOR VERSUCHSBEGINN	284
ABBILDUNG 4-199: KNITTERN DER ÄUßEREN DECKSCHICHT	284
ABBILDUNG 4-200: LAST-VERFORMUNGS-KURVEN DER DEHNUNGSMESSTREIFEN	285
ABBILDUNG 4-201: ANORDNUNG DER DEHNUNGSMESSTREIFEN UND DEHNUNG ZUM ZEITPUNKT T.....	285
ABBILDUNG 4-202: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER EINHAKVERBINDUNG (VERTIKALSCHNITT).....	286

Verzeichnisse

Lists

ABBILDUNG 4-203: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER EINHAKVERBINDUNG (HORIZONTALSCHNITT).....	286
ABBILDUNG 4-204: KASSETTENSTEG UNTER VERTIKALLAST [89].....	287
ABBILDUNG 4-205: SPANNUNG σ_z INFOLGE EIGENGEWICHT MIT STARRER EINSPANNUNG DER STEGE [89].....	288
ABBILDUNG 4-206: SPANNUNG σ_z INFOLGE EIGENGEWICHT AM 100 MM BREITEN KASSETTENSTREIFEN [89].....	288
ABBILDUNG 4-207: EINFLUSS VERTIKALER LASTEN AUF DIE STEGNEIGUNG [89].....	289
ABBILDUNG 4-208: EINFLUSS VERTIKALER LASTEN AUF DIE STEGNEIGUNG [89].....	289
ABBILDUNG 4-209: ZUSÄTZLICHE UNTERKONSTRUKTION ZUR BEFESTIGUNG DER AUßENSCHALE	290
ABBILDUNG 4-210: HUTPROFIL MITTIG ZWISCHEN DEN KASSETTENSTEGEN ANGEORDNET [88]	291
ABBILDUNG 4-211: HUTPROFIL MIT ERHÖHTER BAUHÖHE [88].....	291
ABBILDUNG 4-212: C-PROFILE MITTIG ZWISCHEN DEN KASSETTENSTEGEN [88].....	291
ABBILDUNG 4-213: Z-PROFIL MITTIG ZWISCHEN DEN KASSETTENSTEGEN [88].....	291
ABBILDUNG 4-214: C-PROFILE MITTIG ZWISCHEN DEN KASSETTENSTEGEN [88].....	292
ABBILDUNG 4-215: Z-PROFIL MITTIG ZWISCHEN DEN KASSETTENSTEGEN [88].....	292
ABBILDUNG 4-216: Z-PROFILE AUßEN LIEGEND AN DEN SCHMALEN GURTEN ANGEORDNET [88]	292
ABBILDUNG 4-217: Z-PROFILE AUßEN LIEGEND AN DEN SCHMALEN GURTEN ANGEORDNET [88]	292
ABBILDUNG 4-218: VERGLEICH DER BRUTTO- UND NETTO-QUERSCHNITTSWERTE [88].....	293
ABBILDUNG 4-219: VERFORMUNGSFIGUR KASSETTENPROFIL MIT HUTPROFIL ERTÜCHTIGT [88]	294
ABBILDUNG 4-220: PARAMETERSTUDIE BLECHDICKE HUTPROFIL [88].....	294
ABBILDUNG 4-221: BEFESTIGUNG DER KASSETTENPROFILE.....	294
ABBILDUNG 4-222: UNTERSCHIEDLICHE MINERALWOLLDÄMMUNG.....	294
ABBILDUNG 4-223: FASSADENABSCHNITT VOR (RECHTS) UND NACH (LINKS) DEMONTAGE DER TRAPEZ-AUßENSCHALE.....	295
ABBILDUNG 4-224: VERTIKALE VERLEGUNG DER SANDWICHELEMENTE.....	296
ABBILDUNG 4-225: BEFESTIGUNG AN DEN KASSETTENPROFILIEN.....	296
ABBILDUNG 4-226: BEFESTIGUNG AN DEN KASSETTENPROFILIEN.....	296
ABBILDUNG 4-227: BEFESTIGUNG IM SOCKELBEREICH.....	297
ABBILDUNG 4-228: BEFESTIGUNG IM SOCKELBEREICH.....	297
ABBILDUNG 4-229: FASSADE VOR (RECHTS) UND NACH DER SANIERUNG (LINKS).....	297
ABBILDUNG 4-230: HALLENKOMPLEX NACH DER SANIERUNG.....	297
ABBILDUNG 4-231: ANSICHT KASSETTENPROFILFASSADE ZU BEGINN DER SANIERUNG.....	298
ABBILDUNG 4-232: ANSICHT KASSETTENPROFILFASSADE VOR DER SANIERUNG.....	298
ABBILDUNG 4-233: KONSTRUKTIONSDetail TRAUFPUNKT.....	298
ABBILDUNG 4-234: KONSTRUKTIONSDetail SOCKEL.....	299
ABBILDUNG 4-235: MONTAGE DER SANDWICHELEMENTE.....	299
ABBILDUNG 4-236: DETAILANSICHT UNTERKONSTRUKTION IM TRAUFBEREICH ZUR MONTAGE DER SANDWICHELEMENTE.....	299
ABBILDUNG 4-237: DETAIL DACHENTWÄSSERUNG.....	300
ABBILDUNG 4-238: DACH NACH DER SANIERUNG.....	300

ABBILDUNG 4-239: INDUSTRIEHALLE MIT EINER FASSADE AUS SANDWICHELEMENTEN	302
ABBILDUNG 4-240: SANIERUNG EINER MASSIVEN FASSADE MIT TRAPEZPROFILIEN.....	303
ABBILDUNG 4-241: SANIERUNG EINER MASSIVEN FASSADE MIT FASSADENPROFILIEN	304
ABBILDUNG 4-242: FASSADENPROFILE	304
ABBILDUNG 4-243: PRODUKTBEISPIEL VHF-SYSTEM [96]	305
ABBILDUNG 4-244: SANIERUNG EINER MASSIVEN FASSADE MIT SANDWICHELEMENTEN.....	306
ABBILDUNG 4-245: MONTAGE HUTPROFILE	307
ABBILDUNG 4-246: MONTAGE SANDWICHELEMENT AN HUTPROFIL	307
ABBILDUNG 4-247: MASSIVE FASSADE NACH MONTAGE DER SANDWICHELEMENTE.....	307
ABBILDUNG 4-248: TRAPEZPROFIL IN POSITIVLAGE VERLEGT	310
ABBILDUNG 4-249: TRAPEZPROFIL IN NEGATIVLAGE VERLEGT	310
ABBILDUNG 4-250: SANDWICHELEMENT MIT STARK PROFILIERTEM ÄUßEREN DECKBLECH.....	311
ABBILDUNG 4-251: SCHEMATISCH: SANIERUNG MASSIVDACH MIT SANDWICHELEMENT [97].	313
ABBILDUNG 4-252: SCHEMATISCH: SANIERUNG MASSIVDACH MIT STEHFALZPROFILIEN [97]..	313
ABBILDUNG 4-253: SKIZZE: BEFESTIGUNG SANDWICHELEMENT AUF SANDWICHELEMENT [97]	314
ABBILDUNG 4-254: SKIZZE: SANDWICHELEMENTDACH MIT ZUSÄTZLICHER DÄMMUNG UND TRAPEZPROFIL-AUßENSCHALE.....	315
ABBILDUNG 4-255: SKIZZE: ERWEITERUNG DER DÄMMUNG EINSCHALIGES TRAPEZDACH.....	315
ABBILDUNG 4-256: SKIZZE: ERWEITERUNG DER DÄMMUNG ZWEISCHALIGES TRAPEZDACH ...	315
ABBILDUNG 4-257: SKIZZE: SANIERUNG TRAPEZDACH MIT STEHFALZPROFIL-AUßENSCHALE	316
ABBILDUNG 4-258: SANIERUNG TRAPEZDACH MIT SANDWICHELEMENT	317
ABBILDUNG 4-259: GEOMETRIE „HALLE A“	319
ABBILDUNG 4-260: TRAPEZDACH UNGEDÄMMT.....	319
ABBILDUNG 4-261: TRAPEZDACH EINSCHALIG.....	319
ABBILDUNG 4-262: TRAPEZDACH ZWEISCHALIG	319

List of figures

FIGURE 1-1: ENERGY CONSUMPTION WITH AND WITHOUT REFURBISHMENT AS FUNCTION OF TIME	2
FIGURE 1-2: SPORTS HALL IN NEED OF REHABILITATION	3
FIGURE 1-3: FLAT-RATE VALUE OF THERMAL TRANSMITTANCE AND SELECTED REQUIREMENTS .	4
FIGURE 1-4: LINER TRAY WITH MODULAR LIGHTWEIGHT STEEL SYSTEM.....	4
FIGURE 1-5: PRACTICAL EXAMPLE – ROOF AND FAÇADE REFURBISHMENT WITH SANDWICH ELEMENTS	5
FIGURE 1-6: ENERGY CONSUMPTION OF RESIDENTIAL BUILDING AS FUNCTION OF ERECTION DATE [22]	7
FIGURE 1-7: STOCK OF RESIDENTIAL BUILDING AS FUNCTION OF ERECTION DATE (QUANTITY) [22]	7
FIGURE 1-8: STOCK OF RESIDENTIAL BUILDING AS FUNCTION OF ERECTION DATE (FLOOR AREA) [23]	8
FIGURE 1-9: UTILISATION OF NON-RESIDENTIAL BUILDINGS [23].....	8
FIGURE 1-10: STOCK OF NON-RESIDENTIAL BUILDING AS FUNCTION OF ERECTION DATE (FLOOR AREA) [23]	9
FIGURE 1-11: COMPLETION AND QUANTITY OF BUILDINGS [24]	9
FIGURE 1-12: STOCK REFURBISHMENT WITH LIGHTWEIGHT STEEL SYSTEMS	12
FIGURE 2-1: SINGLE LAYER UNINSULATED TRAPEZOIDAL WALL	14
FIGURE 2-2: DOUBLE LAYER INSULATED TRAPEZOIDAL WALL	14
FIGURE 2-3: SANDWICH WALL PANELS.....	14
FIGURE 2-4: LINER TRAY ELEMENTS	14
FIGURE 2-5: UNINSULATED MASSIVE WALL WITH EXTERIOR METAL FACING.....	15
FIGURE 2-6: INSULATED MASSIVE WALL WITH EXTERIOR METAL FACING	15
FIGURE 2-7: VENTILATED CONSTRUCTION ON MASSIVE WALL WITH EXTERIOR METAL FACING .	15
FIGURE 2-8: SINGLE LAYER UNINSULATED TRAPEZOIDAL OR CORRUGATED ROOF	16
FIGURE 2-9: DOUBLE LAYER INSULATED NON VENTILATED TRAPEZOIDAL ROOF	16
FIGURE 2-10: DOUBLE LAYER INSULATED NON VENTILATED ROOF WITH STANDING SEAM PROFILES	17
FIGURE 2-11: SINGLE LAYER INSULATED NON VENTILATED TRAPEZOIDAL ROOF WITH SEALING	17
FIGURE 2-12: SANDWICH ROOF PANEL	17
FIGURE 2-13: STEEL SANDWICH PANEL (WALL).....	18
FIGURE 2-14: LINER TRAY ELEMENT	18
FIGURE 2-15: STEEL SANDWICH PANEL (ROOF)	18
FIGURE 2-16: MULTI-LAYER ROOF CONSTRUCTION.....	18
FIGURE 2-17: CLASSIFICATION OF THE CONSIDERED CONSTRUCTION TYPES	19
FIGURE 2-18: NUMERICAL FINITE ELEMENT MODEL AND DETERMINED TEMPERATURE DISTRIBUTION.....	20
FIGURE 2-19: INFRA-RED THERMOGRAPHY AS EXAMPLE FOR AN EXPERIMENTAL ON SITE METHOD	21

FIGURE 2-20: THERMAL QUALITY OF EXISTING UNINSULATED EXTERIOR WALLS IN MASSIVE CONSTRUCTION TYPE	22
FIGURE 2-21: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF CONCRETE.....	23
FIGURE 2-22: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF GAS CONCRETE.....	23
FIGURE 2-23: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF MASONRY.....	24
FIGURE 2-24: LINER TRAY ELEMENT WITH SEPARATION STRIPE	25
FIGURE 2-25: LINER TRAY ELEMENT WITH ADDITIONAL INSULATION	25
FIGURE 2-26: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF LINER TRAY ELEMENTS ($t_N = 1,50$ MM)	26
FIGURE 2-27: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF LINER TRAY ELEMENTS ($t_N = 0,75$ MM)	27
FIGURE 2-28: STEEL SANDWICH PANEL (WALL).....	27
FIGURE 2-29: STEEL SANDWICH PANEL (ROOF)	27
FIGURE 2-30: LONGITUDENAL JOINT TYPES FOR SANDWICH PANELS ACCORDING TO DIN EN 14509 [29].....	28
FIGURE 2-31: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF SANDWICH PANELS (WALL)	28
FIGURE 2-32: THERMAL QUALITY OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF SANDWICH PANELS (ROOF).....	29
FIGURE 2-33: MOISTURE LOADS AND IMPACTS.....	30
FIGURE 2-34: MOISTURE CONTENT AS FUNCTION OF OBSERVATION PERIOD (QUALITATIVE).....	31
FIGURE 2-35: IMPACT OF THE POSITION OF THE AIR TIGHTNESS LAYER (QUALITATIVE).....	32
FIGURE 2-36: REQUIREMENT VALUES FOR THE VERIFICATIONS OF THE MINIMAL THERMAL PROTECTION	32
FIGURE 2-37: “STEPS FOR MOISTURE PROTECTION VERIFICATION”.....	33
FIGURE 2-38: NUMERICAL METHODS FOR MOISTURE PROTECTION	34
FIGURE 2-39: DIFFUSION BEHAVIOUR OF MASONRY AND SANDWICH PANEL (QUALITATIVE).....	34
FIGURE 2-40: VISUALISATION OF DIFFERENT WATER VAPOUR RESISTANCE FACTORS.....	35
FIGURE 2-41: EXEMPLARY PROCEEDING FOR GLASERS METHOD.....	36
FIGURE 2-42: EXAMPLE AND RESULTS ACCORDING TO DIN EN 15026	39
FIGURE 2-43: TEMPERATURE DISTRIBUTION CONCRETE WALLS	40
FIGURE 2-44: TEMPERATURE DISTRIBUTION GAS CONCRETE WALLS	40
FIGURE 2-45: TEMPERATURE DISTRIBUTION MASONRY WALLS	41
FIGURE 2-46: SATURATION PRESSURE DISTRIBUTION CONCRETE WALLS.....	41
FIGURE 2-47: SATURATION PRESSURE DISTRIBUTION GAS CONCRETE WALLS.....	41
FIGURE 2-48: SATURATION PRESSURE DISTRIBUTION MASONRY WALLS.....	42
FIGURE 2-49: PARTIAL PRESSURE DISTRIBUTION CONCRETE WALLS.....	42
FIGURE 2-50: PARTIAL PRESSURE DISTRIBUTION GAS CONCRETE WALLS.....	43
FIGURE 2-51: PARTIAL PRESSURE DISTRIBUTION MASONRY WALLS.....	43
FIGURE 2-52: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY CONCRETE WALLS	43
FIGURE 2-53: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY GAS CONCRETE WALLS	44
FIGURE 2-54: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY MASONRY WALLS	44
FIGURE 2-55: TEMPERATURE DISTRIBUTION LINER TRAY ELEMENTS.....	46
FIGURE 2-56: SATURATION PRESSURE DISTRIBUTION LINER TRAY ELEMENTS	46
FIGURE 2-57: PARTIAL PRESSURE DISTRIBUTION LINER TRAY ELEMENTS	47
FIGURE 2-58: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY LINER TRAY ELEMENTS.....	47

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 2-59: TEMPERATURE DISTRIBUTION SANDWICH PANELS	48
FIGURE 2-60: SATURATION PRESSURE DISTRIBUTION SANDWICH PANELS	48
FIGURE 2-61: PARTIAL PRESSURE DISTRIBUTION SANDWICH PANELS	49
FIGURE 2-62: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY SANDWICH PANELS.....	49
FIGURE 2-63: COMPARISON OF DISTRIBUTION OF TEMPERATURES FOR SANDWICH PANELS.....	51
FIGURE 2-64: COMPARISON OF DISTRIBUTION OF SATURATION PRESSURE FOR SANDWICH PANELS	51
FIGURE 2-65: COMPARISON OF DISTRIBUTION OF PARTIAL PRESSURE FOR SANDWICH PANELS...	52
FIGURE 2-66: COMPARISON OF DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANELS	52
FIGURE 2-67: DISTRIBUTION OF TEMPERATURES SANDWICH PANELS (PU).....	53
FIGURE 2-68: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY SANDWICH PANELS (PU)	53
FIGURE 2-69: DISTRIBUTION OF TEMPERATURES SANDWICH PANELS (MW)	53
FIGURE 2-70: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY SANDWICH PANELS (MW).....	54
FIGURE 2-71: APPROACH FOR STATIONARY EXPANSION OF THE METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	54
FIGURE 2-72: FE MODELS FOR STATIONARY EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3..	55
FIGURE 2-73: DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FOR STATIONARY EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3	55
FIGURE 2-74: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR STATIONARY EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3	56
FIGURE 2-75: MINIMAL AND MAXIMAL RELATIVE HUMIDITY FOR STATIONARY EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	56
FIGURE 2-76: CRITICAL CROSS SECTION PARTS FOR STATIONARY EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3	56
FIGURE 2-77: CROSS SECTION FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3	57
FIGURE 2-78: TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3	58
FIGURE 2-79: WATER VAPOUR PARTIAL PRESSURE FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3	58
FIGURE 2-80: RESULTS 1 FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	59
FIGURE 2-81: RESULTS 2 FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	59
FIGURE 2-82: RESULTS 3 FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	60
FIGURE 2-83: EXEMPLARY MATERIAL FUNCTIONS FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	60
FIGURE 2-84: CROSS SECTION VARIATIONS FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	61
FIGURE 2-85: CLIMATIC BOUNDARY CONDITIONS FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	61
FIGURE 2-86: RESULTS “PU ϕ “ FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	62
FIGURE 2-87: RESULTS “PU w” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026.....	62
FIGURE 2-88: RESULTS “MW ϕ “ FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	63
FIGURE 2-89: RESULTS “MW w” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	63
FIGURE 2-90: RESULTS “W _{TOT} ” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	63
FIGURE 2-91: CROSS SECTION VARIATIONS “JOINT” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	64
FIGURE 2-92: RESULTS “PU JOINT ϕ “ FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026.....	65
FIGURE 2-93: RESULTS “PU JOINT w” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	65

FIGURE 2-94: RESULTS “MW JOINT Φ ” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	65
FIGURE 2-95: RESULTS “MW JOINT w ” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	66
FIGURE 2-96: RESULTS “JOINT w_{TOT} ” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	66
FIGURE 2-97: AIR TIGHTNESS TESTING RIG, BLOWERDOOR MEASUREMENT AND LEAKAGE LOCATION WITH FOG	67
FIGURE 2-98: INDUSTRIAL APPLICATION OF SANDWICH PANELS	70
FIGURE 2-99: TYPES OF FACE LAYER PROFILING ACCORDING TO [49]	71
FIGURE 2-100: SANDWICH PANEL WITH PUR-CORE	72
FIGURE 2-101: SANDWICH PANEL WITH MW-CORE	72
FIGURE 2-102: CONTINUOUS SANDWICH PRODUCTION IN A DOUBLE BELT PLANT [51]	73
FIGURE 2-103: DIRECT FIXING IN PUSH-TROUGH INSTALLATION [51]	74
FIGURE 2-104: DIRECT AND INDIRECT MOUNTING OF SANDWICH PANELS [51]	75
FIGURE 2-105: LINER-TRAY FAÇADE SYSTEM (SMALL FLANGE DOWNWARDS) [44]	77
FIGURE 2-106: LINER-TRAY FAÇADE SYSTEM (SMALL FLANGE DOWNWARDS) [44]	77
FIGURE 2-107: LINER-TRAY FAÇADE WITH INSULATION BETWEEN WEBS [41]	77
FIGURE 2-108: LINER-TRAY FAÇADE WITH ADDITIONAL INSULATION [41]	77
FIGURE 2-109: LINER-TRAY FAÇADE WITH HORIZONTALLY MOUNTED OUTER SHELL [44]	78
FIGURE 2-110: ROLL FORMING LINE FOR THIN SHEETS	80
FIGURE 2-111: DOUBLE-SHELL BOLTED WALL CONSTRUCTION [44]	80
FIGURE 2-112: DOUBLE-SHELL TRAPEZOIDAL PROFILE ROOF [44]	80
FIGURE 2-113: DOUBLE-SHELL ROOF CONSTRUCTION WITH STANDING SEAM PROFILES [44]	81
FIGURE 2-114: DOUBLE-SHELL ROOF CONSTRUCTION WITH STANDING SEAM PROFILES [44]	81
FIGURE 2-115: LINER-TRAY FAÇADE WITH FAÇADE PROFILE OUTER SHELL [44]	82
FIGURE 2-116: INSULATED BRICK WALL WITH FAÇADE PROFILE OUTER SHELL	82
FIGURE 3-1: HYGROTHERMAL TRIANGLE	87
FIGURE 3-2: HYBRIDE ELEMENT	88
FIGURE 3-3: THERMAL FE MODEL OF HYBRID ELEMENT	89
FIGURE 3-4: TEMPERATURE DISTRIBUTION OF HYBRID ELEMENT	89
FIGURE 3-5: THERMAL QUALITY OF LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS ($T_{N,CAS} = 0,75$ MM)	92
FIGURE 3-6: THERMAL QUALITY OF LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS ($T_{N,CAS} = 0,75$ MM)	92
FIGURE 3-7: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HYBRID ELEMENT – TEST PREPARATION ...	93
FIGURE 3-8: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HYBRID ELEMENT – INFRARED CAMERA AND VIEW	94
FIGURE 3-9: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HYBRID ELEMENT – INFRARED PICTURES OF THE WARM SIDE	94
FIGURE 3-10: VISUALISATION AND DIMENSIONS OF Ω PROFILE	97
FIGURE 3-11: VISUALISATION AND DIMENSIONS OF Z PROFILE	97
FIGURE 3-12: EXEMPLARY THERMAL FE MODEL OF LINER TRAY ELEMENT REFURBISHED WITH Ω PROFILE (SYMMETRY)	97
FIGURE 3-13: EXEMPLARY TEMPERATURE DISTRIBUTION OF LINER TRAY ELEMENT REFURBISHED WITH Ω PROFILE (SYMMETRY)	97
FIGURE 3-14: EXEMPLARY THERMAL FE MODEL OF LINER TRAY ELEMENT REFURBISHED WITH Z PROFILE	98

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 3-15: EXEMPLARY TEMPERATURE DISTRIBUTION OF LINER TRAY ELEMENT REFURBISHED WITH Ω PROFILE	98
FIGURE 3-16: THERMAL QUALITY OF LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH Ω PROFILE ...	99
FIGURE 3-17: THERMAL QUALITY OF LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH Z PROFILE ..	100
FIGURE 3-18: THERMAL QUALITY OF REFURBISHED LINER TRAY ELEMENTS (COMPARISON) ...	100
FIGURE 3-19: THERMAL QUALITY – COMPARISON OF DIFFERENT REFURBISHED LINER TRAY ELEMENTS	101
FIGURE 3-20: THERMAL QUALITY OF SANDWICH WALL PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (MF STOCK).....	103
FIGURE 3-21: THERMAL QUALITY OF SANDWICH WALL PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (PU STOCK)	104
FIGURE 3-22: THERMAL QUALITY OF CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	106
FIGURE 3-23: THERMAL QUALITY OF GAS CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	107
FIGURE 3-24: THERMAL QUALITY OF MASONRY WALLS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	107
FIGURE 3-25: THERMAL QUALITY OF CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH MODULAR STEEL CONSTRUCTIONS.....	108
FIGURE 3-26: THERMAL QUALITY OF GAS CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH MODULAR STEEL CONSTRUCTIONS	109
FIGURE 3-27: THERMAL QUALITY OF MASONRY WALLS REFURBISHED WITH MODULAR STEEL CONSTRUCTIONS.....	110
FIGURE 3-28: SCHEMATIC SKETCH FOR REFURBISHMENT OF ROOF CONSTRUCTIONS	112
FIGURE 3-29: SCHEMATIC PROCEDURE FOR REFURBISHMENT OF SANDWICH ROOFS WITH SANDWICH.....	112
FIGURE 3-30: THERMAL QUALITY OF SANDWICH ROOF PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (PU STOCK)	113
FIGURE 3-31: THERMAL QUALITY OF SANDWICH ROOF PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (MW STOCK).....	114
FIGURE 3-32: EXEMPLARY VISUALISATION OF STANDING SEAM PROFILE ROOF.....	115
FIGURE 3-33: EXEMPLARY COMPARISON OF THE THERMAL QUALITY OF DIFFERENT CLIPS.....	115
FIGURE 3-34: THERMAL QUALITY OF TYPED CLIP.....	116
FIGURE 3-35: SCHEMATIC PROCEDURE FOR REFURBISHMENT OF SANDWICH ROOFS WITH STANDING SEAM PROFILE CONSTRUCTION	116
FIGURE 3-36: THERMAL QUALITY OF SANDWICH ROOF PANELS REFURBISHED WITH STANDING SEAM PROFILE CONSTRUCTIONS (PU STOCK).....	116
FIGURE 3-37: THERMAL QUALITY OF SANDWICH ROOF PANELS REFURBISHED WITH STANDING SEAM PROFILE CONSTRUCTIONS (MW STOCK)	117
FIGURE 3-38: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 145 + SE 60)	118
FIGURE 3-39: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 145 + SE 80)	118
FIGURE 3-40: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 90 + SE) ..	119
FIGURE 3-41: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 120 + SE)	120
FIGURE 3-42: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 160 + SE)	120

FIGURE 3-43: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 200 + SE).	121
FIGURE 3-44: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR HYBRID ELEMENT (CAS 240 + SE).	121
FIGURE 3-45: HYGRIC REQUIRED SANDWICH THICKNESS FOR HYBRID ELEMENT	122
FIGURE 3-46: CROSS SECTION OF HYBRID ELEMENT FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	122
FIGURE 3-47: CLIMATIC BOUNDARY CONDITIONS FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	123
FIGURE 3-48: RESULTS “HYBRID ELEMENT Φ “ FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026 ...	123
FIGURE 3-49: RESULTS “HYBRID ELEMENT W” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026 ..	123
FIGURE 3-50: RESULTS “HYBRID ELEMENT” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	124
FIGURE 3-51: RESULTS “HYBRID ELEMENT W_{TOT} ” FOR METHOD ACCORDING TO DIN EN 15026	125
FIGURE 3-52: TEST SET-UP FOR HYBRID ELEMENT TESTING	126
FIGURE 3-53: MEASUREMENT POINTS FOR HYBRID ELEMENT TESTING	127
FIGURE 3-54: RESULTS OF PRE-INVESTIGATIONS FOR HYBRID ELEMENT TESTING	128
FIGURE 3-55: RESULTS POINT “LINER TRAY“ FOR HYBRID ELEMENT TESTING	128
FIGURE 3-56: RESULTS POINT “EDGE“ FOR HYBRID ELEMENT TESTING.....	129
FIGURE 3-57: RESULTS POINT “SANDWICH“ FOR HYBRID ELEMENT TESTING.....	129
FIGURE 3-58: COMPARISON OF PRE-INVESTIGATIONS AND TEST FOR HYBRID ELEMENT TESTING	130
FIGURE 3-59: MODEL FOR NUMERICAL INVESTIGATION OF HYBRID ELEMENT TESTING	131
FIGURE 3-60: RESULTS 1 OF NUMERICAL INVESTIGATION OF HYBRID ELEMENT TESTING	131
FIGURE 3-61: COMPARISON OF PRE-INVESTIGATIONS AND NUMERICAL INVESTIGATION FOR HYBRID ELEMENT TESTING	132
FIGURE 3-62: RESULTS 2 OF NUMERICAL INVESTIGATION OF HYBRID ELEMENT TESTING	132
FIGURE 3-63: COMPARISON TEST AND NUMERICAL INVESTIGATION POINT “LINER TRAY“ FOR HYBRID ELEMENT TESTING	133
FIGURE 3-64: COMPARISON TEST AND NUMERICAL INVESTIGATION POINT “EDGE“ FOR HYBRID ELEMENT TESTING	134
FIGURE 3-65: COMPARISON TEST AND NUMERICAL INVESTIGATION POINT “SANDWICH“ FOR HYBRID ELEMENT TESTING	134
FIGURE 3-66: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (PU SE 60 + SE).....	135
FIGURE 3-67: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (PU SE 80 + SE).....	136
FIGURE 3-68: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (PU SE 100 + SE).....	136
FIGURE 3-69: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (PU SE 120 + SE).....	137
FIGURE 3-70: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (PU SE 160 + SE).....	137
FIGURE 3-71: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (MW SE 60 + SE)	138
FIGURE 3-72: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (MW SE 80 + SE)	138

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 3-73: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (MW SE 100 + SE)	139
FIGURE 3-74: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (MW SE 120 + SE)	139
FIGURE 3-75: DISTRIBUTION OF RELATIVE HUMIDITY FOR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL (MW SE 160 + SE)	140
FIGURE 3-76: DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR 100-MM-CONCRETE WALL REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	141
FIGURE 3-77: DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR 240-MM-CONCRETE WALL REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	141
FIGURE 3-78: DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR 100-MM-GAS CONCRETE WALL REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	142
FIGURE 3-79: DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR 500-MM-GAS CONCRETE WALL REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	142
FIGURE 3-80: DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR 100-MM-MASONRY WALL REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	143
FIGURE 3-81: DISTRIBUTIONS OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY FOR 490-MM-MASONRY WALL REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	143
FIGURE 3-82: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – CROSS SECTION AREAS.....	145
FIGURE 3-83: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – TEST SET-UP (1)	146
FIGURE 3-84: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – TEST SET-UP (2)	146
FIGURE 3-85: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – VISUALIZATION OF THE TEST RESULTS	147
FIGURE 3-86: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – VISUALIZATION OF THE RESULTS	148
FIGURE 3-87: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – VISUALIZATION OF THE NUMERIC RESULTS.....	150
FIGURE 3-88: SKETCH OF THE SAMPLE HALL	151
FIGURE 3-89: TARGET OF REFURBISHMENT AMOUNT OF INSULATION	154
FIGURE 3-90: SPECIFIC TRANSMISSION HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF THE SAMPLE HALLS (U-VALUE).....	154
FIGURE 3-91: REDUCTION OF SPECIFIC TRANSMISSION HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF THE SAMPLE HALLS (U-VALUE).....	155
FIGURE 3-92: SPECIFIC TRANSMISSION HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF THE SAMPLE HALLS (AMOUNT OF INSULATION).....	155
FIGURE 3-93: REDUCTION OF SPECIFIC TRANSMISSION HEAT TRANSFER COEFFICIENTS OF THE SAMPLE HALLS (AMOUNT OF INSULATION)	156
FIGURE 3-94: ALTERNATIVE PRESENTATION OF RESULTS FOR SAMPLE HALL VARIATIONS (AMOUNT OF INSULATION).....	156
FIGURE 4-1: COMPRESSIVE AND SUCTION FORCE DISTRIBUTION (HORIZONTAL SECTION)	160
FIGURE 4-2: DISPOSITION IN BUILDUNG AREAS [56].....	162
FIGURE 4-3: SEGMENTATION OF RIDGED ROOF SURFACE AND FACTORS FOR WIND DIRECTION PERPENDICULAR TO RIDGE.....	162
FIGURE 4-4: SEGMENTATION OF RIDGED ROOF SURFACE AND FACTORS FOR WIND DIRECTION PARALLEL TO RIDGE	163
FIGURE 4-5: AERODYNAMIC FACTOR C	166

FIGURE 4-6: GEOMETRY HALL A	168
FIGURE 4-7: LOAD ARRANGEMENT HALL A 1938	168
FIGURE 4-8: LOAD ARRANGEMENT HALL A 1986	169
FIGURE 4-9: LOAD ARRANGEMENT HALL A 2001	169
FIGURE 4-10: LOAD ARRANGEMENT HALL A 2005	169
FIGURE 4-11: LOAD ARRANGEMENT HALL A 2010	170
FIGURE 4-12: LOAD ARRANGEMENT HALL A TGL 1964	170
FIGURE 4-13: LOAD ARRANGEMENT HALL A TGL 1971	171
FIGURE 4-14: LOAD ARRANGEMENT HALL A TGL 1976	171
FIGURE 4-15: GEOMETRY HALL B.....	172
FIGURE 4-16: LOAD ARRANGEMENT HALL B 1938.....	172
FIGURE 4-17: LOAD ARRANGEMENT HALL B 1986.....	173
FIGURE 4-18: LOAD ARRANGEMENT HALL B 2001.....	173
FIGURE 4-19: LOAD ARRANGEMENT HALL B 2005.....	174
FIGURE 4-20: LOAD ARRANGEMENT HALL B 2010.....	174
FIGURE 4-21: LOAD ARRANGEMENT HALL B TGL 1964	175
FIGURE 4-22: LOAD ARRANGEMENT HALL B TGL 1971	175
FIGURE 4-23: LOAD ARRANGEMENT HALL B TGL 1976	176
FIGURE 4-24: GEOMETRY HALL C.....	176
FIGURE 4-25: LOAD ARRANGEMENT HALL C 1938.....	177
FIGURE 4-26: LOAD ARRANGEMENT HALL C 1986.....	177
FIGURE 4-27: LOAD ARRANGEMENT HALL C 2001.....	178
FIGURE 4-28: LOAD ARRANGEMENT HALL C 2005.....	178
FIGURE 4-29: LOAD ARRANGEMENT HALL C 2010.....	179
FIGURE 4-30: LOAD ARRANGEMENT HALL C TGL 1964	179
FIGURE 4-31: LOAD ARRANGEMENT HALL C TGL 1971	180
FIGURE 4-32: LOAD ARRANGEMENT HALL C TGL 1976	180
FIGURE 4-33: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 1 (WALLS)	181
FIGURE 4-34: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 2 INLAND (WALLS)	181
FIGURE 4-35: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 2 COAST AND ISLANDS BALTIC SEA (WALLS).....	182
FIGURE 4-36: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 3 INLAND (WALLS)	182
FIGURE 4-37: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 3 COAST AND ISLANDS BALTIC SEA (WALLS).....	182
FIGURE 4-38: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 4 INLAND (WALLS)	182
FIGURE 4-39: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 4 COAST NORTH SEA AND BALTIC SEA AND ISLANDS BALTIC SEA (WALLS).....	182
FIGURE 4-40: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 4 ISLANDS NORTH SEA (WALLS)	182
FIGURE 4-41: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 1 (ROOFS).....	183
FIGURE 4-42: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 2 INLAND (ROOFS).....	183
FIGURE 4-43: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 2 COAST AND ISLANDS BALTIC SEA (ROOFS)	183
FIGURE 4-44: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 3 INLAND (ROOFS).....	183
FIGURE 4-45: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 3 COAST AND ISLANDS BALTIC SEA (ROOFS)	183
FIGURE 4-46: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 4 INLAND (ROOFS).....	183

FIGURE 4-47: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 4 COAST NORTH SEA AND BALTIC SEA AND ISLANDS BALTIC SEA (ROOFS)	184
FIGURE 4-48: WIND LOAD DEVELOPMENT WINDZONE 4 ISLANDS NORTH SEA (ROOFS).....	184
FIGURE 4-49: COMPARISON OF REDUCTION FACTORS.....	194
FIGURE 4-50: LOAD ARRANGEMENT HALL C TGL 1976	194
FIGURE 4-51: SNOW LOAD DEVELOPMENT DORTMUND.....	195
FIGURE 4-52: SNOW LOAD DEVELOPMENT AACHEN	195
FIGURE 4-53: SNOW LOAD DEVELOPMENT MUNICH	196
FIGURE 4-54: SNOW LOAD DEVELOPMENT GARMISCH-PARTENKIRCHEN	196
FIGURE 4-55: SNOW LOAD DEVELOPMENT HAMBURG	196
FIGURE 4-56: SNOW LOAD DEVELOPMENT ROSTOCK	196
FIGURE 4-57: SNOW LOAD DEVELOPMENT DRESDEN	197
FIGURE 4-58: SNOW LOAD DEVELOPMENT BLANKENBURG	197
FIGURE 4-59: LEAKY LONGITUDINAL SANDWICH PANEL JOINT DUE TO ANGULAR DEVIATION..	198
FIGURE 4-60: PRODUCTION TOLERANCES FOR SANDWICH PANELS [45].....	199
FIGURE 4-61: PRODUCTION TOLERANCES FOR LINER TRAYS WITH BEADS [45].....	200
FIGURE 4-62: PRODUCTION TOLERANCES FOR TRAPEZOIDAL PROFILES [45]	201
FIGURE 4-63: PRODUCTION TOLERANCES FOR TRAPEZOIDAL PROFILES ACCORDING TO EPAQ [45]	201
FIGURE 4-64: ADMISSIBLE OFFSIZE FOR A WALL WITH 10 M NOMINAL DIMENSION [77].....	204
FIGURE 4-65: ADMISSIBLE PLANE OFFSIZE FOR A WALL WITH 10 M NOMINAL DIMENSION [77]	205
FIGURE 4-66: EXAMPLE BUILDING WITH SOLID FAÇADE [77]	209
FIGURE 4-67: FLATNESS OFFSET FAÇADE NORTHEAST [77]	213
FIGURE 4-68: EXAMPLE BUILDING WITH SANDWICH PANEL FAÇADE [77].....	213
FIGURE 4-69: REFURBISHMENT OF LINER TRAY FAÇADE WITH DISTANCE FASTENERS [41].....	221
FIGURE 4-70: “HYBRID REFURBISHMENT” OF A LINER TRAY FAÇADE WITH VERTICALLY MOUNTED SANDWICH PANELS	222
FIGURE 4-71: TORSION OBSTRUCTION DUE TO A SANDWICH PANEL [89]	223
FIGURE 4-72: BASE POINT AS FIXED POINT [89].....	223
FIGURE 4-73: SAMPLE BUILDING FOR DETERMINATION OF SHEAR STIFFNESS [89].....	225
FIGURE 4-74: SHEAR STIFFNESS OF SANDWICH PANELS DEPENDING ON FIXATIONS COUNT [89]	225
FIGURE 4-75: BILINEAR MATERIAL MODEL FOR FE-RESEARCH [89].....	226
FIGURE 4-76: GEOMETRY PARAMETERS OF BOLT SPACING [89]	226
FIGURE 4-77: DEFORMED SHAPE LONGITUDINAL DISPLACEMENT WITH $k = 160 \text{ N/MM}$ [89].....	227
FIGURE 4-78: DEFORMED SHAPE LONGITUDINAL DISPLACEMENT WITH $k = 0,01 \text{ N/MM}$ [89]....	227
FIGURE 4-79: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES FOR VARIED DEFINED LATERAL SUPPORTS [89] .	228
FIGURE 4-80: REDUCTION FACTOR FOR FLEXURAL BUCKLING [89].....	229
FIGURE 4-81: BENDING MOMENT AND SUPPORT REACTIONS SANDWICH PANEL 2 X 3000 MM ..	230
FIGURE 4-82: BENDING MOMENT AND SUPPORT REACTIONS SANDWICH PANEL 10 X 600 MM ..	231
FIGURE 4-83: BENDING MOMENT AND SUPPORT REACTIONS SANDWICH PANEL 10 X 600 MM ..	231
FIGURE 4-84: MAPPING OF THE LINER TRAY PROFILES	232
FIGURE 4-85: FRAMEWORK SIMULATION FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM.....	233
FIGURE 4-86: DEFORMED SHAPE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM	233
FIGURE 4-87: SHEAR FORCE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM	234
FIGURE 4-88: FRAMEWORK SIMULATION FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM WITH UPE 140 IN PLINTH AND EAVE AREA	234

FIGURE 4-89: DEFORMED SHAPE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM WITH UPE 140 IN PLINTH AND EAVE AREA.....	235
FIGURE 4-90: DEFORMED SHAPE FAÇADE SECTION TWO SPAN 12000 X 6000 MM.....	235
FIGURE 4-91: SPRING CURVE FOR SANDWICH PANEL LONGITUDINAL JOINT MODELLING [89]...	236
FIGURE 4-92: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES REFERENCE TESTS AND FE MODEL [89], [93], [94]	237
FIGURE 4-93: CROSS SECTION CONNECTION HYBRID FAÇADE.....	237
FIGURE 4-94: LONGITUDINAL SECTION CONNECTION HYBRID FAÇADE.....	237
FIGURE 4-95: DEFORMED SHAPE LOAD CASE WIND SUCTION 6000 X 6000 MM.....	239
FIGURE 4-96: DEFORMED SHAPE LOAD CASE TEMPERATURE SUMMER CG III 6000 X 6000 MM.....	239
FIGURE 4-97: BENDING MOMENT LOAD CASE WIND SUCTION 6000 X 6000 MM.....	239
FIGURE 4-98: BENDING MOMENT LOAD CASE TEMPERATURE SUMMER CG III 6000 X 6000 MM	239
FIGURE 4-99: SHEAR FORCE LOAD CASE WIND SUCTION 6000 X 6000 MM.....	240
FIGURE 4-100: SHEAR FORCE LOAD CASE TEMPERATURE SUMMER CG III 6000 X 6000 MM	240
FIGURE 4-101: INFLUENCE OF THE SANDWICH PANELS LENGTHWISE.....	240
FIGURE 4-102: OFFSET MOUNT ON EVERY SECOND LINER TRAY FLANGE 6000 X 6000 MM.....	242
FIGURE 4-103: MOUNT ON EVERY SECOND LINER TRAY FLANGE 6000 X 6000 MM.....	242
FIGURE 4-104: LOCAL UPGRADE IN PLINTH AND EAVE AREA.....	245
FIGURE 4-105: DETERMINATION OF LOCAL CONNECTION STIFFNESS FOR LIFTING LOADS (LENGTH 300 MM)	247
FIGURE 4-106: DETERMINATION OF LOCAL CONNECTION STIFFNESS FOR LIFTING LOADS (LENGTH 1000 MM)	247
FIGURE 4-107: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TENSION TESTS	248
FIGURE 4-108: TEST SETUP COMPRESSION TESTS.....	248
FIGURE 4-109: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES COMPRESSIVE TESTS.....	249
FIGURE 4-110: TRUSS MODEL SANDWICH PANEL WITH RIGID SUPPORT (SPAN 10 X 600 MM)....	250
FIGURE 4-111: TRUSS MODEL SANDWICH PANEL WITH SPRING SUPPORT $K = 0,200 \text{ kN/MM}$ (SPAN 10 X 600 MM)	250
FIGURE 4-112: SIDE ELEVATION TEST SETUP COMPRESSION TESTS	251
FIGURE 4-113: ISOMETRIC VIEW TEST SETUP COMPRESSION TESTS.....	252
FIGURE 4-114: LINER TRAY PROFILES IN TEST SETUP.....	252
FIGURE 4-115: BUILD IN OF MINERAL WOOL	252
FIGURE 4-116: SIDE ELEVATION TEST SPECIMEN	253
FIGURE 4-117: LOAD INTRODUCTION SANDWICH PANEL	253
FIGURE 4-118: HIDDEN FIXATION IN LONGITUDINAL JOINT	253
FIGURE 4-119: VISIBLE PUSH-THROUGH FIXATION IN LONGITUDINAL JOINT.....	253
FIGURE 4-120: C-PROFILE FOR CROSS-BRACING	253
FIGURE 4-121: SUSPENSION OF LINER TRAYS BLANK MARGIN	253
FIGURE 4-122: TWO ROPE TRANSDUCER IN MIDSPAN	254
FIGURE 4-123: INDUCTIVE DISPLACEMENT SENSOR AT LONGITUDINAL SANDWICH PANEL JOINT	254
FIGURE 4-124: SIDE ELEVATION TEST SETUP TENSION TESTS.....	254
FIGURE 4-125: ISOMETRIC VIEW TEST SETUP TENSION TESTS	255
FIGURE 4-126: LOAD-DISPLACEMENT-CURVE COMPRESSIVE TEST	256
FIGURE 4-127: PUSH IN OF THE SMALL FLANGE AND WEB BUCKLING	256

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 4-128: BUCKLING OF THE WIDE FLANGE	256
FIGURE 4-129: AREA OF LINER TRAY FAILURE	257
FIGURE 4-130: TEST SPECIMEN AT THE END OF THE TEST	257
FIGURE 4-131: DESIGNATIONS OF INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS.....	257
FIGURE 4-132: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS OF A SAMPLE TEST	257
FIGURE 4-133: COMMON LONGITUDINAL EDGE PROFILING WITH SMOOTH SEALING TAPE	258
FIGURE 4-134: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TEST SERIES 1	258
FIGURE 4-135: DENTING OF THE SMALL FLANGE DUE TO FAULTY INSTALLATION	259
FIGURE 4-136: PLACE OF FAILURE TEST SERIES 2	260
FIGURE 4-137: PUSH IN OF THE SMALL FLANGE AND WEB BUCKLING TEST SERIES 2.....	260
FIGURE 4-138: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS OF A SAMPLE TEST	260
FIGURE 4-139: LONGITUDINAL JOINT WA3 NOT ENCLOSED AT THE END OF THE TEST	260
FIGURE 4-140: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TEST SERIES 2	260
FIGURE 4-141: TEST SPECIMEN WITHOUT MINERAL WOOL AT $\frac{3}{4} F_{MAX}$	262
FIGURE 4-142: TEST SPECIMEN WITH RIGID MINERAL WOOL	262
FIGURE 4-143: TEST SETUP WITH MIDSPAN LONGITUDINAL JOINT	262
FIGURE 4-144: PLACE OF FAILURE TEST SERIES 4	263
FIGURE 4-145: PUSH IN OF THE SMALL FLANGE AND WEB BUCKLING TEST SERIES 4.....	263
FIGURE 4-146: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TEST SERIES 1 AND 4	263
FIGURE 4-147: LONGITUDINAL EDGE WITHOUT SEALING TAPE.....	264
FIGURE 4-148: KEYED CONNECTION LONGITUDINAL EDGE SANDWICH PANEL	264
FIGURE 4-149: DESIGNATIONS OF INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS.....	264
FIGURE 4-150: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS OF A SAMPLE TEST WITH HIDDEN FIXATION	264
FIGURE 4-151: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS OF A SAMPLE TEXT WITH VISIBLE FIXATION	265
FIGURE 4-152: COMPRESSION FAILURE LONGITUDINAL JOINT VISIBLE FIXATION AT THE END OF THE TEST	265
FIGURE 4-153: AREA OF LINER TRAY FAILURE	266
FIGURE 4-154: INSIDE VIEW TEST SPECIMEN AT THE END OF THE TEST	266
FIGURE 4-155: DESIGNATIONS OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS FOR TENSION TESTS.....	266
FIGURE 4-156: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS OF A SAMPLE TEST	266
FIGURE 4-157: GAPING LONGITUDINAL JOINT	267
FIGURE 4-158: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TEST SERIES 6	267
FIGURE 4-159: PLACE OF FAILURE TEST SERIES 8	269
FIGURE 4-160: PUSH IN OF THE SMALL FLANGE AND WEB BUCKLING TEST SERIES 8.....	269
FIGURE 4-161: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TEST SERIES 8	269
FIGURE 4-162: AGGLUTINATED LONGITUDINAL JOINT AFTER THE END OF THE TEST	270
FIGURE 4-163: LONGITUDINAL SANDWICH PANEL JOINT WITH COVER PLATE	270
FIGURE 4-164: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TENSION TESTS WITH AGGLUTINATED LONGITUDINAL JOINTS.....	270

FIGURE 4-165: : DESIGNATIONS OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS FOR TENSION TESTS.....	271
FIGURE 4-166: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS	271
FIGURE 4-167: FAILURE OF LINER TRAY PROFILES BELOW MIDSPAN LONGITUDINAL JOINT	271
FIGURE 4-168: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF THE INDUCTIVE DISPLACEMENT TRANSDUCERS TEST WITH COVER PLATES.....	272
FIGURE 4-169: FAILURE OF LINER TRAY PROFILES BELOW MIDSPAN LONGITUDINAL JOINT TEST WITH COVER PLATES	272
FIGURE 4-170: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES TENSION TESTS WITH AGGLUTINATED AND COVER PLATED LONGITUDINAL JOINTS	272
FIGURE 4-171: “HYBRID REFURBISHMENT” OF A LINER TRAY FAÇADE WITH HORIZONTAL MOUNTED SANDWICH PANELS.....	274
FIGURE 4-172: SIDE ELEVATION HYBRID-SECTION WITH HORIZONTALLY MOUNTED SANDWICH PANELS	275
FIGURE 4-173: STRAIN GAUGE AT SMALL LINER TRAY FLANGE	275
FIGURE 4-174: LOCATION OF STRAIN GAUGES AT MIDSPAN.....	275
FIGURE 4-175: ASSEMBLY PILASTER STRIP PROFILES QHP 40 x 4 MM	276
FIGURE 4-176: ELEVATION PILASTER STRIP PROFILE	276
FIGURE 4-177: BUCKLING OF LINER TRAY PROFILES	276
FIGURE 4-178: WRINKLING AT THE INNER FACE LAYER	276
FIGURE 4-179: LOCAL DEFORMATIONS AND DELAMINATION OF THE INNER FACE LAYER	277
FIGURE 4-180: ASSEMBLY OF C-PROFILES	277
FIGURE 4-181: TEST SPECIMEN AFTER THE END OF THE TEST	277
FIGURE 4-182: FASTENER PULLING OUT OF THE SMALL LINER TRAY FLANGE	277
FIGURE 4-183: ELEVATION MOUNTING OF HAT PROFILE	278
FIGURE 4-184: HAT PROFILE DURING MOUNTING	278
FIGURE 4-185: TEST SPECIMEN AFTER THE END OF THE TEST	278
FIGURE 4-186: WRINKLING AT THE INNER FACE LAYER	278
FIGURE 4-187: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES DIFFERENT PILASTER STRIP PROFILES	279
FIGURE 4-188: VISIBLE SCREW HEADS	280
FIGURE 4-189: SANDWICH PANEL FIXATION TEST SERIES 2	280
FIGURE 4-190: PILASTER STRIP PROFILES WITH REDUCED LONGITUDINAL DISTANCE	281
FIGURE 4-191: SANDWICH PANEL FIXATION TEST SERIES 3	281
FIGURE 4-192: TEST SPECIMEN PRIOR TO THE COMMENCEMENT OF THE TEST	282
FIGURE 4-193: WRINKLING OF THE INNER FACE LAYER.....	282
FIGURE 4-194: SHEAR FORCE FAILURE AT BEARING AREA.....	283
FIGURE 4-195: REINFORCEMENT OF LINER TRAY PROFILES AT BEARING AREA	283
FIGURE 4-196: WRINKLING OF OUTER FACE LAYER.....	283
FIGURE 4-197: LINER TRAY PROFILES FAILURE	283
FIGURE 4-198: TEST SPECIMEN PRIOR TO THE COMMENCEMENT OF THE TEST	284
FIGURE 4-199: WRINKLING OF THE OUTER FACE LAYER.....	284
FIGURE 4-200: LOAD-DISPLACEMENT-CURVES OF STRAIN GAUGES.....	285
FIGURE 4-201: SET-UP OF STRAIN GAUGES AND ELONGATION AT POINT T.....	285
FIGURE 4-202: SCHEMATIC FIGURE HOOK JOINT (VERTICAL SECTION)	286
FIGURE 4-203: SCHEMATIC FIGURE HOOK JOINT (HORIZONTAL SECTION).....	286

Verzeichnisse

Lists

FIGURE 4-204: LINER TRAY WEB UNDER VERTICAL LOAD [89].....	287
FIGURE 4-205: STRESS Σ_z RESULTING FROM DEAD LOAD WITH FIXED SUPPORT OF WEBS [89]..	288
FIGURE 4-206: STRESS Σ_z RESULTING FROM DEAD LOAD FOR 100 MM LINER TRAY SECTION [89]	288
FIGURE 4-207: INFLUENCE OF VERTICAL LOADS ON WEB INCLINATION [89]	289
FIGURE 4-208: INFLUENCE OF VERTICAL LOADS ON WEB INCLINATION [89]	289
FIGURE 4-209: ADDITIONAL SUBSTRUCTURE FOR OUTER SHELL MOUNTING	290
FIGURE 4-210: HAT PROFILE DISPOSED BETWEEN LINER TRAY WEBS [88].....	291
FIGURE 4-211: HAT PROFILE WITH INCREASED HEIGHT [88].....	291
FIGURE 4-212: C-PROFILE DISPOSED BETWEEN LINER TRAY WEBS [88]	291
FIGURE 4-213: Z-PROFILE DISPOSED BETWEEN LINER TRAY WEBS [88]	291
FIGURE 4-214: C-PROFILE DISPOSED BETWEEN LINER TRAY WEBS [88]	292
FIGURE 4-215: Z-PROFILE DISPOSED BETWEEN LINER TRAY WEBS [88]	292
FIGURE 4-216: Z-PROFILE DISPOSED OUTSIDE OF SMALL LINER TRAY FLANGE [88].....	292
FIGURE 4-217: Z-PROFILE DISPOSED OUTSIDE OF SMALL LINER TRAY FLANGE [88].....	292
FIGURE 4-218: COMPARISON OF GROSS AND NET SECTIONS [88].....	293
FIGURE 4-219: DEFORMATION PLOT LINER TRAY PROFILE REINFORCED WITH HAT PROFILE [88]	294
FIGURE 4-220: PARAMETRIC STUDY SHEET THICKNESS HAT PROFILE [88]	294
FIGURE 4-221: MOUNTING OF LINER TRAYS.....	294
FIGURE 4-222: DIFFERENT MINERAL WOOL INSULATION.....	294
FIGURE 4-223: DETAIL OF FAÇADE BEFORE (RIGHT) AND AFTER (LEFT) DISASSEMBLY OF TRAPEZOIDAL OUTER SHELL	295
FIGURE 4-224: VERTICAL INSTALLATION OF SANDWICH PANELS	296
FIGURE 4-225: FIXATION AT LINER TRAY PROFILES.....	296
FIGURE 4-226: FIXATION AT LINER TRAY PROFILES.....	296
FIGURE 4-227: FIXATION AT PLINTH	297
FIGURE 4-228: FIXATION AT PLINTH	297
FIGURE 4-229: FAÇADE BEFORE (RIGHT) AND AFTER REFURBISHMENT (LEFT)	297
FIGURE 4-230: HALL COMPLEX AFTER REFURBISHMENT	297
FIGURE 4-231: PROFILE LINER TRAY FAÇADE AT BEGINNING OF REFURBISHMENT	298
FIGURE 4-232: PROFILE LINER TRAY FAÇADE AT BEGINNING OF REFURBISHMENT	298
FIGURE 4-233: CONSTRUCTION DETAIL EAVE	298
FIGURE 4-234: CONSTRUCTION DETAIL PLINTH.....	299
FIGURE 4-235: MOUNTING OF SANDWICH PANELS.....	299
FIGURE 4-236: DETAIL EAVE SUBSTRUCTURE FOR MOUNTING SANDWICH PANELS.....	299
FIGURE 4-237: DETAIL ROOF DRAINAGE	300
FIGURE 4-238: ROOF AFTER REFURBISHMENT	300
FIGURE 4-239: INDUSTRIAL APPLICATION OF SANDWICH PANELS.....	302
FIGURE 4-240: SOLID FAÇADE RENOVATION WITH TRAPEZOIDAL PROFILE.....	303
FIGURE 4-241: SOLID FAÇADE RENOVATION WITH CLADDING PROFILES	304
FIGURE 4-242: CLADDING PROFILES	304
FIGURE 4-243: PRODUCT SAMPLE REAR-VENTILATED FAÇADE [96]	305
FIGURE 4-244: SOLID FAÇADE RENOVATION WITH SANDWICH PANELS	306
FIGURE 4-245: HAT PROFILE ASSEMBLY.....	307
FIGURE 4-246: SANDWICH PANEL ASSEMBLY.....	307

FIGURE 4-247: SOLID FAÇADE AFTER RENOVATION WITH SANDWICH PANELS	307
FIGURE 4-248: TRAPEZOIDAL PROFILE MOUNTED IN POSITIVE POSITION	310
FIGURE 4-249: TRAPEZOIDAL PROFILE MOUNTED IN NEGATIVE POSITION	310
FIGURE 4-250: SANDWICH PANEL WITH HIGHLY PROFILED OUTER FACE LAYER	311
FIGURE 4-251: SKETCH: REFURBISHMENT SOLID ROOF WITH SANDWICH PANEL [97].....	313
FIGURE 4-252: SKETCH: REFURBISHMENT SOLID ROOF WITH STANDING SEAM PROFILES [97]..	313
FIGURE 4-253: SKETCH: SANDWICH PANEL MOUNTED ON SANDWICH PANEL [97].....	314
FIGURE 4-254: SKETCH: SANDWICH PANEL ROOF WITH ADDITIONAL INSULATION AND TRAPEZOIDAL OUTER SHELL	315
FIGURE 4-255: SKETCH: INSULATION ADD-ON SINGLE-LAYER TRAPEZOIDAL ROOF.....	315
FIGURE 4-256: SKETCH: INSULATION ADD-ON DOUBLE-LAYER TRAPEZOIDAL ROOF	315
FIGURE 4-257: SKETCH: REFURBISHMENT OF TRAPEZOIDAL ROOF WITH STANDING SEAM PROFILE OUTER SHELL	316
FIGURE 4-258: REFURBISHMENT OF TRAPEZOIDAL ROOF WITH SANDWICH PANEL.....	317
FIGURE 4-259: GEOMETRY “HALL A”	319
FIGURE 4-260: UNINSULATED TRAPEZOIDAL ROOF	319
FIGURE 4-261: SINGLE-LAYER TRAPEZOIDAL ROOF	319
FIGURE 4-262: DOUBLE-LAYER TRAPEZOIDAL ROOF	319

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1-1: PAUSCHALWERTE DER WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN NICHT NACHTRÄGLICH GEDÄMMTER BAUTEILE IM URZUSTAND [6]	3
TABELLE 2-1: BESTANDS- UND SANIERUNGSKOMBINATIONEN	19
TABELLE 2-2: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN VON BESTANDSAUßENWÄNDEN IN MASSIVER BAUWEISE	22
TABELLE 2-3: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN VON BESTANDSAUßENWÄNDEN AUS KASSETTENELEMENTEN	26
TABELLE 2-4: EINFLUSSFAKTOREN BEI HYGROTHERMISCHEN UNTERSUCHUNGEN	30
TABELLE 2-5: NORMEN UND EINFLUSSFAKTOREN BEI HYGROTHERMISCHEN UNTERSUCHUNGEN	31
TABELLE 2-6: HYGROTHERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI MASSIVBAUWÄNDEN	39
TABELLE 2-7: HYGROTHERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI KASSETTENELEMENTEN	45
TABELLE 2-8: HYGROTHERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI SANDWICHELEMENTEN	48
TABELLE 2-9: BERECHNETE WASSERDAMPFDIFFUSIONSSTROMDICHTEN BEI SANDWICHELEMENTEN	50
TABELLE 2-10: BERECHNETE TAUWASSERMASSEN BEI SANDWICHELEMENTEN	50
TABELLE 2-11: MATERIALEIGENSCHAFTEN FÜR STATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3.....	55
TABELLE 2-12: MATERIALEIGENSCHAFTEN FÜR INSTATIONÄR ERWEITERTES VERFAHREN NACH DIN 4108-3.....	57
TABELLE 2-13: UNTERSCHIEDLICHE MATERIALEIGENSCHAFTEN DER EINZELNEN SCHICHTEN EINES SANDWICHELEMENTES [51].....	73
TABELLE 2-14: TYPISCHE ABMESSUNGEN UND DATEN VON STAHLKASSETTENPROFILEN	76
TABELLE 2-15: LASTANNAHMEN FÜR FASSADE UND DACH	85
TABELLE 3-1: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN ($T_{N,KAS} = 0,75$ MM).....	90
TABELLE 3-2: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN ($T_{N,KAS} = 1,50$ MM).....	91
TABELLE 3-3: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES HYBRIDELEMENTS – TEMPERATURERGEBNISSE	95
TABELLE 3-4: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES HYBRIDELEMENTS – NUMERISCHE VERGLEICHSERGEBNISSE	96
TABELLE 3-5: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT Ω -PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN	98
TABELLE 3-6: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT Z-PROFIL SANIERTEN KASSETTENWÄNDEN	99
TABELLE 3-7: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHWÄNDEN (MF-BESTAND).....	102
TABELLE 3-8: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHWÄNDEN (PU-BESTAND)	103

TABELLE 3-9: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN BETONWÄNDEN	105
TABELLE 3-10: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN PORENBETONWÄNDEN.....	105
TABELLE 3-11: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN MAUERWERKSWÄNDEN.....	106
TABELLE 3-12: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT MODULAREN STAHLKONSTRUKTIONEN SANIERTEN BETONWÄNDEN	108
TABELLE 3-13: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT MODULAREN STAHLKONSTRUKTIONEN SANIERTEN PORENBETONWÄNDEN.....	109
TABELLE 3-14: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT MODULAREN STAHLKONSTRUKTIONEN SANIERTEN MAUERWERKSWÄNDEN.....	110
TABELLE 3-15: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHDÄCHERN (PU-BESTAND)	113
TABELLE 3-16: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICHDÄCHERN (MW-BESTAND)	114
TABELLE 3-17: HYGROTHERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI HYBRIDELEMENTEN	118
TABELLE 3-18: MATERIALEIGENSCHAFTEN FÜR HYBRIDELEMENTVERSUCHE.....	126
TABELLE 3-19: HYGROTHERMISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN BEI SANIERUNG VON SANDWICHWAND MIT SANDWICHELEMENT	135
TABELLE 3-20: HYGRISCH ERFORDERLICHE SANDWICHDICKE BEI MIT SANDWICH SANIERTEN SANDWICH.....	140
TABELLE 3-21: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – VERSUCHSERGEBNISSE.....	147
TABELLE 3-22: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – NUMERISCHE ERGEBNISSE	148
TABELLE 3-23: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – WEITERE NUMERISCHE ERGEBNISSE (1).....	149
TABELLE 3-24: LASTFALL TEMPERATUR BEIM HYBRIDELEMENT – WEITERE NUMERISCHE ERGEBNISSE (2).....	150
TABELLE 3-25: BANDBREITE DER ABMESSUNGEN DER MUSTERHALLEN	152
TABELLE 3-26: PARAMETRISCHE HÜLLFLÄCHEN DER MUSTERHALLE	152
TABELLE 3-27: ABMESSUNGEN DER TYPENHALLEN.....	152
TABELLE 3-28: WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN DER MUSTERHALLE	153
TABELLE 4-1: ÜBERSICHT DER NORMAUSGABEN ZUR BESTIMMUNG DER WINDLAST	158
TABELLE 4-2: ÜBERSICHT DER NORMAUSGABEN ZUR BESTIMMUNG DER SCHNEELAST (BRD)	158
TABELLE 4-3: ÜBERSICHT DER NORMAUSGABEN DER DDR.....	158
TABELLE 4-4: STAUDRUCK Q NACH [59]	159
TABELLE 4-5: GESCHWINDIGKEITSDRÜCKE DER WINDLASTZONEN [56].....	161
TABELLE 4-6: GESCHWINDIGKEITSDRÜCKE DER WINDLASTZONEN NACH [57]	163
TABELLE 4-7: STAUDRUCK Q_0 NACH [72].....	165
TABELLE 4-8: GRENZLASTFAKTOR N [72]	165
TABELLE 4-9: AERODYNAMISCHE BEIWERTE C UND C_s [73].....	166
TABELLE 4-10: ABMINDERUNGSFAKTOR Ω FÜR GEBÄUDE IN GESCHÜTZTER LAGE [75]	167
TABELLE 4-11: UMRECHNUNGSFAKTOR Ω_{1938}	185
TABELLE 4-12: UMRECHNUNGSFAKTOR Ω_{1986}	186
TABELLE 4-13: KORREKTURFAKTOR Ω_H	186

Verzeichnisse

Lists

TABELLE 4-14: KORREKTURFAKTOR Ω_{wz}	187
TABELLE 4-15: SCHNEELAST S NACH [59]	188
TABELLE 4-16: REGELSCHNEELAST S_0 NACH [63]	189
TABELLE 4-17: FORMBEIWERTE μ_i IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DACHNEIGUNG α NACH [71] ..	191
TABELLE 4-18: SCHNEELAST S_0 NACH [72]	192
TABELLE 4-19: BEIWERTE C NACH [72].....	192
TABELLE 4-20: SCHNEELAST S_0 NACH [73]	192
TABELLE 4-21: SCHNEELAST S_0 NACH [74]	193
TABELLE 4-22: IN [77] BETRACHTETE NORMAUSGABEN.....	202
TABELLE 4-23: ZULÄSSIGE ABWEICHUNGEN SANDWICHELEMENTFASSADE [77].....	205
TABELLE 4-24: ZULÄSSIGE ABWEICHUNGEN KASSETTENPROFILFASSADE [77]	206
TABELLE 4-25: ZULÄSSIGE ABWEICHUNGEN SICHTBETONFASSADE [77].....	207
TABELLE 4-26: ZULÄSSIGE ABWEICHUNGEN PORENBETONFASSADE [77].....	207
TABELLE 4-27: ZULÄSSIGE ABWEICHUNGEN MAUERWERKFASSADE [77]	208
TABELLE 4-28: MABABWEICHUNGEN GEBÄUDE MIT MASSIVER FASSADE [77]	210
TABELLE 4-29: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE SÜDWEST [77].....	211
TABELLE 4-30: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE NORDOST [77].....	211
TABELLE 4-31: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE NORDWEST [77].....	212
TABELLE 4-32: MABABWEICHUNGEN GEBÄUDE MIT SANDWICHELEMENT-FASSADE [77]	214
TABELLE 4-33: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE OST [77]	215
TABELLE 4-34: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE SÜD ABSCHNITT 1 [77]	215
TABELLE 4-35: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE SÜD ABSCHNITT 2 [77]	216
TABELLE 4-36: EBENHEITSABWEICHUNGEN FASSADE WEST [77].....	217
TABELLE 4-37: OBERFLÄCHENTEMPERATUR FÜR DIE ÄUßERE DECKSCHICHT [29].....	230
TABELLE 4-38: VERGLEICH VON FLÄCHENTRÄGHEITSMOMENTEN	232
TABELLE 4-39: LASTFALLKOMBINATIONEN STABWERKSMODELL	238
TABELLE 4-40: RELATIVE VERÄNDERUNG INFOLGE ZUSÄTZLICHER TEMPERATURBEANSPRUCHUNG FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM	241
TABELLE 4-41: FÜR NACHWEIS MABGEBENDE VERÄNDERUNG INFOLGE ZUSÄTZLICHER TEMPERATURBEANSPRUCHUNG FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM	241
TABELLE 4-42: RELATIVE VERÄNDERUNG VERSETZTE BEFESTIGUNG DER SANDWICHELEMENTE AN JEDEM ZWEITEN KASSETTENGURT FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	242
TABELLE 4-43: FÜR STATISCHEN NACHWEIS MABGEBENDE VERÄNDERUNG DURCH VERSETZT ANGEORDNETE BEFESTIGUNG FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	243
TABELLE 4-44: RELATIVE VERÄNDERUNG VERSETZTE BEFESTIGUNG DER SANDWICHELEMENTE AN JEDEM ZWEITEN KASSETTENGURT FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	243
TABELLE 4-45: FÜR STATISCHEN NACHWEIS MABGEBENDE VERÄNDERUNG DURCH BEFESTIGUNG AN JEDEM ZWEITEN KASSETTENGURT FASSADENABSCHNITT 6000 x 6000 MM.....	244
TABELLE 4-46: RELATIVE VERÄNDERUNG INFOLGE ZUSÄTZLICHER TEMPERATURBEANSPRUCHUNG FASSADENABSCHNITT 4000 x 4200 MM	244
TABELLE 4-47: FÜR NACHWEIS MABGEBENDE VERÄNDERUNG INFOLGE ZUSÄTZLICHER TEMPERATURBEANSPRUCHUNG FASSADENABSCHNITT 4000 x 4200 MM	245
TABELLE 4-48: RELATIVE VERÄNDERUNG INFOLGE LOKALER ERTÜCHTIGUNG IN SOCKEL- UND TRAUFBEREICH	246
TABELLE 4-49: RELATIVE VERÄNDERUNG INFOLGE ZUSÄTZLICHEM LASTFALL TEMPERATURDIFFERENZ	246

TABELLE 4-50: REDUKTION DER AUFTRETENDEN ZWANGSKRÄFTE	249
TABELLE 4-51: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 1	259
TABELLE 4-52: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 2	261
TABELLE 4-53: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 3	262
TABELLE 4-54: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 4	263
TABELLE 4-55: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 5	265
TABELLE 4-56: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 6	267
TABELLE 4-57: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 7	268
TABELLE 4-58: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 8	269
TABELLE 4-59: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 9	273
TABELLE 4-60: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 1	279
TABELLE 4-61: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 2	280
TABELLE 4-62: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 3	281
TABELLE 4-63: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 4	282
TABELLE 4-64: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 5	283
TABELLE 4-65: VERSUCHSERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 6	284
TABELLE 4-66: AUSZUGTRAGFÄHIGKEIT ÜBLICHER KUNSTSTOFFDÜBEL	301
TABELLE 4-67: ZU ERWARTENDE TOLERANZEN MASSIVER FASSADEN	303
TABELLE 4-68: VOR- UND NACHTEILE EINER SANIERUNG MIT TRAPEZ- UND WELLPROFILIEN	303
TABELLE 4-69: VOR- UND NACHTEILE EINER SANIERUNG MIT GESTALTERISCH OPTIMIERTEN FASSADENPROFILIEN	304
TABELLE 4-70: VOR- UND NACHTEILE EINER SANIERUNG MIT MODULAREN VHF-SYSTEMEN	305
TABELLE 4-71: MÖGLICHE SANIERUNGSMABNAHMEN IN STAHLLEICHTBAUWEISE	318
TABELLE 4-72: EIGENGEWICHT KONSTRUKTIONSBAUTEILE TRAPEZDACH	320
TABELLE 4-73: VERÄNDERLICHE LASTEN BEISPIELHALLE	321
TABELLE 4-74: AUSNUTZUNGSGRAD STATISCHER NACHWEIS 1987	321
TABELLE 4-75: AUSNUTZUNGSGRAD STATISCHER NACHWEIS 2017	322

List of tables

TABLE 1-1: FLAT-RATE VALUES OF THERMAL TRANSMITTANCES OF NOT BELATEDLY INSULATED CONSTRUCTION ELEMENTS IN PRIMARY STATE [6].....	3
TABLE 2-1: COMBINATIONS OF STOCK AND REFURBISHMENT	19
TABLE 2-2: THERMAL TRANSMITTANCES OF EXISTING EXTERIOR WALLS IN MASSIVE CONSTRUCTION TYPE.....	22
TABLE 2-3: THERMAL TRANSMITTANCES OF EXISTING EXTERIOR WALLS MADE OF LINER TRAY ELEMENTS	26
TABLE 2-4: INFLUENCING FACTORS FOR HYGROTHERMAL INVESTIGATIONS	30
TABLE 2-5: STANDARDS AND INFLUENCING FACTORS FOR HYGROTHERMAL INVESTIGATIONS...	31
TABLE 2-6: HYGROTHERMAL MATERIAL PROPERTIES FOR MASSIVE WALLS	39
TABLE 2-7: HYGROTHERMAL MATERIAL PROPERTIES FOR LINER TRAY ELEMENTS.....	45
TABLE 2-8: HYGROTHERMAL MATERIAL PROPERTIES FOR SANDWICH PANELS.....	48
TABLE 2-9: CALCULATED DENSITY OF WATER VAPOUR FLOW RATE FOR SANDWICH PANELS	50
TABLE 2-10: CALCULATED DEWING WATER AMOUNT FOR SANDWICH PANELS.....	50
TABLE 2-11: MATERIAL PROPERTIES FOR STATIONARY EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	55
TABLE 2-12: MATERIAL PROPERTIES FOR TRANSIENT EXPANDED METHOD ACCORDING TO DIN 4108-3.....	57
TABLE 2-13: DIFFERENT MATERIAL PROPERTIES OF THE INDIVIDUAL LAYERS OF A SANDWICH ELEMENT [51].....	73
TABLE 2-14: TYPICAL LINER TRAY DIMENSIONS AND DATA	76
TABLE 2-15: DESIGN LOADS FOR FAÇADE AND ROOF	85
TABLE 3-1: THERMAL TRANSMITTANCE FOR LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS ($T_{N,CAS} = 0,75$ MM).....	90
TABLE 3-2: THERMAL TRANSMITTANCE FOR LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS ($T_{N,CAS} = 1,50$ MM).....	91
TABLE 3-3: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HYBRID ELEMENT – TEMPERATURE RESULTS	95
TABLE 3-4: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HYBRID ELEMENT – NUMERICAL COMPARISON RESULTS.....	96
TABLE 3-5: THERMAL TRANSMITTANCE FOR LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH Ω PROFILE	98
TABLE 3-6: THERMAL TRANSMITTANCE FOR LINER TRAY ELEMENTS REFURBISHED WITH Z PROFILE	99
TABLE 3-7: THERMAL TRANSMITTANCE FOR SANDWICH WALL PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (MF STOCK).....	102
TABLE 3-8: THERMAL TRANSMITTANCE FOR SANDWICH WALL PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (PU STOCK)	103
TABLE 3-9: THERMAL TRANSMITTANCE FOR CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS.....	105

TABLE 3-10: THERMAL TRANSMITTANCE FOR GAS CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	105
TABLE 3-11: THERMAL TRANSMITTANCE FOR MASONRY WALLS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS	106
TABLE 3-12: THERMAL TRANSMITTANCE FOR CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH MODULAR STEEL CONSTRUCTIONS.....	108
TABLE 3-13: THERMAL TRANSMITTANCE FOR GAS CONCRETE WALLS REFURBISHED WITH MODULAR STEEL CONSTRUCTIONS.....	109
TABLE 3-14: THERMAL TRANSMITTANCE FOR MASONRY WALLS REFURBISHED WITH MODULAR STEEL CONSTRUCTIONS.....	110
TABLE 3-15: THERMAL TRANSMITTANCE FOR SANDWICH ROOF PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (PU STOCK).....	113
TABLE 3-16: THERMAL TRANSMITTANCE FOR SANDWICH ROOF PANELS REFURBISHED WITH SANDWICH PANELS (MW STOCK)	114
TABLE 3-17: HYGROTHERMAL MATERIAL PROPERTIES FOR HYBRID ELEMENTS	118
TABLE 3-18: MATERIAL PROPERTIES FOR HYBRID ELEMENT TESTING	126
TABLE 3-19: HYROTHERMAL MATERIAL PROPERTIES FOR REFURBISHMENT OF SANDWICH WALL PANELS WITH SANDWICH PANELS	135
TABLE 3-20: HYGRIC REQUIRED SANDWICH THICKNESS FÜR SANDWICH PANEL REFURBISHED WITH SANDWICH PANEL	140
TABLE 3-21: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT –TEST RESULTS	147
TABLE 3-22: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – NUMERIC RESULTS	148
TABLE 3-23: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – FURTHER NUMERIC RESULTS (1)	149
TABLE 3-24: LOAD CASE TEMPERATURE FOR HYBRID ELEMENT – FURTHER NUMERIC RESULTS (2)	150
TABLE 3-25: SCOPE OF DIMENSIONS OF THE SAMPLE HALLS.....	152
TABLE 3-26: PARAMETRIC ENVELOPE AREAS OF THE SAMPLE HALLS	152
TABLE 3-27: DIMENSIONS OF THE TYPE HALLS.....	152
TABLE 3-28: THERMAL TRANSMITTANCES OF THE SAMPLE HALLS	153
TABLE 4-1: OVERVIEW OF STANDARD ISSUES FOR WIND LOAD DETERMINATION.....	158
TABLE 4-2: OVERVIEW OF STANDARD ISSUES FOR SNOW LOAD DETERMINATION (FRG).....	158
TABLE 4-3: OVERVIEW OF DDR STANDARD ISSUES	158
TABLE 4-4: DYNAMIC PRESSURE Q ACCORDING TO [59].....	159
TABLE 4-5: DYNAMIC PRESSURES OF WIND LOAD ZONE [56].....	161
TABLE 4-6: DYNAMIC PRESSURES OF WIND LOAD ZONE ACCORDING TO [57]	163
TABLE 4-7: DYNAMIC PRESSURE Q_0 ACCORDING TO [72].....	165
TABLE 4-8: ULTIMATE LOAD FACTOR N [72]	165
TABLE 4-9: AERODYNAMIC FACTORS C UND C_s [73].....	166
TABLE 4-10: FACTOR Ω FOR BUILDINGS IN PROTECTED AREAS [75].....	167
TABLE 4-11: FACTOR Ω_{1938}	185
TABLE 4-12: FACTOR Ω_{1986}	186
TABLE 4-13: CORRECTION FACTOR Ω_H	186
TABLE 4-14: CORRECTION FACTOR Ω_{wz}	187
TABLE 4-15: SNOW LOAD S ACCORDING TO [59].....	188
TABLE 4-16: USUALLY SNOW LOAD S_0 ACCORDING TO [63]	189

Verzeichnisse

Lists

TABLE 4-17: CORRECTION FACTOR μ_i DEPENDING ON ROOF PITCH α ACCORDING TO [71].....	191
TABLE 4-18: SNOW LOAD S_0 ACCORDING TO [72].....	192
TABLE 4-19: FACTOR C ACCORDING TO [72]	192
TABLE 4-20: SNOW LOAD S_0 ACCORDING TO [72].....	192
TABLE 4-21: SNOW LOAD S_0 ACCORDING TO [74].....	193
TABLE 4-22: IN [77] CONSIDERED STANDARD ISSUES.....	202
TABLE 4-23: ADMISSIBLE DEVIATION SANDWICH PANEL FAÇADE [77].....	205
TABLE 4-24: ADMISSIBLE DEVIATION LINER TRAY FAÇADE [77].....	206
TABLE 4-25: ADMISSIBLE DEVIATION EXPOSED CONCRETE FAÇADE [77].....	207
TABLE 4-26: ADMISSIBLE DEVIATION CELLULAR CONCRETE FAÇADE [77].....	207
TABLE 4-27: ADMISSIBLE DEVIATION BRICKWORK FAÇADE [77]	208
TABLE 4-28: OFFSIZE EXAMPLE BUILDING WITH SOLID FAÇADE [77]	210
TABLE 4-29: FLATNESS OFFSET FAÇADE SOUTHWEST [77].....	211
TABLE 4-30: FLATNESS OFFSET FAÇADE NORTHEAST [77]	211
TABLE 4-31: FLATNESS OFFSET FAÇADE NORTHWEST [77].....	212
TABLE 4-32: OFFSIZE EXAMPLE BUILDING WITH SANDWICH PANEL FAÇADE [77]	214
TABLE 4-33: FLATNESS OFFSET FAÇADE EAST [77]	215
TABLE 4-34: FLATNESS OFFSET FAÇADE SOUTH SECTION 1 [77].....	215
TABLE 4-35: FLATNESS OFFSET FAÇADE SOUTH SECTION 2 [77].....	216
TABLE 4-36: FLATNESS OFFSET FAÇADE SOUTH WEST [77]	217
TABLE 4-37: SURFACE TEMPERATURE OUTSIDE COVER SHEET [29].....	230
TABLE 4-38: COMPARISON OF AREA MOMENTS OF INERTIA.....	232
TABLE 4-39: LOAD COMBINATION FRAMEWORK MODEL	238
TABLE 4-40: RELATIVE CHANGE DUE TO ADDITIONAL LOAD CASE TEMPERATURE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM	241
TABLE 4-41: DECISIVE VALUE CHANGE DUE TO ADDITIONAL LOAD CASE TEMPERATURE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM	241
TABLE 4-42: RELATIVE CHANGE OFFSET SANDWICH PANEL MOUNT ON EVERY SECOND LINER TRAY FLANGE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM	242
TABLE 4-43: RELATIVE CHANGE DUE TO OFFSET MOUNT ON EVERY SECOND LINER TRAY FLANGE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM.....	243
TABLE 4-44: : RELATIVE CHANGE SANDWICH PANEL MOUNT ON EVERY SECOND LINER TRAY FLANGE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM.....	243
TABLE 4-45: RELATIVE CHANGE DUE TO OFFSET MOUNT ON EVERY SECOND LINER TRAY FLANGE FAÇADE SECTION 6000 X 6000 MM.....	244
TABLE 4-46: RELATIVE CHANGE DUE TO ADDITIONAL LOAD CASE TEMPERATURE FAÇADE SECTION 4000 X 4200 MM	244
TABLE 4-47: DECISIVE VALUE CHANGE DUE TO ADDITIONAL LOAD CASE TEMPERATURE FAÇADE SECTION 4000 X 4200 MM	245
TABLE 4-48: RELATIVE CHANGE DUE LOCAL UPGRADE IN PLINTH AND EAVE AREA	246
TABLE 4-49: RELATIVE CHANGE DUE ADDITIONAL LOAD CASE TEMPERATURE DIFFERENCE	246
TABLE 4-50: REDUCTION OF CONSTRAINING FORCES	249
TABLE 4-51: TEST RESULTS TEST SERIES 1	259
TABLE 4-52: TEST RESULTS TEST SERIES 2	261
TABLE 4-53: TEST RESULTS TEST SERIES 3	262
TABLE 4-54: TEST RESULTS TEST SERIES 4	263

TABLE 4-55: TEST RESULTS TEST SERIES 5	265
TABLE 4-56: TEST RESULTS TEST SERIES 6	267
TABLE 4-57: TEST RESULTS TEST SERIES 7	268
TABLE 4-58: TEST RESULTS TEST SERIES 8	269
TABLE 4-59: TEST RESULTS TEST SERIES 9	273
TABLE 4-60: TEST RESULTS TEST SERIES 1	279
TABLE 4-61: TEST RESULTS TEST SERIES 2	280
TABLE 4-62: TEST RESULTS TEST SERIES 3	281
TABLE 4-63: TEST RESULTS TEST SERIES 4	282
TABLE 4-64: TEST RESULTS TEST SERIES 5	283
TABLE 4-65: TEST RESULTS TEST SERIES 6	284
TABLE 4-66: EXTRACTION LOAD CAPACITY OF USUAL PLASTIC ANCHORS.....	301
TABLE 4-67: EXPECTED TOLERANCES ON SOLID FAÇADES.....	303
TABLE 4-68: PROS AND CONS OF RENOVATION WITH TRAPEZOIDAL AND CORRUGATED SHEETS	303
TABLE 4-69: PROS AND CONS OF RENOVATION WITH VISUALLY OPTIMIZED FAÇADE PROFILES	304
TABLE 4-70: PROS AND CONS OF RENOVATION WITH MODULAR REAR-VENTILATED FAÇADES.	305
TABLE 4-71: POSSIBLE REFURBISHMENTS IN LIGHTWEIGHT STEEL CONSTRUCTION.....	318
TABLE 4-72: CONSTRUCTION WEIGHTS TRAPEZOIDAL ROOF	320
TABLE 4-73: VARIABLE LOADS EXAMPLE HALL	321
TABLE 4-74: UTILISATION RATE STATIC PROOF 1987	321
TABLE 4-75: UTILISATION RATE STATIC PROOF 2017	322

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
DB	Dichtband
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC	Eurocode
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPAQ	European Association for Panels and Profiles
EPS, XPS	Polystyrol
et al.	Et alii / et aliae; und andere
etc.	et cetera
exp	experimentell
FEM	Finite Elemente Methode
FPD	Falzprofildach
HYB	Hybridelement
i.A.	im Allgemeinen
i.d.R.	in der Regel
IFBS	Internationaler Verband für den Metallleichtbau e. V.
ISO	Internationale Norm
KAS	Kassette, Kassettenelement
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
MOD	Modular
MW, MF	Mineralwolle, Mineralfaser
NA	Nationaler Anhang
NHN	Normalhöhennull
NN	Normalnull
num	numerisch
PU / PUR	Polyurethan
PIR	Polyisocyanat
QS	Querschnitt

RLT	Raumlufftechnische Anlage / Raumlufftechnik
SE	Sandwichelement
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
TS	Trennstreifen
u.a.	unter anderem
u.U.	unter Umständen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHF	Vorgehängt hinterlüftete Fassade
WD	Wärmedämmung
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WLS	Wärmeleitstufe
WSV	Wärmeschutzverordnung
z.T.	zum Teil

1 Einleitung Introduction

Als Folge der ökologischen, technischen und auch politischen Notwendigkeit, Energieverluste im Bereich des Bausektors kontinuierlich weiter zu verringern, steigt die Bedeutung der energetischen Sanierung von existierenden Gebäuden stetig an. Neben dem (privaten) Wohngebäudesektor ist dabei auch und vor allem die Vielzahl der Nichtwohngebäude des Industrie- und Gewerbebaus hinsichtlich der energetischen Qualität von Interesse. Recherchen zeigen zum einen, dass der Gebäudebestand in Deutschland nur mit Einschränkungen die aktuellen gesetzlichen Anforderungen erfüllen können. Zum anderen bieten die in der Gebäudehülle verwendeten Bauelemente ein großes Potential zur Sanierung mit Systemen der Stahlleichtbauweise. Diese Bausysteme versprechen aufgrund ihrer sehr guten thermisch-bauphysikalischen Eigenschaften nicht nur eine starke energetische Verbesserung, sondern vor dem Hintergrund einer zusätzlichen lastabtragenden Wirkung auch baukonstruktive Vorteile etwa das Tragverhalten betreffend.

As a result of the ecological, technical and political necessity of continuously reducing energy losses in the construction sector, the importance of energy-efficient refurbishment of existing buildings is steadily increasing. In addition to the (private) residential building sector, the large number of non-residential buildings in industrial and commercial buildings is of particular interest in terms of energy quality. Research show, on the one hand, that the existing building stock in Germany can only meet the current legal requirements with restrictions. On the other hand, the components used in the building envelope offer great potential for refurbishment with systems of lightweight steel construction. These building systems promise not only a strong energy improvement due to their very good thermal-physical properties, but against the background of an additional load-bearing effect also constructive advantage about the bearing behavior.

1.1 Problemstellung Problem definition

Die energetische Sanierung und das Bauen im Bestand gewinnen im Rahmen der Klimaschutzpolitik zunehmend an Bedeutung. Verschiedene Studien [1], [2] belegen, dass eine deutliche Reduktion der Emissionen und des Energieverbrauchs im Gebäudebereich nur durch energetische Sanierungen im Bestand erzielt werden kann. Abbildung 1-1 zeigt qualitativ die Möglichkeiten der Energieeinsparungen durch Sanierungsmaßnahmen.

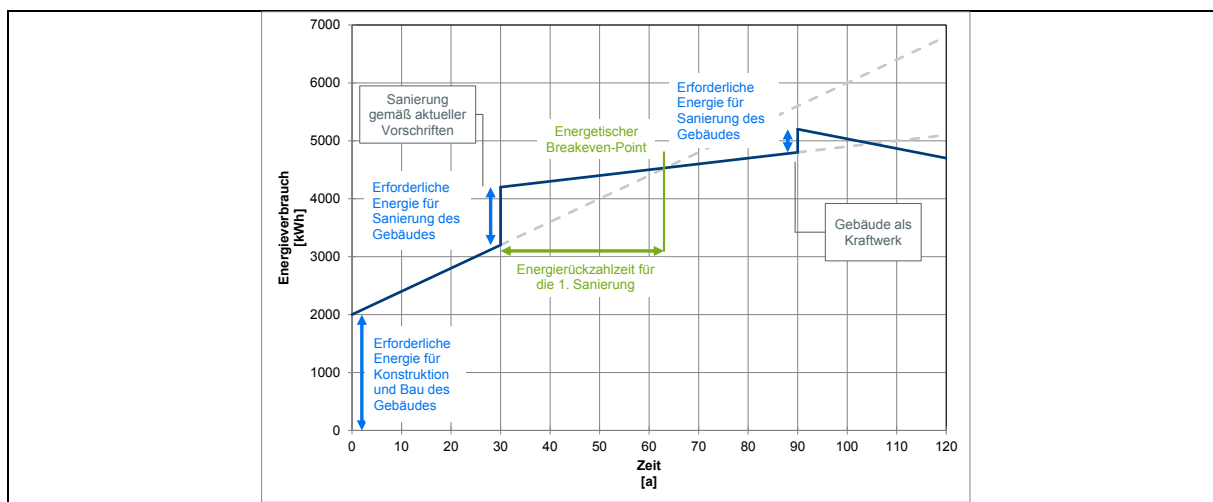


Abbildung 1-1: Energieverbrauchs-Zeit-Verlauf mit und ohne Sanierungsmaßnahmen
Figure 1-1: Energy consumption with and without refurbishment as function of time

In den typischen Anwendungsbereichen des Stahlleichtbaus (Nichtwohnungsbau, Industrie- und Gewerbebau) existiert ein großer Gebäudebestand, der die aktuellen und zukünftigen Normen sowie gesetzlichen Vorgaben (z.B. Energieeinsparverordnung 2014 [3], Neufassungen DIN 4108-2 [4] und DIN 4108-3 [5]) hinsichtlich energetischer und bauphysikalischer Anforderungen vielfach nicht erfüllen kann. Aber auch eine Vielzahl von Gebäuden in massiver Bauweise zeigt bauphysikalische Defizite im Hinblick auf Wärmeschutz, Feuchteschutz und Luftdichtheit. Im Bereich der gewerblich genutzten Nichtwohngebäude belief sich der Baubestand in Deutschland auf Gebäudeflächen im Jahr 2001 von etwa 1 Mrd. m².

Für hallenartige Nichtwohngebäude kann das Sanierungspotential exemplarisch anhand von Sporthallen verdeutlicht werden (Abbildung 1-2). Rund 75 % der kommunalen Hallen wurden vor 1990 errichtet, meist in den 1960er und 1970er Jahren. Im Jahr 2000 existierten in NRW ca. 7.000 Sporthallen, von denen 37 % sanierungsbedürftig waren; in Deutschland gab es rund 35.000 Hallen, wobei etwa 30 % davon zu sanieren waren. Sieben Jahre später wurden deutschlandweit insgesamt 22.000 Turn- und Sporthallen als sanierungsbedürftig eingestuft.



Abbildung 1-2: Sanierungsbedürftige Sporthalle

Figure 1-2: Sports hall in need of rehabilitation

Im Rahmen einer im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2009 durchgeführten Datensammlung konnten für Dächer und Fassaden die in Tabelle 1-1 bzw. Abbildung 1-3 aufgeführten Pauschalwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit der Baualtersklasse ermittelt werden. [6]

Tabelle 1-1: Pauschalwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten nicht nachträglich gedämmter Bauteile im Urzustand [6]

Table 1-1: Flat-rate values of thermal transmittances of not belatedly insulated construction elements in primary state [6]

Baualtersklasse	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m ² ·K)]							
	Vor 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	Ab 1995
Dach	2,1	2,1	2,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,3
Fassade	1,7	1,7	1,4	1,4	1,0	0,8	0,6	0,5

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass rund 65 % aller Wohngebäude in Deutschland vor dem Jahr 1977 und demnach auch vor Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung (WSV) 1977 errichtet wurden. Im Gegensatz dazu wurden deutschlandweit nur etwa 5 % aller Wohngebäude nach 2002 fertiggestellt und entsprechen daher nur im Ausnahmefall den Anforderungen der ersten Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2002.

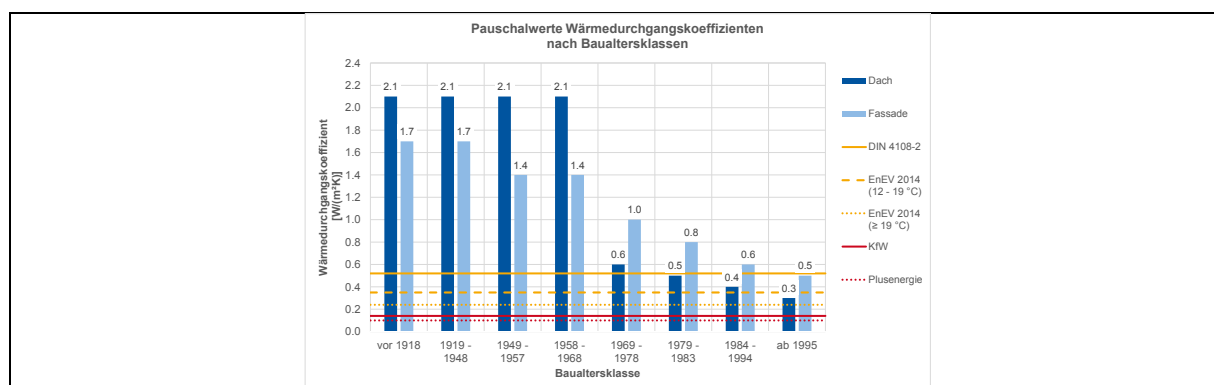


Abbildung 1-3: Pauschalwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten und ausgewählte Anforderungen
Figure 1-3: Flat-rate value of thermal transmittance and selected requirements

Die EnEV 2014 fordert beim „erstmaligen Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauten“ die Einhaltung eines Wärmedurchgangskoeffizienten für Fassaden von $U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bzw. $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Das Förderprogramm „Energieeffizient Sanieren“ der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) fordert für einzelne Bauteile die Einhaltung eines Wertes von maximal $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Zur Erreichung von Passiv-, Nullenergie- bzw. Plusenergiehausstandards ist eine weitere Verschärfung bis hin zu $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erforderlich. Gebäude nach Tabelle 1-1 können diese Anforderungen nur durch umfassende energetische Ertüchtigungsmaßnahmen erfüllen.

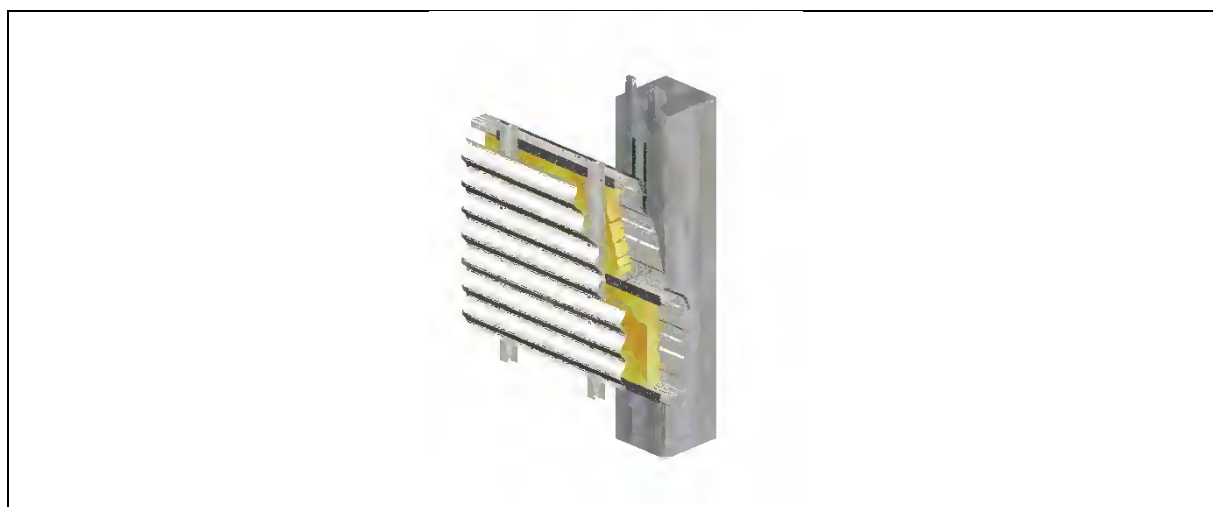


Abbildung 1-4: Kassettenelement mit modularem Stahlleichtbausystem
Figure 1-4: Liner tray with modular lightweight steel system

Stahl-Sandwichelemente mit Elementdicken von 60 bis 200 mm und Polyurethan-(PUR)-Dämmkernen mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda \leq 0,025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ sind Stand der Technik. Somit ist die Verwendung dieser Bauelemente zur energetischen Sanierung von Fassaden- und auch Dachkonstruktionen äußerst vielversprechend [7], [8], [9]. Ferner bietet auch der Einsatz anderer, modularer Stahlleichtbausysteme (engl. Built-Up-Systems) – beispielsweise zusammengesetzt aus Z- oder Ω -Profilen, Dämmstoff und Stahl-Well- oder Stahl-Trapezprofilen (siehe Abbildung 1-4) – für das Bauen im Bestand enormes Entwicklungspotential. Diese Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung sind dabei einerseits nutzungsunabhängig im Nichtwohnungsbau und

andererseits bauweisenflexibel für Gebäude in massiver sowie in Stahlleichtbauweise großflächig anwendbar. Bei diesen modularen Stahlleichtbausystemen handelt es sich um Konstruktionen ohne eine definierte Hinterlüftungsebene. Abbildung 1-5 zeigt beispielhaft die Sanierung eines Holzbalkendachs und einer Massivbaufassade mit Stahl-Sandwichelementen.



Abbildung 1-5: Praxisbeispiele – Dach- und Fassadensanierung mit Sandwichelementen
Figure 1-5: Practical example – Roof and façade refurbishment with sandwich elements

Bisher werden zur energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden meist Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) eingesetzt. Die bauphysikalische Wirkung und Schadensfreiheit dieser Systeme basiert darauf, dass die einzelnen Schichten möglichst unlösbar miteinander verbunden (verklebt) werden. Gerade daraus ergeben sich erhebliche Nachteile im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Recyclingfreundlichkeit [10]. Lösungen mit Bausystemen des Stahlleichtbaus bieten in dieser Fragestellung bereits einen entscheidenden Vorteil, da diese eine sehr gute Demontier- und Rezyklierbarkeit aufweisen [11].

Neben den zuvor beschriebenen bauphysikalischen Anforderungen sind auch neue baustatische Randbedingungen und Vorgaben zu berücksichtigen. Die Landesbauordnung NRW fordert in § 3 (1), dass bei der Errichtung, Änderung und Instandhaltung von baulichen Anlagen i.A. die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten sind [12]. Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) konkretisiert diese Forderungen derart, dass „bei Umbaumaßnahmen zunächst nur die unmittelbar von der Änderung berührten Teile mit den Einwirkungen nach den aktuellen Technischen Baubestimmungen nachzuweisen sind“ [13]. Dementsprechend ist infolge einer energetischen Ertüchtigung das Bestandsbauteil mit neuen Einwirkungen nachzuweisen. Dabei ergeben sich baukonstruktive Vorteile von Stahlleichtbaulösungen gegenüber den herkömmlichen WDVS-Lösungen: durch die neuen Windlastnormen (von 2005 bis 2010 DIN 1055-4, [14], seit 2010 EC 1-4, [15], [16]) und die darin enthaltenden Neuerungen ergeben sich verschärfte Anforderungen an die mechanische Beanspruchbarkeit von Gebäudehüllen. Die Vorgaben der neuen Norm an Dach- und Fassadenbereiche können durch die Bausysteme des Stahlleichtbaus aufgrund ihres Beitrages zur Lastabtragung [17], [18] erfüllt werden. Damit bieten sie einen entscheidenden Vorteil gegenüber WDVS-Lösungen.

Darüber hinaus ist durch die vergleichsweise einfache Handhabung und Montagefreundlichkeit dieser Stahlleichtbausysteme ein weiterer Vorzug vorhanden; insbesondere Stahl-Sandwichelemente lassen sich schnell, effizient und kostengünstig installieren. Schließlich können auch architektonisch-gestalterische Fragestellungen mit individuell angepassten Bauelementen des Stahlleichtbaus aufgegriffen und effektiv gelöst werden. Im Gegensatz zu Putzsystemen bei Verwendung von WDVS-Lösungen genügt die als Stahlfein- oder -profilblech ausgeführte Oberfläche höheren optischen Ansprüchen, ist dabei gleichzeitig dauerhafter und Instandhaltungsfreundlicher.

Mitte der 1990er Jahre wurden in Deutschland die ersten Lebenszyklusbetrachtungen von Gebäuden angestellt [19], die auf Bauprozessen und den daraus resultierenden Kostenelementen basieren und Kosten sowie ökologische Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes ausweisen. Im Projekt eLife [20] wurde z.B. für den Teilbereich der Instandhaltung im Wohnungsbau Lebenszyklusbetrachtungen und Instandhaltungsprozesse analysiert sowie Instandhaltungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung von Handwerkerkooperationen entwickelt. Konzepte in Stahl-(leicht)bauweise, Aufstockungen von Wohn- und Bürogebäuden, Umstrukturierungen und Neuentwicklungen der Tragkonzepte, moderne Fassadengestaltung (Stahl-Glas) waren Gegenstand des Forschungsprojekts P 845 „Bauen im Bestand – Potentiale und Chancen der Stahl(leicht)bauweise“ [21].

Energetische Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen müssen im Bestand mit besonderer Sorgfalt geplant und ausgeführt werden, um negative bauphysikalische Auswirkungen und Bauschäden zu vermeiden.

Die nachhaltige Nutzung bestehender Bauwerke kann durch Bauen im Bestand und somit durch die Erhaltung vorhandener Tragwerke auch aus volkswirtschaftlicher Sicht einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs nicht-erneuerbarer Rohstoffe liefern („Umnutzung statt Abriss“).

1.2 Motivation

1.2.1 Gebäudebestand und energetische Qualität Building stock and energetic quality

Die bauphysikalisch-energetische Qualität von Bestandsgebäuden in Deutschland ist oftmals nicht mehr ausreichend für die aktuellen und zukünftigen Anforderungen. Auf Grundlage von Datenerhebungen des BMWi von 2014 lässt sich zu einer die energetische Qualität von Wohngebäuden in Abhängigkeit ihrer Baualterklassen ermitteln (siehe Abbildung 1-6) [22]. Bringt man diese Daten in Verbindung mit den pauschalen Wärmedurchgangskoeffizienten nach Tabelle 1-1 bzw. Abbildung 1-3 zeigt sich, dass bis Ende der 1970er Jahre U-Werte größer als $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ die Regel waren. Erst nach Einführung der WSV 77 sinken die U-Werte und auch der Endenergieverbrauch.

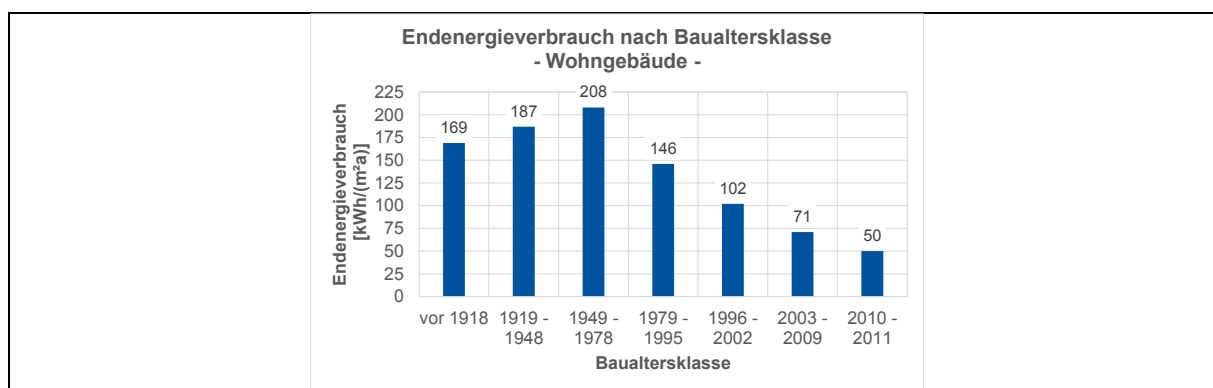


Abbildung 1-6: Endenergieverbrauch von Wohngebäuden nach Baualterklasse [22]

Figure 1-6: Energy consumption of residential building as function of erection date [22]

Weitere Daten des BMWi zeigen die Anzahl der in Deutschland vorhandenen Wohngebäude aufgeschlüsselt nach Baualterklasse (siehe Abbildung 1-7). Von den insgesamt rund 18 Mio. Wohngebäuden wurden knapp 2/3 vor Einführung der WSV 77 errichtet und besitzen somit i.A. keine ausreichende energetische Qualität.

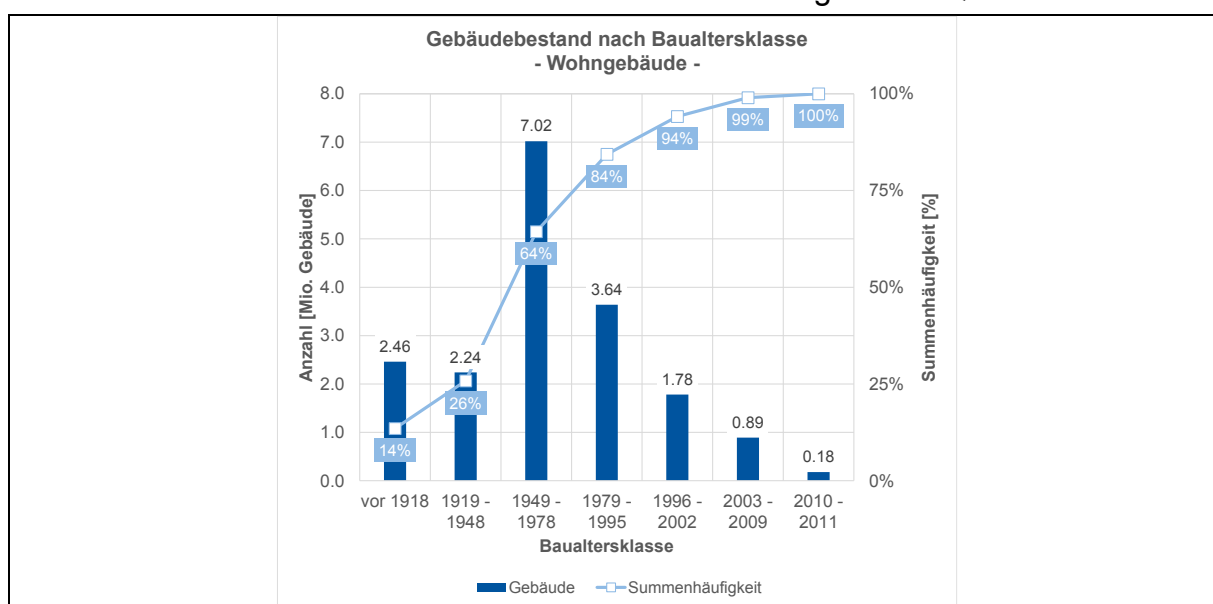


Abbildung 1-7: Bestand von Wohngebäuden nach Baualterklasse (Anzahl) [22]

Figure 1-7: Stock of residential building as function of erection date (quantity) [22]

Breits 1999 wurde von der Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ im Auftrag des 13. Deutschen Bundestages eine Studie zum Thema „Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen – Konzept Nachhaltigkeit“ durchgeführt [23]. Dabei wurde getrennt für Wohn- und Nichtwohngebäude die vorhandene Bestandsnutzfläche den einzelnen Baualterklassen zugeordnet.

Wird das Jahr 2008 als Referenz für Wohngebäude verwendet, ergeben sich über 20,3 Mio. m² Neubau gegenüber mehr als 3,4 Mrd. m² Bestand. Von dieser Bestandsnutzfläche sind mindestens 2,7 Mrd. m² älter als 1995 – also vor Einführung der WSV 95 errichtet worden. Davon wiederum wurden 80 % vor 1977 fertiggestellt (siehe Abbildung 1-8).

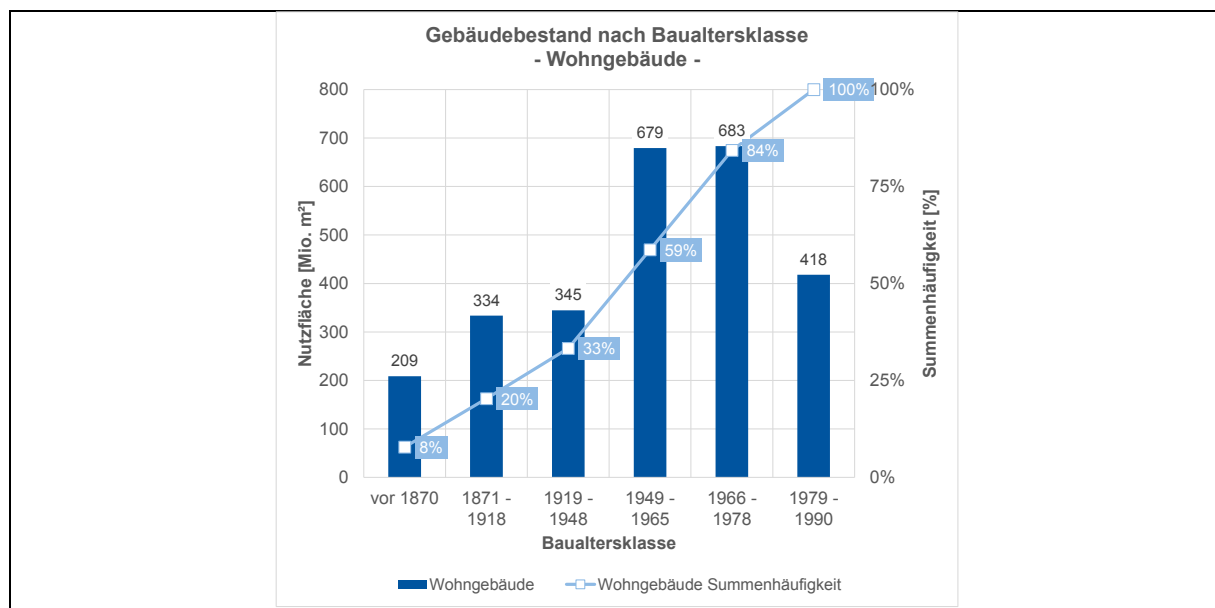


Abbildung 1-8: Bestand von Wohngebäuden nach Baualtersklasse (Nutzfläche) [23]

Figure 1-8: Stock of residential building as function of erection date (floor area) [23]

Für Nichtwohngebäude, die sich nutzungsspezifisch wie in Abbildung 1-9 dargestellt verteilen, ergibt sich eine Nutzfläche von mindestens 2,7 Mio. m², die vor Einführung der WSV 95 erstellt wurden, wobei davon ca. 90 % noch vor 1977 erstellt wurden (siehe Abbildung 1-10).

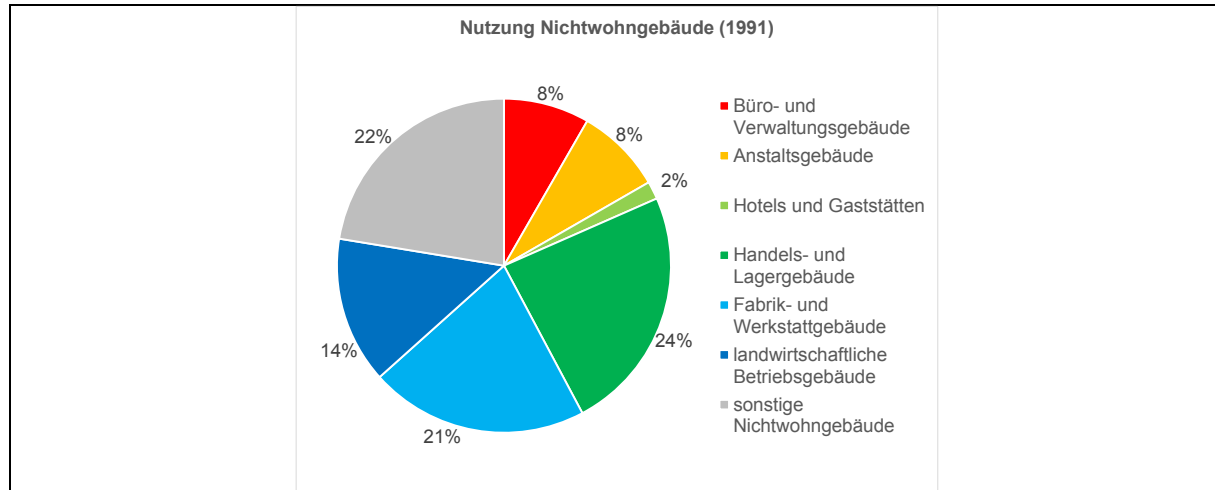


Abbildung 1-9: Nutzung von Nichtwohngebäuden [23]

Figure 1-9: Utilisation of non-residential buildings [23]

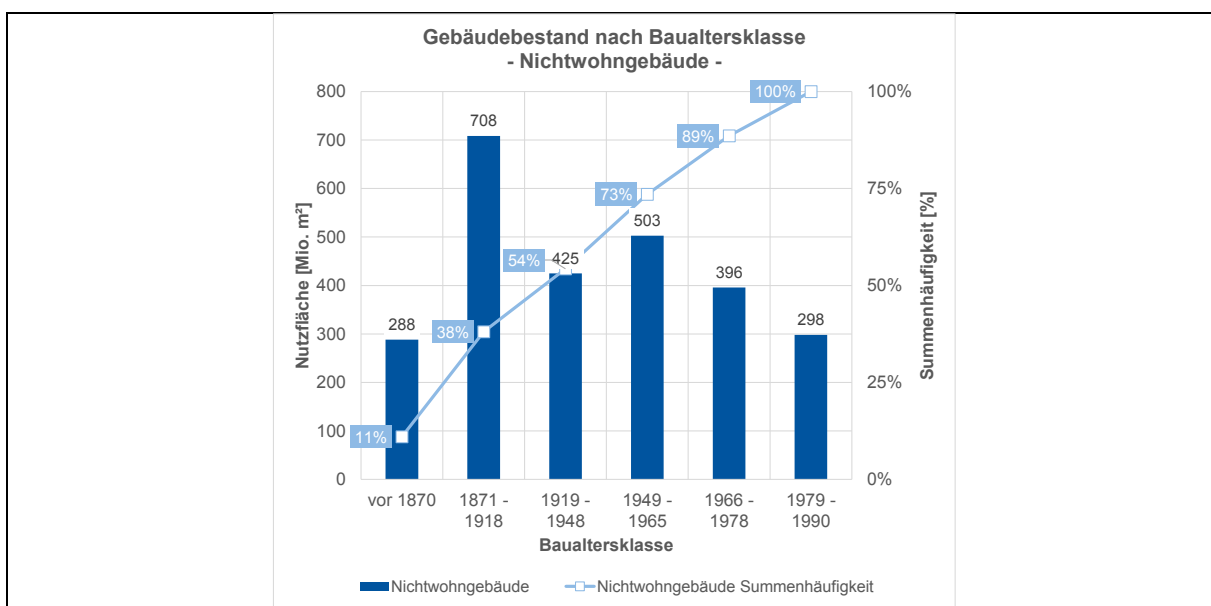


Abbildung 1-10: Bestand von Nichtwohngebäuden nach Baualtersklasse (Nutzfläche) [23]
Figure 1-10: Stock of non-residential building as function of erection date (floor area) [23]

Zur weiteren Verdeutlichung des vorhandenen Sanierungspotentials lassen sich auch die Daten des Statistischen Bundesamtes verwenden, die unter dem Titel „Bauen und Wohnen – Baugenehmigungen / Baufertigstellungen“ veröffentlicht werden [24]. Ab 1960 wurden dazu die jährlichen Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt; bis 1993 erfassen die Daten nur die alten Bundesländer, danach das gesamte Bundesgebiet. Wird das Jahr 2015 mit einer Gebäudeanzahl von ca. 9 Mio. Wohn- bzw. 2 Mio. Nichtwohngebäuden als Referenz verwendet, ergeben sich aus den absoluten Werten auch die in Abbildung 1-11 dargestellten aufsummierten Daten.

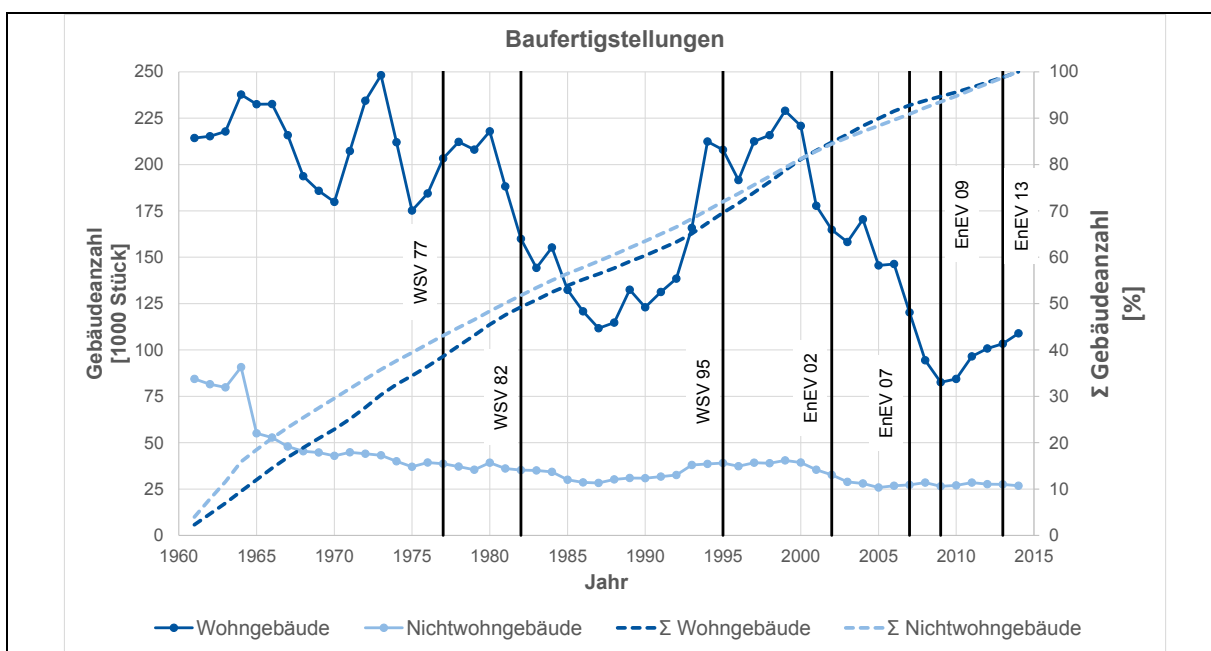


Abbildung 1-11: Baufertigstellungen und Gebäudeanzahl [24]
Figure 1-11: Completion and quantity of buildings [24]

Berücksichtigt man die entsprechenden Zeitpunkte der Einführung der gesetzlichen Wärmeschutz- bzw. Energieeinsparverordnungen, lassen sich große Sanierungsmöglichkeiten offenlegen.

Etwa 40 % der nach 1960 fertiggestellten Gebäude wurden vor Einführung der WSV 77 errichtet; für diese Gebäude kann ein pauschaler U-Wert von mehr als $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angesetzt werden. Ca. 50 % der nach 1960 fertiggestellten Gebäude wurden vor Einführung der WSV 82 errichtet und können somit mit einem U-Werte von größer als $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ veranschlagt werden. Betrachtet man die letzte WSV, ergeben sich etwa 70 % der nach 1960 fertiggestellten Gebäude, die vor deren Einführung 1995 fertiggestellt wurden. Der zugehörige Pauschal-U-Wert ist größer als $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Demgegenüber stehen nur knapp 15 % der nach 1960 fertiggestellten Gebäude, die nach Einführung der ersten EnEV im Jahr 2002 errichtet wurden, und für die ein U-Wert von kleiner als $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angenommen werden kann.

Daten, die sich auf die Bausysteme des Metall- bzw. Stahlleichtbaus fokussieren, lassen sich auf Grundlage der Auftragseingänge des Internationalen Verbands für den Metalleichtbau (IFBS) ermitteln. Die langfristige Entwicklung dieser Zahlen zeigt, dass für Trapezprofile seit mehr als 25 Jahren pro Jahr mehr als 20 Mio. m^2 angefragt werden, seit über 10 Jahren pro Jahr mehr als 25 Mio. m^2 . Für Kassettenprofile werden seit 25 Jahren jährlich zwischen 1 und 3 Mio. m^2 angefragt, während bei Sandwichelementen seit 25 Jahren eine steigende Tendenz vorliegt.

1.2.2 Klimaschutzpolitik und energetische Sanierung **Climate protection policy and energetic renovation**

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verknappung von Ressourcen, Rohstoffen und Energie gewinnen die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden und das Effizienz steigernde Bauen im Bestand immer weiter an Bedeutung. Umweltpolitische Ziele wie z.B. der Klimaschutz treten in diesem Kontext vermehrt in das Zentrum gesellschaftspolitischer Fragestellungen und sind Gegenstand viele Kontroversen.

Im Gebäude- und Bausektor ist eine Reduktion des Ressourcen-, Rohstoff- und Energieverbrauchs sowie des Emissionsausstoßes zwingend erforderlich um einen entscheidenden Beitrag zur positiven Gestaltung und Umsetzung der Klimaschutzpolitik zu leisten. Wie den bisherigen Ausführungen zu entnehmen ist, ist die energetische Sanierung des Bestands dabei ein zentraler Baustein.

Bauweisenunabhängig werden seitens des Gesetzgebers bestehende Anforderungen – bereichsübergreifend energetisch, bauphysikalisch sowie baukonstruktiv – verschärft und neue Anforderungen geschaffen. Diese beziehen sich dabei sowohl auf Neubau- als auch auf Bestands- bzw. Sanierungsmaßnahmen.

1.3 Zielsetzung **Objective**

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens bestand darin, eine Verringerung des Primärenergiebedarfs in der Nutzungsphase von Gebäuden zu erreichen. Der Primärenergiebedarf lässt sich in diesem Zusammenhang in die beiden Bereiche Lüftungswärmetransfer und Transmissionswärmetransfer untergliedern. Wärme- bzw.

Energieverluste, die während der Nutzungsphase von Gebäuden auftreten, lassen sich i.d.R. einem dieser beiden Bereiche zuordnen.

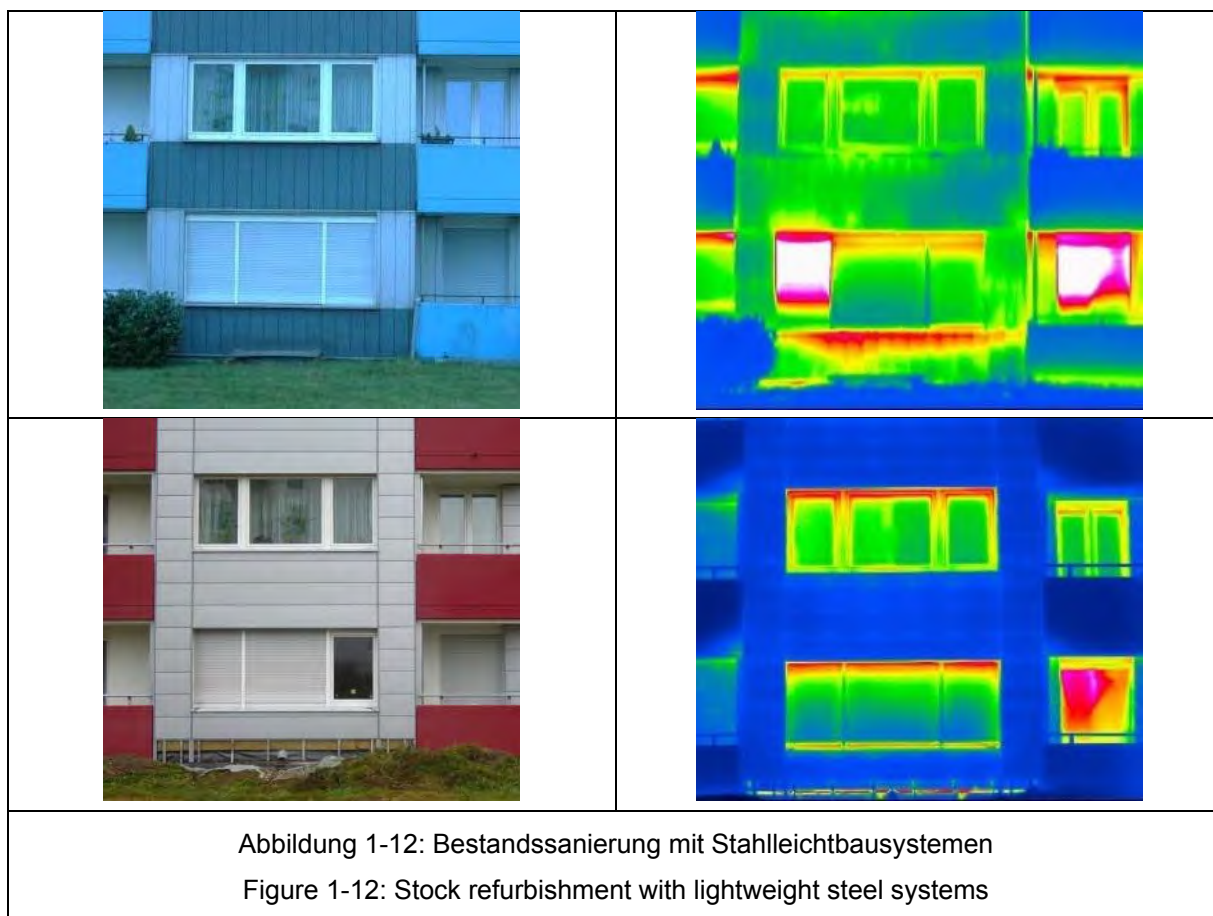
Verluste, die als Folge von kontrollierter oder auch unkontrollierter Lüftung entstehen, und anschaulich als „Wärme, die infolge einer Luftströmung verloren geht“ verstanden werden können, sind Lüftungswärmeverluste. Ihnen ist bauphysikalisch und baukonstruktiv durch die Erzeugung bzw. die Verbesserung der Luftdichtheit des Gebäudes zu begegnen. Gleichwohl ist klar, dass kontrollierte Lüftung, die beispielsweise durch vom Nutzer ganz oder teilweise geöffnete Fenster entstehen, nicht komplett vermieden werden können, sondern nur durch Sensibilisierung der Nutzer reduziert werden können.

Energieverluste, die durch den Wärmetransport durch (massive) Baustoffe, Bauteile und Baukonstruktionen entstehen, werden unter dem Begriff Transmissionswärmeverluste zusammengefasst. Sie zu minimieren ist die vordringlichste und eigentliche Aufgabe des Wärmeschutzes im klassischen Sinn. Ansatzpunkte sind hier die Verbesserung der Dämmwirkung, die Reduktion und Vermeidung von Wärmebrücken sowie eine thermisch sinnvolle Planung des Gebäudes.

Insbesondere durch die Reduzierung der früher häufig anzutreffenden, unplanmäßigen Lüftung bzw. des Luftaustausches, kommt es heute vermehrt zur Ansammlung von Feuchtigkeit innerhalb von Gebäuden. Die dadurch entstehenden neuen Einwirkungen auf Bauteile müssen eine entsprechende Berücksichtigung finden. Daneben führt auch die Verbesserung des wärmeschutztechnischen Verhaltens zu einem sich verändernden feuchteschutztechnischen Verhalten, beispielsweise zur Verschiebung der Lage des Taupunktes innerhalb einer Konstruktion. Die weiteren bauphysikalischen Wechselwirkungen zwischen Wärmeschutz, Feuchteschutz und Luftdichtheit, aber auch Aspekte des Schall- und Brandschutzes, sind ebenso zu beachten, wie auch die mögliche Beeinflussung von Lastabtragung und Tragverhalten. Baukonstruktive Fragestellungen wie etwa eine ggf. vorhandene Tragwirkung von neu installierten Sanierungselementen, die zwar in erster Linie aus bauphysikalischen Gründen erforderlich wurden, werden in diesem Themenkomplex besonders betrachtet.

In diesem Kontext lassen sich folgende Aspekte und Auswirkungen identifizieren:

- Verbesserung der Luftdichtheit durch (zusätzliche) Luftdichtheitsebene
- Verbesserung des Wärmeschutzes durch (zusätzliche) Wärmedämmebene
- Beeinflussung des Feuchteschutzes, u.a. Verschiebung des Taupunktes sowie Inversion des Luftdichtheitsprinzips
- Beeinflussung der Baukonstruktion, u.a. durch zusätzliche Lasten, Befestigungstechniken sowie verändertes Tragverhalten
- Weitere wechselseitige Beeinflussungen.



Als neue, innovative Maßnahmen werden Bausysteme des Stahlleichtbaus zur energetischen Optimierung von Bestandgebäudehüllen, d.h. sowohl im Dach- als auch im Wandbereich, detailliert untersucht. Aufgrund der guten bauphysikalischen Eigenschaften sollen dabei Stahl-Sandwichelemente im Fokus des Forschungsvorhabens stehen. Als weiteres Sanierungselement werden modulare Stahlleichtbausysteme, die im Englischen als „Build-Up-Systems“ bezeichnet werden, und deren Einsatzmöglichkeit berücksichtigt.

Als Vorteile der neuen Maßnahmen werden dabei die mögliche Ansetzbarkeit des Sanierungssystems bei der Lastabtragung sowie die nutzungsunabhängige und bauweisenflexible Anwendbarkeit gesehen. Darüber hinaus ergeben sich Vorzüge durch die bessere Demontier- und Rezyklierbarkeit, aber auch in Bezug auf Handhabung und Montagefreundlichkeit. Nicht zuletzt bieten sich durch die nahezu beliebig gestaltbare optische Erscheinung des Sanierungsbauteils neue und variabelere architektonische Möglichkeiten.

Durch Bauen im Bestand (nachhaltige Nutzung, Erhalt vorhandener Tragstruktur) ist auch aus volkswirtschaftlicher Sicht ein entscheidender Beitrag zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs nichterneuerbarer Rohstoffe erreichbar („Umnutzung statt Abriss“).

2 Stand der Technik – Bestandsgebäudehüllen State of the art – Existing building envelopes

Unabhängig davon, ob es sich um Konstruktionen des Stahlleicht- oder Massivbaus handelt, entsprechen Bestandsbauteilelemente, die im Außenwand- oder Dachbereich Anwendung finden, teilweise nicht den aktuellen gesetzlich-normativen Vorgaben. Neben Anforderungen, die in Bezug auf die bauphysikalischen Eigenschaften an die Konstruktionen gestellt werden, führen auch veränderte Vorschriften von baustatischer Seite dazu, dass entsprechende Ertüchtigungen u.U. erforderlich sind. In diesem Zusammenhang stimmen die zum Zeitpunkt der Erstellung des Gebäudes gültigen Lastannahmen mit den heute anzusetzenden nur selten überein; oftmals sind aktuelle Forderungen und Randbedingungen schärfer, so dass der Nachweis der Konstruktionen auf dieser Grundlage nicht ohne weiteres möglich ist.


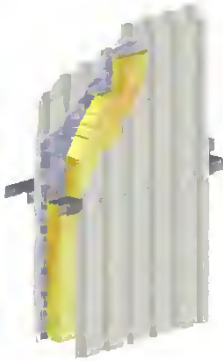
Regardless of whether it is a construction made of steel lightweight or solid materials, some existing components that are used in the outer wall or roof area do not meet the current statutory normative requirements. In addition to requirements that are placed on the constructions with regard to the physical properties of the building, also changed regulations from the structural side lead to the fact that appropriate refurbishment may be required. In this context, the load assumptions valid at the time of the construction of the building rarely coincide with those currently applicable; often nowadays requirements and boundary conditions are sharper, so that the proof of the constructions on this basis is not readily possible.

2.1 Konstruktionstypen Construction types

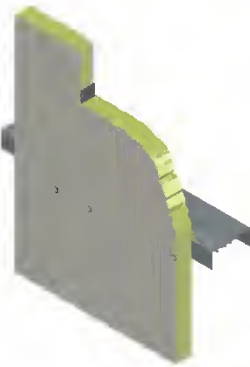
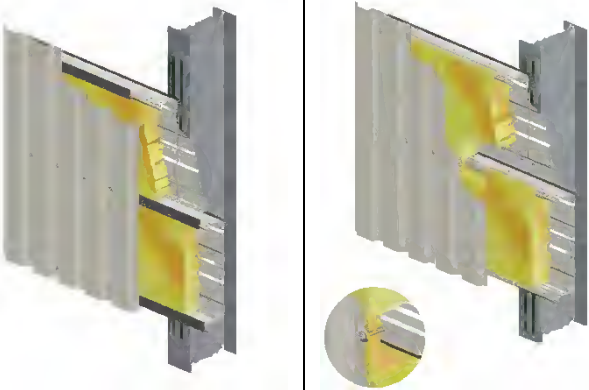
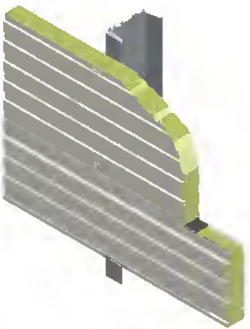
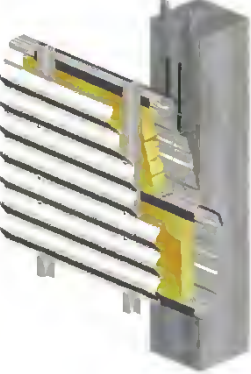
2.1.1 Außenwandkonstruktionen Exterior wall constructions

Im Bereich von Außenwänden kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionsarten zur Anwendung. Im Folgenden werden einige ausgewählte Typen vorgestellt und bzgl. ihrer Relevanz für das Forschungsvorhaben eingestuft. Zusätzlich werden grundsätzliche Kurzhinweise zu den einzelnen Varianten gegeben.

In der einfachsten Ausführungsvariante bestehen Wandkonstruktionen in Stahlleichtbauweise aus einem einschaligen, ungedämmten Trapezprofil (siehe Abbildung 2-1). Neben raumabschließender Wirkung kann dieser Aufbau lediglich vor der direkten Bewitterung schützen; die Einhaltung jeglicher energetischer Anforderungen ist nur sehr beschränkt möglich. Als Sanierungsempfehlung wird auf einen kompletten Austausch der Konstruktion verwiesen. Innerhalb des Forschungsvorhabens wird dieser Wandtyp nicht weiter betrachtet.

	
<p>Abbildung 2-1: Einschalige ungedämmte Trapezprofilwand Figure 2-1: Single layer uninsulated trapezoidal wall</p>	<p>Abbildung 2-2: Zweischalige wärmedämmte Trapezprofilwand Figure 2-2: Double layer insulated trapezoidal wall</p>

Eine entsprechende Empfehlung zum kompletten Ersatz kann auch für die zweischalige wärmedämmte Trapezprofilwand gegeben werden (siehe Abbildung 2-2). Da diese Ausführung nur wenig praktische Relevanz hat, wird auf eine detaillierte Untersuchung ebenfalls verzichtet.



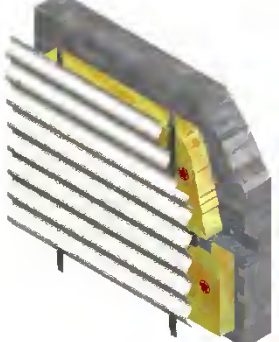
		
		
<p>Abbildung 2-3: Sandwichwandelemente Figure 2-3: Sandwich wall panels</p>	<p>Abbildung 2-4: Kassettenelemente Figure 2-4: Liner tray elements</p>	

Vielfach verbreitet sind Sandwichelemente und Kassettenelemente. Sandwichelemente werden mit Polyurethan- oder Mineralwolldämmung ausgeführt und können hinsichtlich der Längsfugen vertikal oder horizontal verlegt werden (siehe Abbildung 2-3). Grundsätzlich ist die erreichbare bauphysikalische Qualität als sehr gut

einzustufen. Je nach Elementdicke können allerdings ggf. aktuelle und zukünftige Anforderung nicht eingehalten werden. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden dazu entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

Kassettenwände existieren in zwei Grundvarianten, die sich durch das Vorhandensein einer zusätzlichen Dämmschicht unterscheiden (siehe Abbildung 2-4). Fehlt diese Zusatzdämmung, ist die zu erreichende energetische Qualität meist nicht zufriedenstellend. Gleiches gilt bei der Verwendung einer nicht ausreichend großen Dicke oder Qualität der Dämmschicht. Als weiterer Bestandsfall ist teilweise ebenfalls eine Konstruktion ohne Dämmschicht, allerdings mit einer Hinterlüftungsebene möglich. Aus thermischer Sicht entspricht diese Variante allerdings im Wesentlichen der ersten. Die energetische Ertüchtigung von Kassettenelementen sowie deren Auswirkungen auf andere Bereiche stellen den Kern des Forschungsvorhabens dar.

Im Bereich der massiven Bauweise sind Systeme mit und ohne Dämmschicht üblich (siehe Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6). Weiter werden in Verbindung mit Massivkonstruktionen vielfach vorgehängt hinterlüftete Fassaden (VHF) verwendet. Je nach Ausführungsvariante der Massivkonstruktion kann bereits der ungedämmte Fall teilweise entsprechende Energieeinsparvorgaben erfüllen. Dementsprechend lassen sich die thermischen Eigenschaften durch Verwendung einer Wärmedämmschicht weiter verbessern. Für das Forschungsvorhaben werden Sanierungsmöglichkeiten, die sich durch den Einsatz von Stahlleichtbausystemen ergeben, betrachtet.

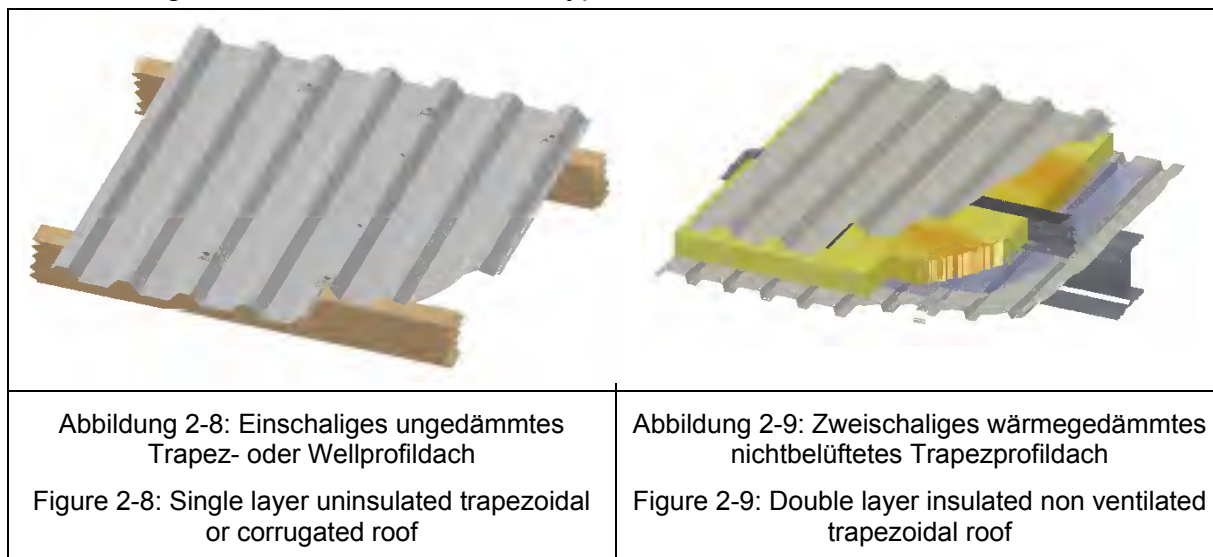
		
<p>Abbildung 2-5: Ungedämmte Massivwand mit Metallbekleidung</p> <p>Figure 2-5: Uninsulated massive wall with exterior metal facing</p>	<p>Abbildung 2-6: Gedämmte Massivwand mit Metallbekleidung</p> <p>Figure 2-6: Insulated massive wall with exterior metal facing</p>	<p>Abbildung 2-7: VHF-Konstruktion auf Massivwand mit Metallbekleidung</p> <p>Figure 2-7: Ventilated construction on massive wall with exterior metal facing</p>

In Bezug auf die VHF-Variante ist sowohl bei Kassetten mit einer ähnlichen Konstruktion (siehe Abbildung 2-4 unten) als auch der Anwendung vor Massivwänden (siehe Abbildung 2-7) zu beachten, dass abhängig von der Größe und Beschaffenheit des Hinterlüftungsquerschnitts Bauelemente, die sich auf der „kalten“ Seite der Hinterlüftung befinden, aufgrund normativer Vorgaben thermisch-energetisch nicht berücksichtigt werden dürfen („undefinierte bauphysikalische Bedingungen“). Eine mögliche Sanierung stellt in diesem Zusammenhang der Rückbau bis einschließlich der Hinterlüftungsebene dar, wodurch das Bauteil dann auf die konventionelle Kassettenwand bzw. die gedämmten Massivwand zurückgeführt wird.

2.1.2 Dachkonstruktionen Roof constructions

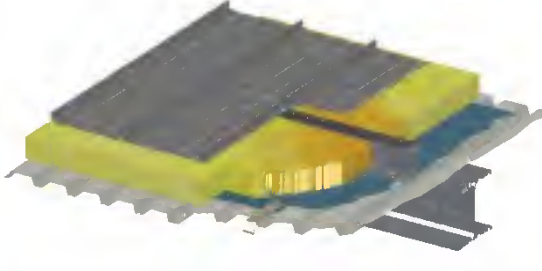
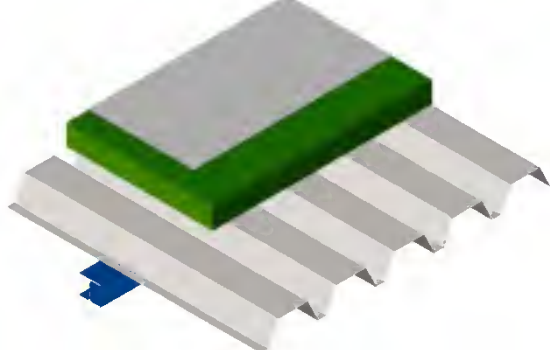
Im einfachsten Fall bestehen Dachkonstruktionen in Stahlleichtbauweise aus einem einschaligen ungedämmten Trapez- oder Wellprofildach (siehe Abbildung 2-8). Ähnlich wie bei der einschaligen ungedämmten Trapezprofilwand können energetische Anforderungen nicht befriedigend erfüllt werden; als Sanierung sind neben einem kompletten Ersatz des Systems auch ein „Ausdämmen der Sicken“ mit ggf. zusätzlicher „Überdämmung“ möglich. Im weiteren Verlauf wird dieser Dachaufbau nicht näher betrachtet.

Der Sanierungsvorschlag des „Aus- und Überdämmens“ kann auch auf zweischalige wärmegeämmte Trapezprofildächer übertragen werden (siehe Abbildung 2-9). Je nach konkreter Ausführungsvariante lassen sich unterschiedliche Anforderungsniveaus mit diesem Dachtypen erfüllen.

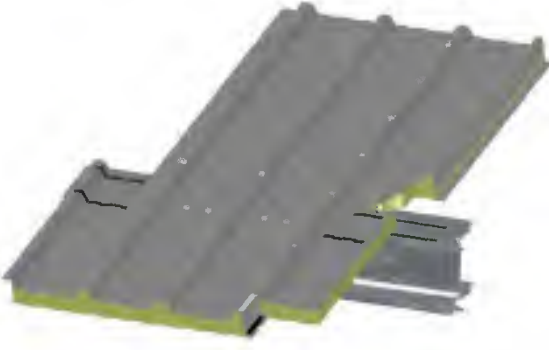


An Stelle des außenliegenden Trapezprofils kann auch ein Stehfalz- oder Klemmprofil verwendet werden (siehe Abbildung 2-10). Aufgrund der Reduktion der Wärmebrückeneffekt von linienförmig auf punktförmig kann die thermische Qualität von zweischaligen Dachkonstruktionen so weiter verbessert werden.

Eine weitere Variante, die im Bereich von Dachkonstruktionen angewendet wird, ist das einschalige oberseitig wärmegeämmte nichtbelüftete Trapezprofildach mit Dachabdichtung (siehe Abbildung 2-11). Die energetische Qualität dieses Bauteil hängt entscheidend von der Dicke der Dämmstoffschicht ab. Falls die Anforderungen nicht erreicht werden können, wird als Sanierung ein Rückbau bis zum Trapezprofil und damit kompletter Austausch der thermisch wirksamen Baustoffschichten vorgeschlagen. Für das Forschungsvorhaben werden diese Konstruktionstypen nicht näher betrachtet.

	
<p>Abbildung 2-10: Zweischaliges wärmege­dämmtes nichtbelüftetes Dach mit Falz- bzw. Klemmprofilen</p> <p>Figure 2-10: Double layer insulated non ventilated roof with Standing seam profiles</p>	<p>Abbildung 2-11: Einschaliges oberseitig wärmege­dämmtes nichtbelüftetes Trapezprofildach mit Dachabdichtung</p> <p>Figure 2-11: Single layer insulated non ventilated trapezoidal roof with sealing</p>

Sandwichelemente werden nicht nur im Bereich von Wand- und Fassadenkonstruktionen verwendet, sondern auch für Dachbauteile (siehe Abbildung 2-12). Als Dämmstoffe werden wiederum Polyurethan oder Mineralwolle eingesetzt. Als Sanierungsvarianten bei nicht ausreichender energetischer Qualität ist dabei der „Ausdämmen“ der Tiefsicken mit anschließender Überdämmung durch ein 2. Sandwichelement oder aber durch eine Falzprofilkonstruktion möglich.


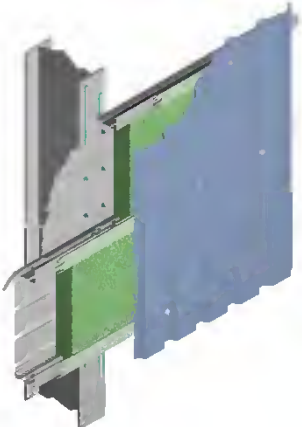

<p>Abbildung 2-12: Sandwichdachelement</p> <p>Figure 2-12: Sandwich roof panel</p>

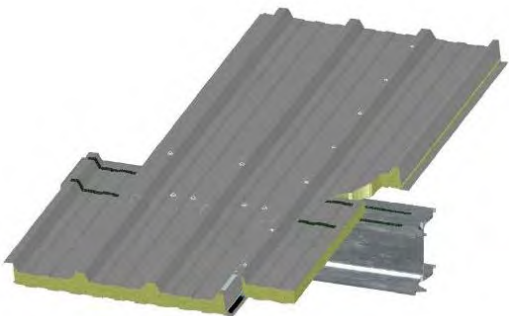
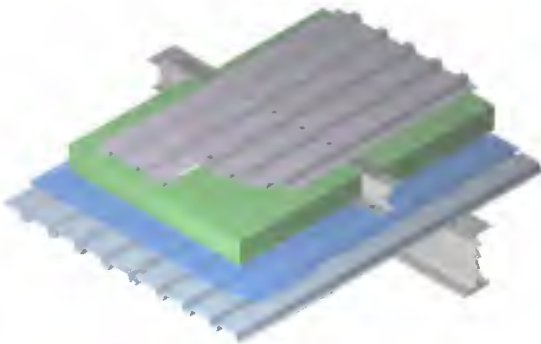
Im Bereich der massiven Konstruktionen sind Flachdachaufbauten möglich. Dafür ist eine Überdämmung mit einem Sandwichelement oder einer Falzprofilkonstruktion möglich.

2.1.3 Ausgewählte Konstruktionstypen Selected construction types

Zur Erstellung von Gebäudehüllen können unterschiedliche Typen von Konstruktionen bzw. Bausystemen oder Bauweisen verwendet werden. Neben der klassischen massiven Bauweise mit Beton-, Porenbeton- und Mauerwerkskonstruktionen werden insbesondere im Industrie- und Gewerbebau vielfach auch Bausysteme des Stahlleichtbaus eingesetzt. Dazu zählen Sandwich-, Kassetten- oder aber mehrschalige Konstruktionen. Während Kassettenelemente i.A. im Fassadenbereich

Anwendung finden, werden mehrschalige Konstruktionen häufig für Dächer benutzt. Lösungen mit Sandwichelementen existieren für beide Bereiche (siehe Abbildung 2-13 bis Abbildung 2-16).

	
<p>Abbildung 2-13: Stahl-Sandwichelement (Wand) Figure 2-13: Steel sandwich panel (wall)</p>	<p>Abbildung 2-14: Stahl-Kassettenelement Figure 2-14: Liner tray element</p>

	
<p>Abbildung 2-15: Stahl-Sandwichelement (Dach) Figure 2-15: Steel sandwich panel (roof)</p>	<p>Abbildung 2-16: Mehrschalige Dachkonstruktion Figure 2-16: Multi-layer roof construction</p>

Innerhalb des Forschungsvorhabens und des zugehörigen -berichtes werden für den Außenwandbereich eine 100 mm Kassettenwand mit 3 mm Trennstreifen als „Standardbestandsvariante“ sowie Kassettenwände mit Distanzkonstruktionen, die hinterlüftet sind, und Sandwichelemente mit Dicken ≤ 100 mm (bei Polyurethandämmung) bzw. ≤ 200 mm (bei Mineralwolldämmung) als weitere Bestandsvarianten betrachtet. Für den Bereich der massiven Wandkonstruktionen werden Fälle, die nicht oder nur ungenügend gedämmt sind, weiter berücksichtigt. Um diese Bauteile energetische zu sanieren, wird als „Standardsanierungsmaßnahme“ von Sandwichelementen mit Dicken ≥ 120 mm ausgegangen. Eine weitere Sanierungsmöglichkeit stellen dabei modulare Stahlleichtbausysteme mit Dicken ≥ 60 mm dar.

Hinsichtlich der Dachkonstruktionen wird der Schwerpunkt auf Sandwichdächer gelegt. Als Sanierungsmaßnahme sollen dabei i.d.R. ebenfalls Sandwichelemente und ggf. Falzprofilkonstruktionen in Betracht gezogen werden.

Die Konstruktionstypen, die im Rahmen des Forschungsvorhaben hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Qualität sowie bezüglich ihres Sanierungspotentials und der damit einhergehenden Beeinflussungen des mechanischen Bauteilverhaltens untersucht wurden, lassen sich in unterschiedliche Sektoren einteilen.

Im sog. Bauteilsektor wird bzgl. des Einsatz- und Anwendungsbereich unterschieden. Die Bauteile können in der Fassade / Außenwand oder im Dach eingesetzt werden. Außerdem wird im Hinblick auf die Bestandsbauweise im Bauweisensektor zwischen massiver und Stahlleichtbauweise differenziert. Schließlich wird in Bezug auf das Sanierungsbauteil im Sanierungssektor zwischen Stahl-Sandwichelementen und modularen Stahlkonstruktionen unterschieden. In Abbildung 2-17 ist eine entsprechende Visualisierung dargestellt.

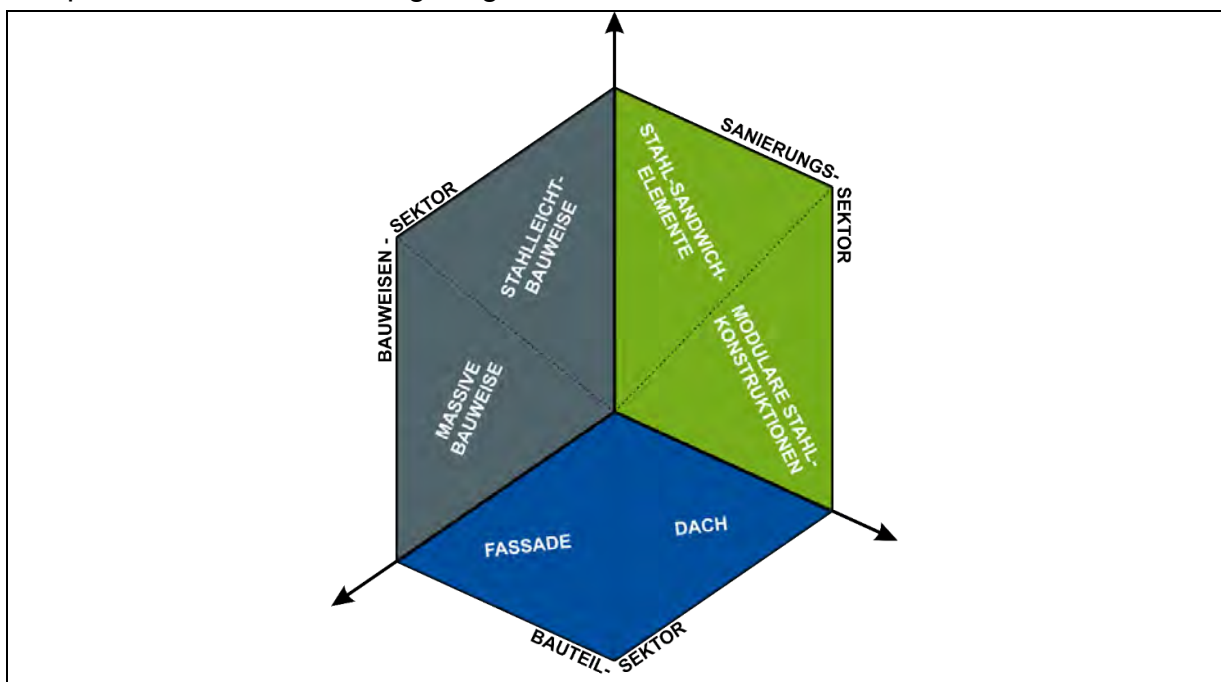


Abbildung 2-17: Einteilung der betrachteten Konstruktionstypen

Figure 2-17: Classification of the considered construction types

Tabelle 2-1 gibt eine Übersicht der betrachteten Bestands- und Sanierungskombinationen. Weitere Informationen zu den konkreten Aufbauten sind in Abschnitt 2.1 bzw. 2.1.3 zu finden.

Tabelle 2-1: Bestands- und Sanierungskombinationen

Table 2-1: Combinations of stock and refurbishment

Bauteil	Bauweise	Sanierung
Fassade / Außenwand	Stahlleichtbauweise ¹⁾	Stahl-Sandwichelement
	Massive Bauweise ²⁾	Modulare Stahlkonstruktion
Dach	Stahlleichtbauweise ¹⁾	Stahl-Sandwichelement
	Massive Bauweise ²⁾	Modulare Stahlkonstruktion
¹⁾ Stahl-Sandwichelemente, Mehrschalige Stahlkonstruktionen		
²⁾ Beton-, Porenbeton-, Mauerwerkskonstruktionen		

2.2 Bauphysikalische Aspekte Building physical aspects

2.2.1 Thermische Qualität Thermal quality

2.2.1.1 Grundlagen Background

Die thermische Qualität von Bauelementen kann auf Grundlage von DIN EN ISO 6946 [25] bestimmt werden. Für homogene Bauteile enthält die Norm Handrechenverfahren, mit deren Hilfe der Wärmedurchgangskoeffizient, der die maßgebende bauphysikalische Größe ist, als Kehrwert der Summe der einzelnen Wärmedurchgangswiderstände unter Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände ermittelt werden kann. Bei inhomogenen Bauteilen ohne signifikante Wärmebrückeneffekte – insbesondere ohne metallische Wärmebrücken – kann ebenfalls mit Hilfe von DIN EN ISO 6946 die thermische Qualität berechnet werden.

Für Bauteile, bei denen mehrdimensionale geometrische oder auch materialbedingte Wärmebrücken zu berücksichtigen sind, sind numerische Verfahren auf Grundlage von DIN EN ISO 10211 [26] anzuwenden. Dazu zählt u.a. auch die Methode der finiten Element (FEM – Finite Elemente Methode). Abbildung 2-18 zeigt exemplarisch ein FEM-Modell und eine damit ermittelte Temperaturverteilung als Ergebnis der numerischen Berechnung.

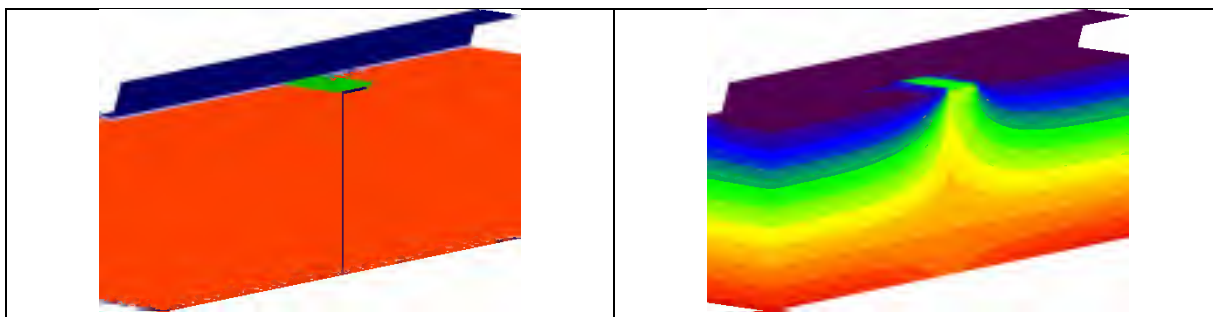
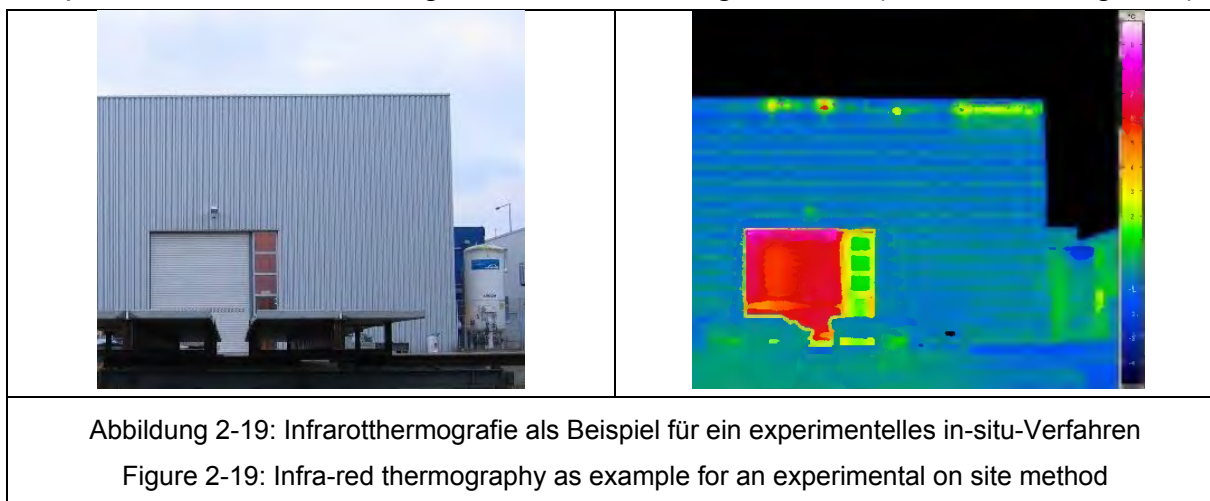


Abbildung 2-18: Numerisches Finite-Elemente-Modell und ermittelte Temperaturverteilung
Figure 2-18: Numerical finite element model and determined temperature distribution

Da bei den Bausystemen des Stahlleichtbaus grundsätzlich Metall bzw. Stahl zum Einsatz kommt, und Stahl verglichen mit den sonst üblichen Baustoffen eine sehr große Wärmeleitfähigkeit besitzt, ist zur Beurteilung der thermischen Qualität dieser Bausysteme die Verwendung derartiger numerischer Verfahren meist erforderlich. Allerdings existieren mittlerweile einige weitere Ansätze, die sich auf Hilfsmittel – z.B. Wärmebrückenkataloge – beziehen, mit denen die entsprechenden bauphysikalischen Größen bestimmt werden können. Den theoretischen Hintergrund für diese Hilfsmittel bilden aber i.d.R. numerische Berechnungen, die durchgeführt, ausgewertet und aufbereitet wurden. Nur in wenigen Ausnahmefällen lassen sich thermische Fragestellungen an Bausystemen in Stahlleichtbauweise ohne numerische Verfahren händisch lösen.

Darüber hinaus kann mit Hilfe von experimentellen Verfahren – zum einen Laborverfahren oder auch zum anderen in-situ-Verfahren – ebenfalls die thermische Qualität von Bauelementen untersucht werden. Gegenüber den nicht-experimentellen Methoden lassen sich auf Grundlage von Versuchen allerdings meist nur qualitative Aussagen treffen; eine (absolute) quantitative Einordnung ist oft nicht möglich, eine relative, d.h. im direkten Bezug zu einer Referenzausführung, kann ggf. bei der Bewertung berücksichtigt werden. Im Labor lassen sich in begrenztem Maßstab Bausystem mit der „HotBox-Methode“ untersuchen; bei Vor-Ort-Messungen kann beispielsweise Infrarotthermografie zur Anwendung kommen (siehe Abbildung 2-19).



2.2.1.2 Massive Bauweise **Massive constructions**

Für die thermische Qualität von Wandkonstruktionen in massiver Bauweise ist von entscheidender Bedeutung, ob und wie stark die tragende Massivkonstruktion gedämmt ist. Für die Untersuchung der drei betrachteten massiven Bestandwandtypen werden die nachfolgend aufgeführten thermischen und geometrischen Eigenschaften zugrunde gelegt (vgl. DIN 4108-4 [27] und DIN EN ISO 10456 [28]):

- Beton mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,5 W/(m·K) und einer Wanddicke zwischen 100 und 250 mm,
- Porenbeton mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,1 W/(m·K) und einer Wanddicke zwischen 100 und 500 mm,
- Mauerwerk mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1,0 W/(m·K) und einer Wanddicke zwischen 100 und 490 mm.

Als Bewertungsmaßstab für die energetisch-thermische Qualität lassen sich daraus zunächst für die ungedämmten Wandaufbauten entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten ermitteln. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der somit unzureichenden Dämmeigenschaften von Beton und Mauerwerk, werden diese beiden Konstruktionstypen i.d.R. nicht ungedämmt, sondern mit einer zusätzlichen Wärmedämmschicht ausgeführt. Für die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen wird eine Mineralwoll-Dämmung der Wärmeleitstufe (WLS) 040 mit unterschiedlichen Dicken dazu angesetzt.

Es ergeben sich die in Tabelle 2-2 aufgeführten und in Abbildung 2-20 bis Abbildung 2-23 visualisierten Wärmedurchgangskoeffizienten.

Tabelle 2-2: Wärmedurchgangskoeffizienten von Bestandsaußenwänden in massiver Bauweise
 Table 2-2: Thermal transmittances of existing exterior walls in massive construction type

Dämmstoffdicke d_{WD} [mm]	Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]		
	Beton $d = 100 \dots 250$ mm	Porenbeton $d = 100 \dots 500$ mm	Mauerwerk $d = 100 \dots 490$ mm
ungedämmt	3,70 ... 4,76	0,19 ... 0,86	1,52 ... 3,70
60	0,57 ... 0,59	-	0,46 ... 0,57
100	0,36 ... 0,37	-	0,32 ... 0,36
160	0,23 ... 0,24	-	0,22 ... 0,23

Neben den sich ergebenden Wärmedurchgangskoeffizienten sind ebenfalls die verschiedenen Anforderungsniveaus in den Diagrammen dargestellt.

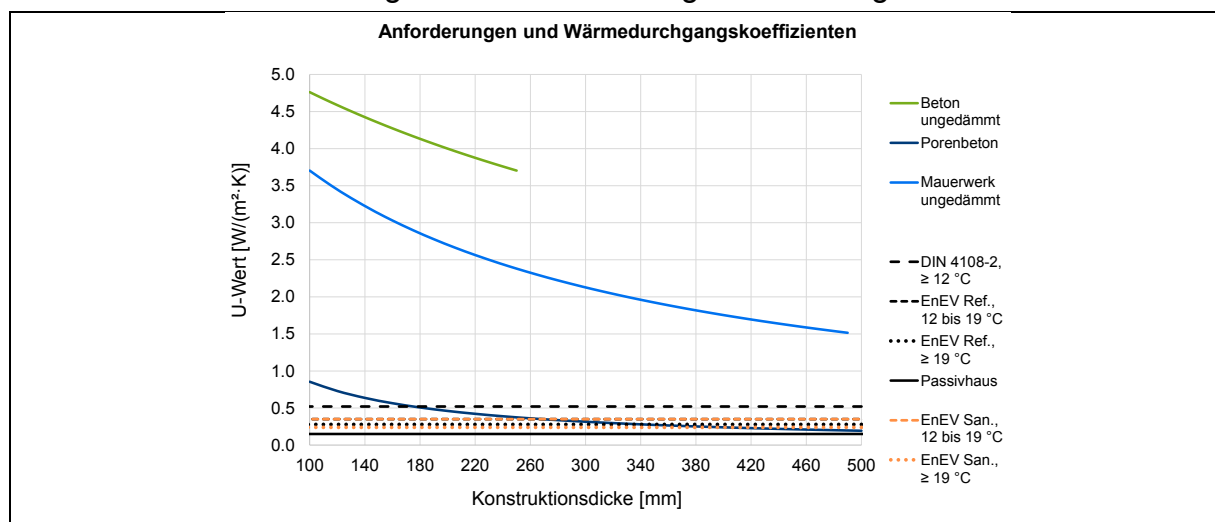


Abbildung 2-20: Thermische Qualität von ungedämmten Bestandsaußenwänden in massiver Bauweise

Figure 2-20: Thermal quality of existing uninsulated exterior walls in massive construction type

Die ungedämmten Bestandsaußenwände aus Beton und Mauerwerk können die wärmschutztechnischen Anforderungen nicht erfüllen. Nur die Variante mit Porenbeton erreicht mit Dicken ab ca. 180 mm stufenweise die entsprechenden Grenzwerte.

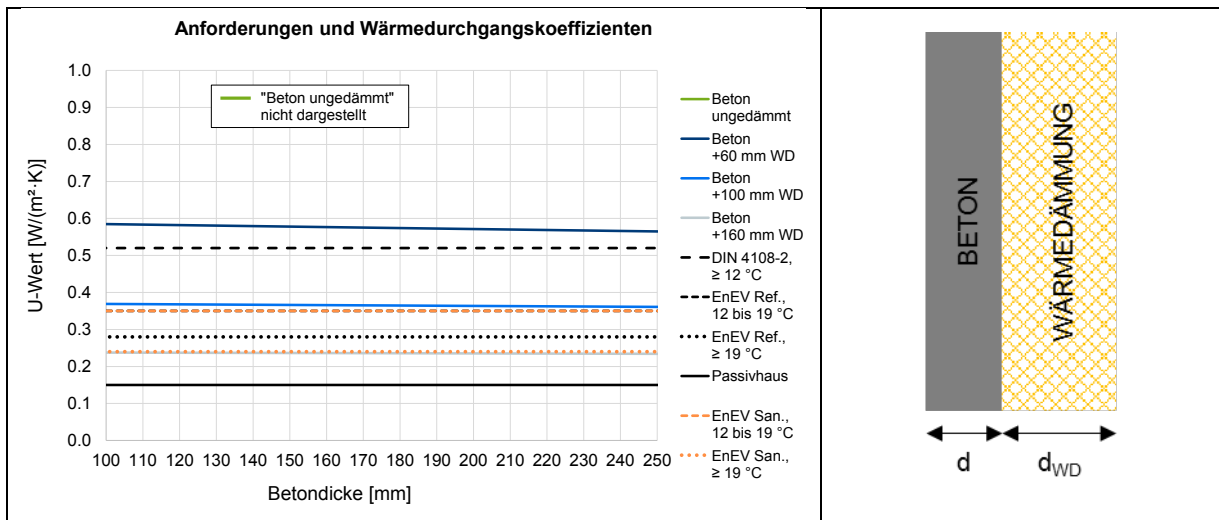


Abbildung 2-21: Thermische Qualität von Bestandsaußenwänden aus Beton
 Figure 2-21: Thermal quality of existing exterior walls made of concrete

Die Darstellung der gedämmten Betonaußenwand zeigt, dass zur Erfüllung aller Anforderungen Dämmstoffdicken von mehr als 160 mm notwendig sind. Selbst die Mindestanforderung der DIN 4108-2 [4] kann mit einer 60 mm starken Dämmschicht nicht erreicht werden. Die Variante mit einer 100 mm Dämmschicht kann zwar die Mindestanforderung einhalten, genügt aber nicht, um die weiteren Vorgaben zu erfüllen.

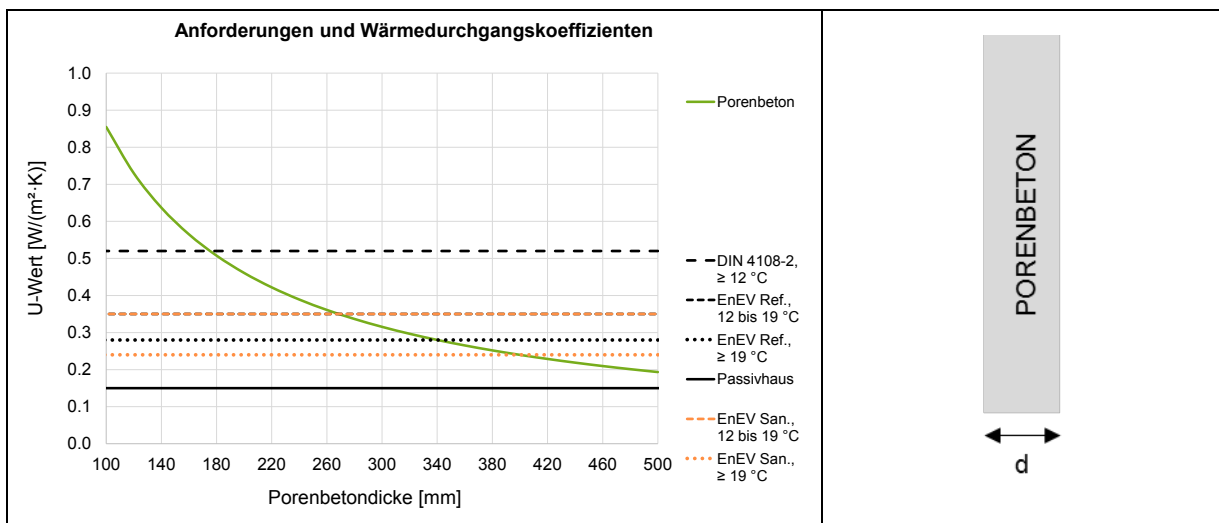
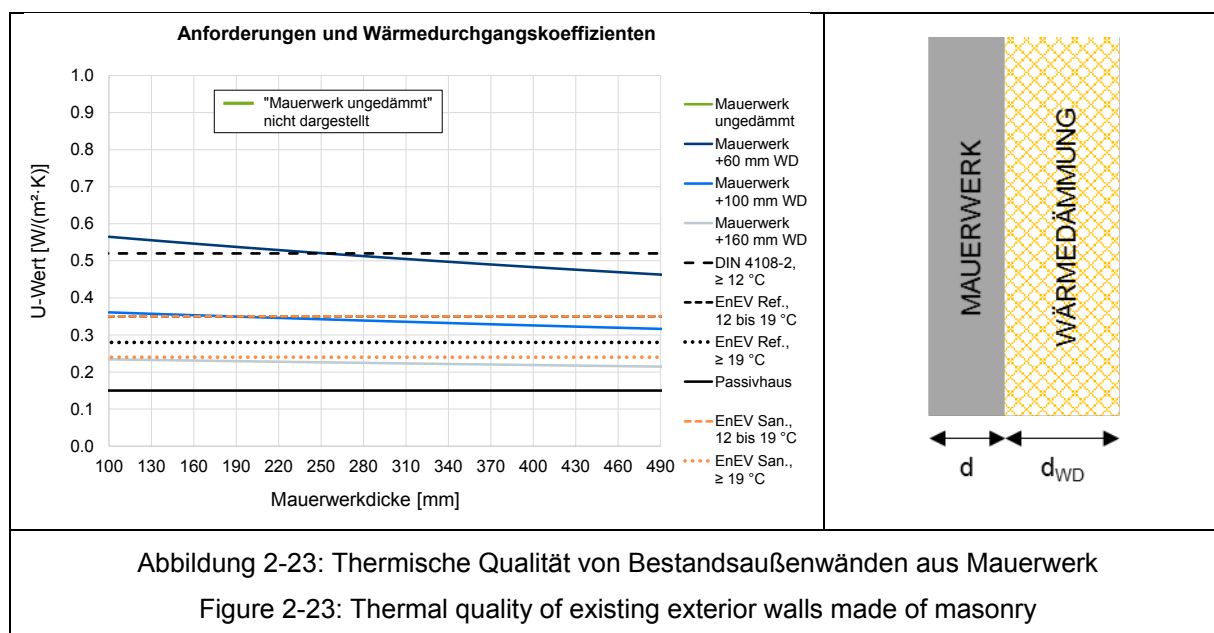


Abbildung 2-22: Thermische Qualität von Bestandsaußenwänden aus Porenbeton
 Figure 2-22: Thermal quality of existing exterior walls made of gas concrete

Mit ungedämmten Porenbetonwänden kann ab einer Dicke von ca. 180 mm die Mindestanforderung eingehalten werden. Die verschiedenen weiteren Grenzwerte lassen sich durch eine entsprechende Vergrößerung der Porenbetondicke erreichen. Allerdings kann eine sehr gute thermische Qualität im betrachteten Bereich bis 500 mm nicht erzielt werden.



Die Bewertung von Mauerwerkswänden entspricht im Wesentlichen der von Betonwänden. Je nach Dicke der zusätzlichen Dämmschicht, lässt sich zwar der Nachweis der Einhaltung der Mindestanforderungen erbringen, allerdings können weitere höhere Qualitätsforderungen nicht eingehalten werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die betrachteten Bestandswände in massiver Bauweise vielfach die aktuellen wärmeschutztechnischen Anforderungen nicht erfüllen können. Die thermische Qualität dieser Konstruktionen bietet daher entsprechendes Potential für Sanierung und Energieeinsparung.

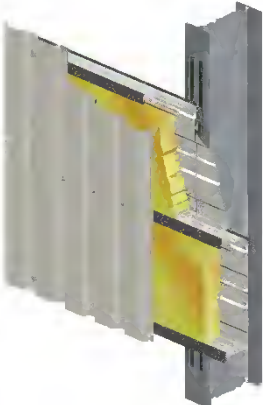
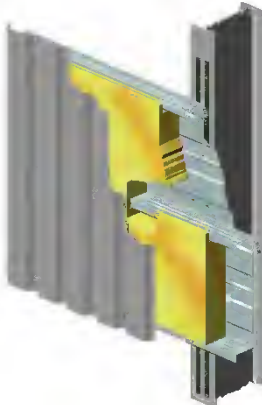
2.2.1.3 Stahlleichtbauweise Lightweight steel constructions

Die thermische Qualität von Baukonstruktionen in Stahlleichtbauweise wird maßgeblich von der konkreten Konstruktionsart bzw. von Auftreten und Größe von Wärmebrückeneffekten bestimmt. Da es sich bei dieser Bauweise um eine „Fugenbauweise“ handelt, sind Fugen, Schnittstellen und Anschlussbereiche zwischen den einzelnen Bauelementen konstruktionsbedingt nicht zu vermeiden. Allerdings stellen gerade diese Bereiche aus wärmeschutztechnischer Sicht die größten Schwachstellen dar und führen daher auch zu den größten Wärmebrückeneffekten bzw. Energieverlusten.

Für die im weiteren Verlauf betrachteten Konstruktionstypen, zum einen Kassettenelemente im Wandbereich und zum anderen Sandwichelemente im Dach- und Wandbereich, treten die Wärmebrückeneffekte an der Schnittstellen zwischen zwei Elementen unterschiedlich stark auf. Während im Stoßbereich von (konventionellen) Stahlkassetten die Kassettdämmebene durch den Steg durchdrungen wird und somit eine große Wärmebrückenwirkung entsteht, kann die thermische Qualität der Längsfugen bei Sandwichelementen bei entsprechender Ausführung als sehr gut und der daraus resultierende Wärmebrückeneffekte als sehr gering bezeichnet werden.

2.2.1.3.1 Kassettenelemente Liner tray elements

Stahlkassettewände werden in Profilhöhen bzw. -dicken zwischen 90 und 240 mm hergestellt, wobei im Gebäudebestand i.d.R. nur geringe Dicken anzutreffen sind. Die Dicke des Kassettenprofilblechs selbst wird maßgebend bestimmt von der erforderlichen Tragfähigkeit des Elements und kann zwischen 0,75 und 1,50 mm liegen. Aus wärmeschutztechnischer Sicht führt ein dünnes Profilblech zu geringeren Energieverlusten als eine dickes. Es existieren zwei verschiedene Ausführungsvarianten von Kassettenelementen. Bei der konventionellen Variante wird zur Reduktion der beschriebenen Wärmebrückenwirkung im Bereich des Kassettensteges ein 3 mm dicker (Kunststoff-) Trennstreifen angeordnet (siehe Abbildung 2-24). Da die äußerer (Witterungs-) Schale, die vielfach als Stahltrapezprofil ausgebildet wird, mechanisch an den Stegflanschen befestigt ist, kann durch die Platzierung zwischen durchgehenden Stahlsteg und der Außenschale die Auswirkung dieser Wärmebrücke zumindest teilweise verringert werden. Für die zweite Variante wird zwischen Außenschale und Kassettensteg statt einer dünnen, punktuellen (thermischen) Trennschicht eine vollflächige, 40 bzw. 80 mm dicke zusätzliche Dämmschicht angeordnet (siehe Abbildung 2-25). Da diese Dämmschicht nicht nur die Fläche des gesamten Kassettenelementes überdeckt, sondern auch Dicke ist und eine geringere Wärmeleitfähigkeit als der Trennstreifen besitzt, kann der konstruktionsbedingte Wärmebrückeneffekt deutlich reduziert werden.

	
<p>Abbildung 2-24: Stahl-Kassettenelement mit Trennstreifen Figure 2-24: Liner tray element with separation stripe</p>	<p>Abbildung 2-25: Stahl-Kassettenelement mit Zusatzdämmung Figure 2-25: Liner tray element with additional insulation</p>

Bei der Verwendung von Mineralwolldämmung mit unterschiedlichen WLS ergeben sich für die entsprechende Variante die in Tabelle 2-3 aufgeführten Wärmedurchgangskoeffizient. Als Standardfall werden für WLS 035 nachfolgend in Abbildung 2-26 und Abbildung 2-27 diese Werte visualisiert. Zusätzlich dargestellt sind jeweils exemplarische numerische Modell und die damit ermittelten Temperaturverteilungen.

Tabelle 2-3: Wärmedurchgangskoeffizienten von Bestandsaußenwänden aus Kassettenelementen
 Table 2-3: Thermal transmittances of existing exterior walls made of liner tray elements

Variante	Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]			
	WLS 030	WLS 035	WLS 040	WLS 045
	d _{KAS} = 90 ... 240 mm			
+ 3 mm Trennstreifen	0,35 ... 0,73	0,41 ... 0,84	0,47 ... 0,96	0,52 ... 1,08
+ 40 mm Zusatzdämmung	0,19 ... 0,29	0,22 ... 0,34	0,25 ... 0,38	0,28 ... 0,43
+ 80 mm Zusatzdämmung	0,15 ... 0,29	0,17 ... 0,24	0,19 ... 0,27	0,22 ... 0,31

Neben den sich ergebenden Wärmedurchgangskoeffizienten sind ebenfalls die verschiedenen Anforderungsniveaus in den Diagrammen dargestellt.

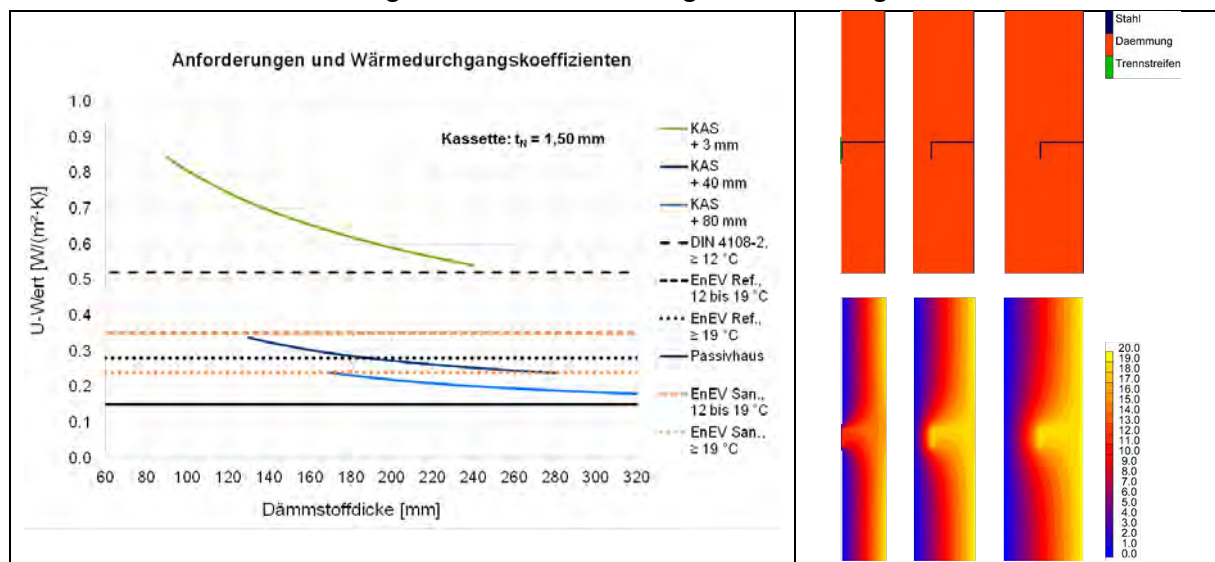


Abbildung 2-26: Thermische Qualität von Bestandsaußenwänden aus Kassettenelementen ($t_N = 1,50$ mm)

Figure 2-26: Thermal quality of existing exterior walls made of liner tray elements ($t_N = 1,50$ mm)

Wie anhand der Abbildungen zu erkennen ist, weisen insbesondere die Trennstreifen-Varianten Defizite bzgl. des Wärmeschutzes auf. Die Profilblechdicke hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die konkret erreichbare Qualität, kann allerdings oftmals nicht entscheidend zur Verbesserung des thermischen Verhaltens beitragen. Mit den Varianten, bei denen eine zusätzliche Dämmschicht angeordnet wird, lassen sich aktuelle Anforderungen zumindest teilweise erreichen, allerdings wird auch für diese Elemente das vorhandene Verbesserungspotential deutlich.

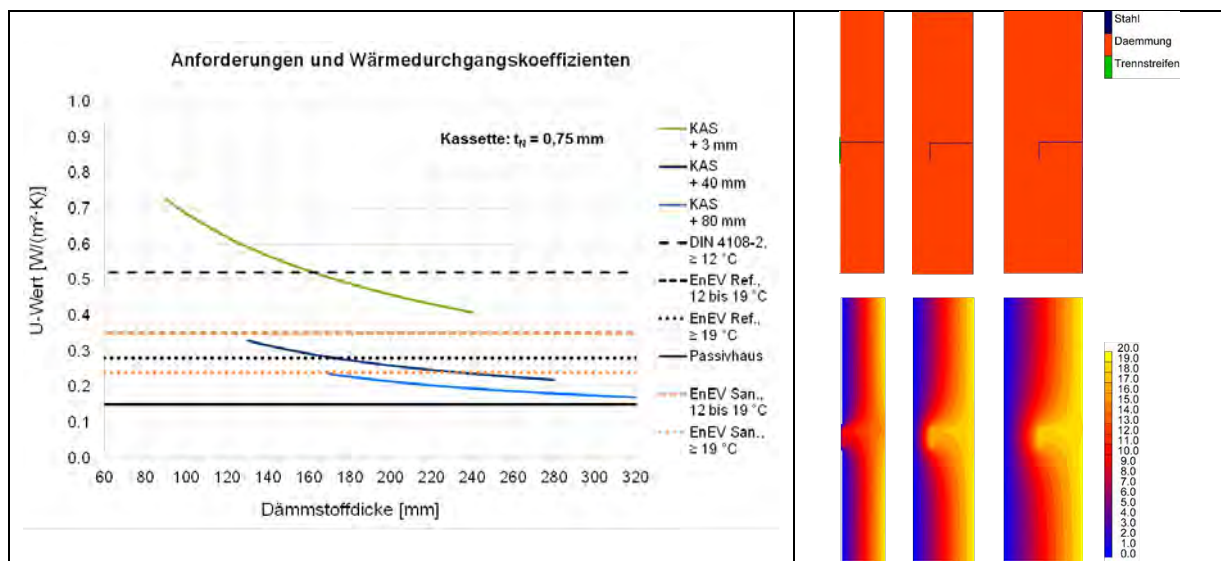


Abbildung 2-27: Thermische Qualität von Bestandsaußenwänden aus Kassettenelementen ($t_N = 0,75$ mm)

Figure 2-27: Thermal quality of existing exterior walls made of liner tray elements ($t_N = 0,75$ mm)

2.2.1.3.2 Sandwichelemente Sandwich panels

Bei Sandwichelementen kann als Dämmstoff entweder Polyurethan / Polyisocyanurat (PU bzw. PUR / PIR) oder Mineralwolle / -faser (MW / MF) verwendet werden. Während PU-Dämmstoffe i.d.R. eine geringere Leitfähigkeit als MW-Dämmungen haben, besitzen dieser allerdings wiederum andere Vorteile, insbesondere bzgl. des brandschutztechnischen Verhaltens.



Abbildung 2-28: Stahl-Sandwichelement (Wand)
 Figure 2-28: Steel sandwich panel (wall)

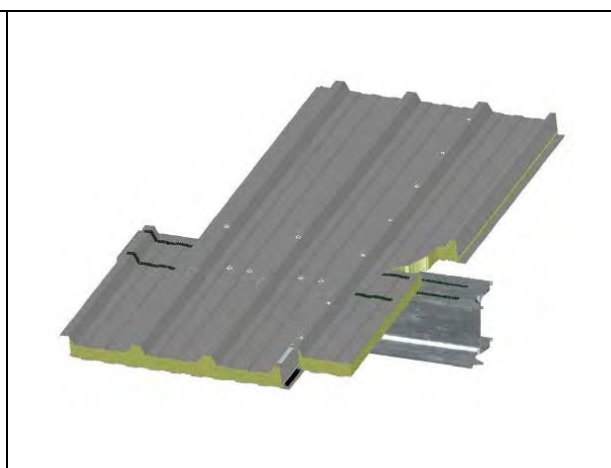


Abbildung 2-29: Stahl-Sandwichelement (Dach)
 Figure 2-29: Steel sandwich panel (roof)

Die Elementdicke von Sandwichpaneelen liegt zwischen 60 und 200 mm im Wandbereich und zwischen 40 und 200 mm im Dachbereich. Für den Wandbereich lassen sich damit je nach Dämmdicke und Dämmstoff U-Werte zwischen 0,1 und 0,9 W/(m²·K) bestimmen. Im Dachbereich ergeben sich je nach konkreter Spezifikation Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen 0,1 und 1,0 W/(m²·K).

DIN EN 14509 [29] stellt die normative Grundlage für Sandwichelemente dar. Im Hinblick auf die thermische Qualität der Längsfugen gibt die Norm Verfahren an, mit denen sich in Abhängigkeit der konkreten Fugenausbildung die Bemessungswerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmen lassen. Dabei wird zwischen acht Fugentypen unterschieden. (siehe Abbildung 2-30)

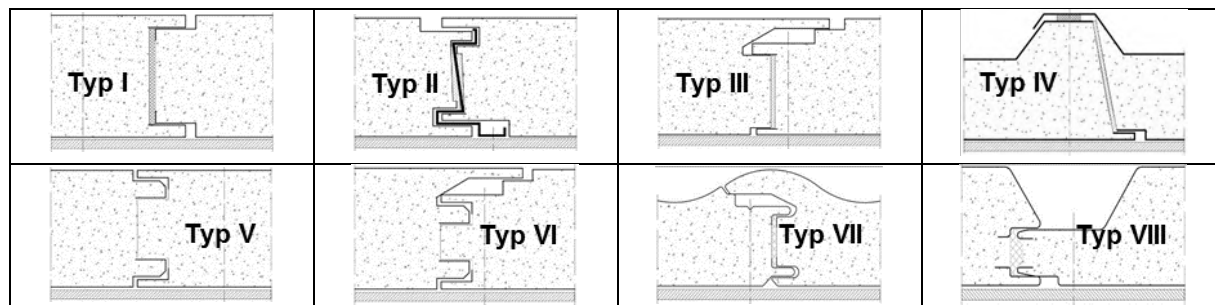


Abbildung 2-30: Längsfugentypen von Sandwichelementen nach DIN EN 14509 [29]
 Figure 2-30: Longitudinal joint types for sandwich panels according to DIN EN 14509 [29]

Bei Fugentyp IV handelt es sich um eine Längsfuge, die im Dachbereich eingesetzt wird; die anderen Fugentypen kommen im Bereich der Fassade zum Einsatz.

Zur exemplarischen Verdeutlichung der thermischen Qualität im Fassadenbereich wird für die beiden Fugentypen I (sichtbare Befestigung) und III (verdeckte Befestigung) der Bemessungswärmedurchgangskoeffizient bestimmt. Für Fugentyp I wird eine MF-Dämmung der WLS 044 verwendet, bei Fugentyp III werden zwei PU-Dämmungen mit WLS 024 bzw. 018 berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-31 dargestellt.

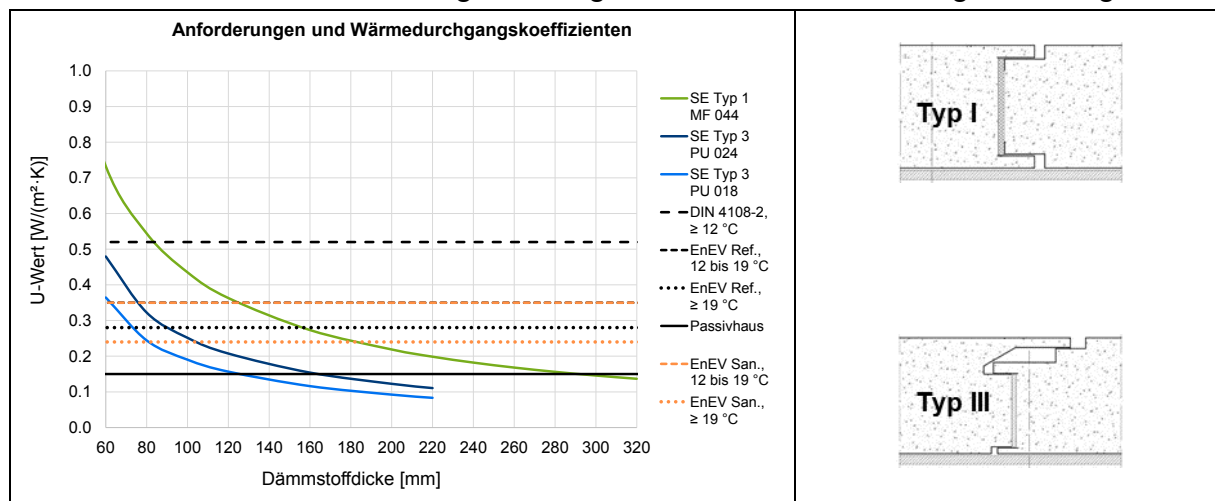


Abbildung 2-31: Thermische Qualität von Sandwichelementen (Wand)

Figure 2-31: Thermal quality of existing exterior walls made of sandwich panels (wall)

Das Diagramm zeigt, dass je nach verwendetem Dämmstoff bzw. Dämmstoff- / Elementdicke die geforderten maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten nicht ohne Einschränkung eingehalten werden können.

Für die Untersuchungen im Dachbereich wird der Fugentyp IV ebenfalls mit PU- und MW-Dämmung betrachtet. Als WLS wird dabei 025 bzw. 045 berücksichtigt. Die höhere Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe ergibt sich aus der Forderung, wonach die

Dachelemente im Gegensatz zu den Fassadenelementen eine entsprechende Tragfähigkeit senkrecht zum Elemente aufweisen müssen.

Die Ergebnisse der Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten sind in Abbildung 2-32 dargestellt. Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass auch für Sandwichdachelement die Anforderungswerte nicht ohne Einschränkungen eingehalten werden können.

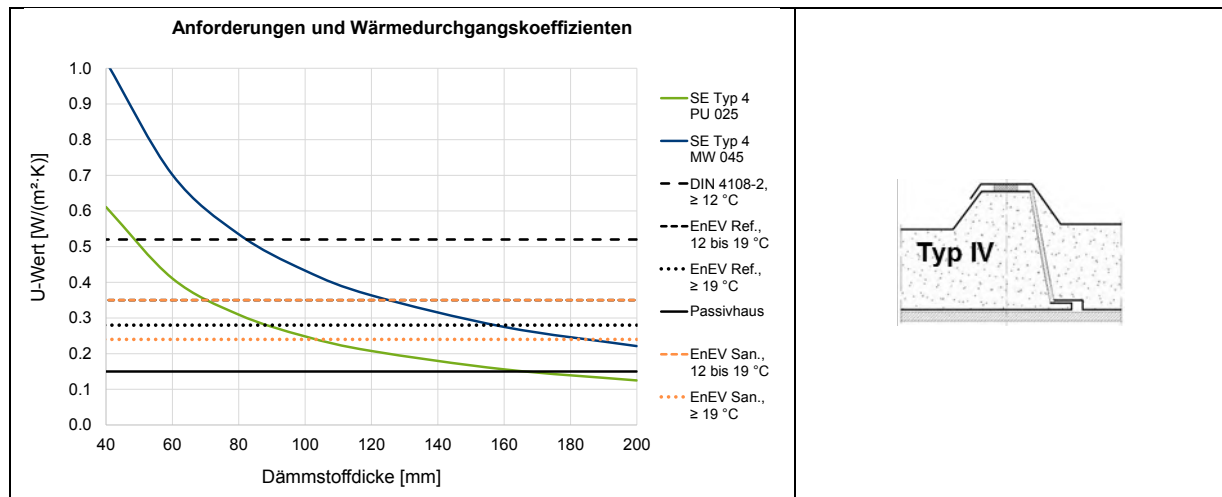


Abbildung 2-32: Thermische Qualität von Sandwichelementen (Dach)

Figure 2-32: Thermal quality of existing exterior walls made of sandwich panels (roof)

Sowohl für Sandwichwand- als auch für Sandwichdachelemente ergeben sich gerade im Bereich von geringen Elementdicken teilweise große Sanierungspotentiale.

2.2.2 Hygrische Qualität Hygic quality

2.2.2.1 Grundlagen Background

2.2.2.1.1 Allgemeines Preface

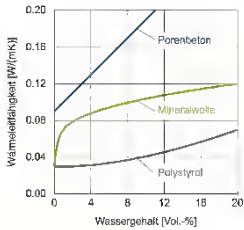
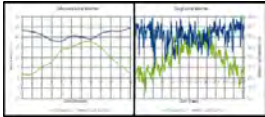

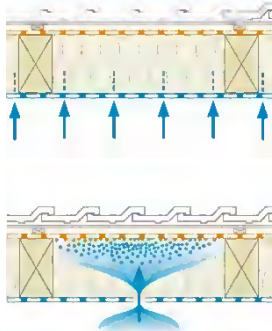
Die Bewertung der hygrischen, d.h. der feuchteschutztechnischen Qualität im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes orientiert sich an der Tauwasserfreiheit bzw. des Nachweises der Unschädlichkeit von auftretendem Kondensat im Bauteil.

Für den vorhandenen Gebäudebestand, der Gegenstand der Untersuchungen ist, wurde bis vor wenigen Jahren der Nachweis des Feuchteschutzes anhand von DIN 4108-3 [5] in Verbindung mit DIN 4108-2 [4] und in Ausnahmefällen DIN EN 13788 [30] geführt. Das in den verschiedenen Normen beschriebene Glaserverfahren geht für eindimensionale, homogene Bauteil von einer stationären bzw. quasistationären Betrachtung aus. Dabei werden mit Hilfe weniger Materialparameter vereinfacht die Temperatur- und die Wasserdampfdruckverteilung innerhalb des zu bewertenden Bauelementes ermittelt. Von entscheidender Bedeutung sind in diesem Kontext in angesetzten Klimarandbedingungen.

In Tabelle 2-4 sind exemplarisch Einflussfaktoren aufgeführt, die bei hygrothermischen Untersuchungen entsprechende Berücksichtigung finden können. Im simpelsten Fall wird bei konstanten Materialeigenschaften und stationären Klimarandbedingungen von homogenen, eindimensionalen Bauteilen ausgegangen, deren Verhalten bei einer vereinfachten Belastung bewertet wird. Die auf dieser Grundlage durchgeführte Betrachtung kann das reale Bauteilverhalten i.d.R. nur grob wiedergeben. Mit steigender Komplexität wird eine zunehmende Übereinstimmung mit den in der baupraktischen Realität auftretenden hygrothermischen Phänomenen erreicht.

Tabelle 2-4: Einflussfaktoren bei hygrothermischen Untersuchungen

Table 2-4: Influencing factors for hygrothermal investigations

Material-eigenschaften	Klimarandbedingungen	Bauteil-geometrie	Belastungen / Mechanismen																	
konstant – variabel	stationär – instationär	homogen – inhomogen	vereinfacht – komplex																	
Wärme-, Dampfdiffusionsleitfähigkeit, ...	Temperatur, relative Luftfeuchte, Solarstrahlung, ...	ein-, zwei-, dreidimensional	Diffusion, Konvektion, Schlagregen, ...																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Außenklima</th> <th colspan="2">Periode</th> </tr> <tr> <th>Tau</th> <th>Verdunstung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dauer</td> <td>90 d</td> <td>90 d</td> </tr> <tr> <td>Temperatur</td> <td>-5 °C</td> <td>(15 °C)</td> </tr> <tr> <td>Rel. Luftfeuchte</td> <td>80 %</td> <td>(70 %)</td> </tr> <tr> <td>Partialdampfdruck</td> <td>321 Pa</td> <td>1200 Pa</td> </tr> </tbody> </table> 	Außenklima	Periode		Tau	Verdunstung	Dauer	90 d	90 d	Temperatur	-5 °C	(15 °C)	Rel. Luftfeuchte	80 %	(70 %)	Partialdampfdruck	321 Pa	1200 Pa		
Außenklima	Periode																			
	Tau	Verdunstung																		
Dauer	90 d	90 d																		
Temperatur	-5 °C	(15 °C)																		
Rel. Luftfeuchte	80 %	(70 %)																		
Partialdampfdruck	321 Pa	1200 Pa																		

Für den Nachweis des Feuchteschutzes werden die Belastungen Schlagregen (von außen) sowie Tauwasser (von innen und außen) berücksichtigt. In Abbildung 2-33 sind die einwirkenden Beanspruchungen exemplarisch für ein vereinfachtes Kassettenelement dargestellt.

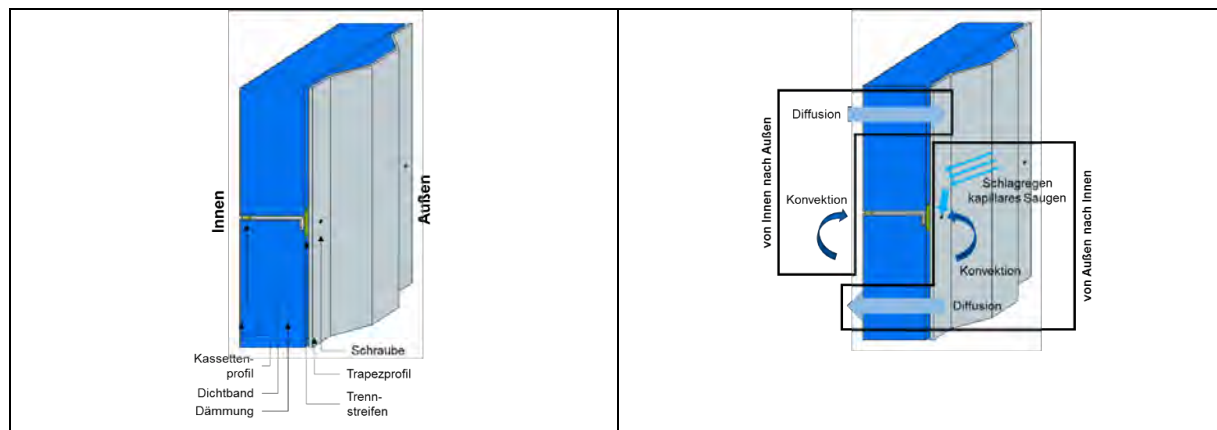
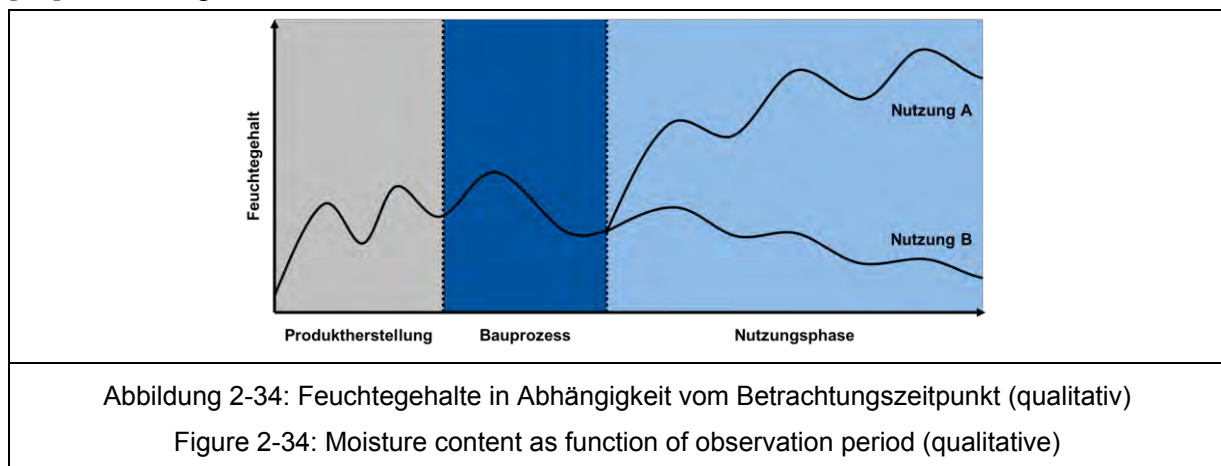


Abbildung 2-33: Feuchtebeanspruchungen und -einwirkungen

Figure 2-33: Moisture loads and impacts

Die Schlagregenbeanspruchung ist dabei von Standort, Witterung und Konstruktion abhängig; die Nachweisführung erfolgt dabei i.A. durch eine entsprechende baukonstruktive Ausbildung („baukonstruktive Vermeidung“, z.B. Dachüberstände o.ä.) bzw. die Verwendung von feuchteresistenten und -abweisenden Materialien. Demgegenüber wird die Tauwasserbelastung primär durch die Nutzung (siehe Abbildung 2-34) und Konstruktion beeinflusst – als Mechanismen treten Wasserdampfdiffusion und -konvektion auf; zur Vermeidung von Schäden infolge Konvektion wird pauschal eine luftdichte Gebäudehülle bzw. Bauteilkonstruktion erfordert, die entsprechend durch eine Luftdichtheitsprüfung gemäß DIN EN 12114 [31] und DIN EN 13829 [32] nachzuweisen ist. Um eine diffusionstechnische Schadensfreiheit sicherzustellen, sind einerseits die den Mindestwärmeschutz betreffenden Vorgaben nach DIN 4108-2 [4] einzuhalten und andererseits Bauteilnachweise nach DIN 4108-3 [5], DIN EN ISO 13788 [30] bzw. DIN EN 15026 [33] zu erbringen.



Für diese drei Normen ist nachfolgend unter Bezug auf Tabelle 2-4 in Tabelle 2-5 eine Einstufung der hinterlegten Berechnungsverfahren zusammengefasst.

Tabelle 2-5: Normen und Einflussfaktoren bei hygrothermischen Untersuchungen

Table 2-5: Standards and influencing factors for hygrothermal investigations

	DIN 4108-3	DIN EN ISO 13788	DIN EN 15026
Material-eigenschaften	konstant	konstant	variabel
Klimarandbedingungen	stationär (periodenweise Bilanzierung)	stationär (monatsweise Bilanzierung)	instationär
Bauteilgeometrie	eindimensional	eindimensional	z.T. mehrdimensional
Belastungen / Mechanismen	Diffusion	Diffusion	Diffusion
Nutzung	Wohngebäude	unabhängig	unabhängig

In diesem Zusammenhang heißt es in DIN 4108-3, die Norm gelte für „nicht klimatisierte Wohn- oder wohnähnlich genutzte Räume“ und verweist weiter hinsichtlich der Klimarandbedingungen auf DIN 4108-2. Die in DIN 4108-2 angegebenen

Randbedingungen im Bereich von Wärmebrücken gelten für „Wohn- und wohnähnliche Nutzung“. „Für abweichende Nutzungsrandbedingungen sind die erforderlichen Maßnahmen anhand des Raumklimas festzulegen.“

DIN EN ISO 13788 gilt demgegenüber nutzungsunabhängig, Angaben zu Klimarandbedingungen sind aber lediglich exemplarisch, d.h. nicht allgemeingültig. Das beschriebene Verfahren setzt einen „eindimensionalen Feuchtetransport“ voraus.

DIN EN 15026 gilt zur Vorhersage der „eindimensionalen transienten Wärme- und Feuchteübertragung in Bauteilen von mehrschichtigen Gebäudehüllen“. Die beschriebenen Gleichungen dürfen nicht angewendet werden, wenn u.a. „zweidimensionale Effekte eine bedeutende Rolle spielen (... Bedingungen im Bereich von Wärmebrücken ...)“.

Auf Bauwerksebene ist der Nachweis gegen Wasserdampfkonvektion bzw. der Nachweis der Luftdichtheit in der EnEV [3] bzw. DIN 4108-7 [34] geregelt. Dabei wird hinsichtlich der Luftwechselrate ein Wert von $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$ (ohne RLT) bzw. $1,5 \text{ h}^{-1}$ (mit RLT) gefordert. Durch Versuchsmessungen (BlowerDoor) kann eine entsprechende pauschalisiert Aussage für das Gesamtgebäude bzw. für den Gesamtbauteilquerschnitt getroffen werden. Allerdings lässt sich auf Grundlage dieser Aussage nicht eindeutig feststellen, in welcher Schicht oder Ebene des Gesamtbauteilquerschnitts die Luftdichtheit erzeugt wird. Abbildung 2-35 verdeutlicht diesen Effekt. Die BlowerDoor-Messung führt dabei in beiden Fällen zu demselben Ergebnis einer luftdichten Gebäudehülle.

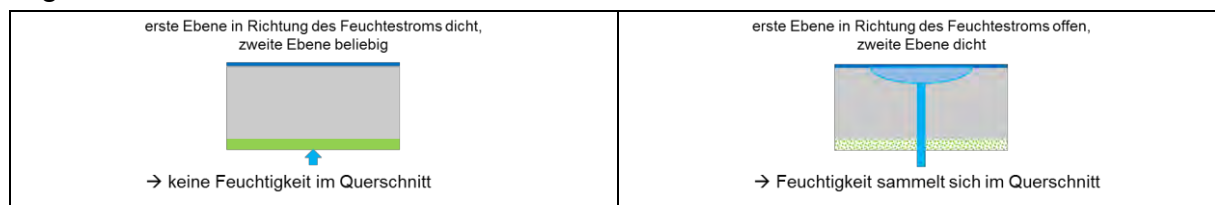


Abbildung 2-35: Einfluss der Lage der Luftdichtheitsebene (qualitativ)
 Figure 2-35: Impact of the position of the air tightness layer (qualitative)

Der Nachweis des Mindestwärmeschutzes in Zusammenhang mit Wasserdampfdiffusion ist in DIN 4108-3 mit Verweis auf DIN 4108-2 geregelt. Konkret bezieht sich der Nachweis auf die Begrenzung der relativen Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche. Als Grenzwerte sind dabei die in Abbildung 2-36 zu findenden relativen Luftfeuchten angegeben.

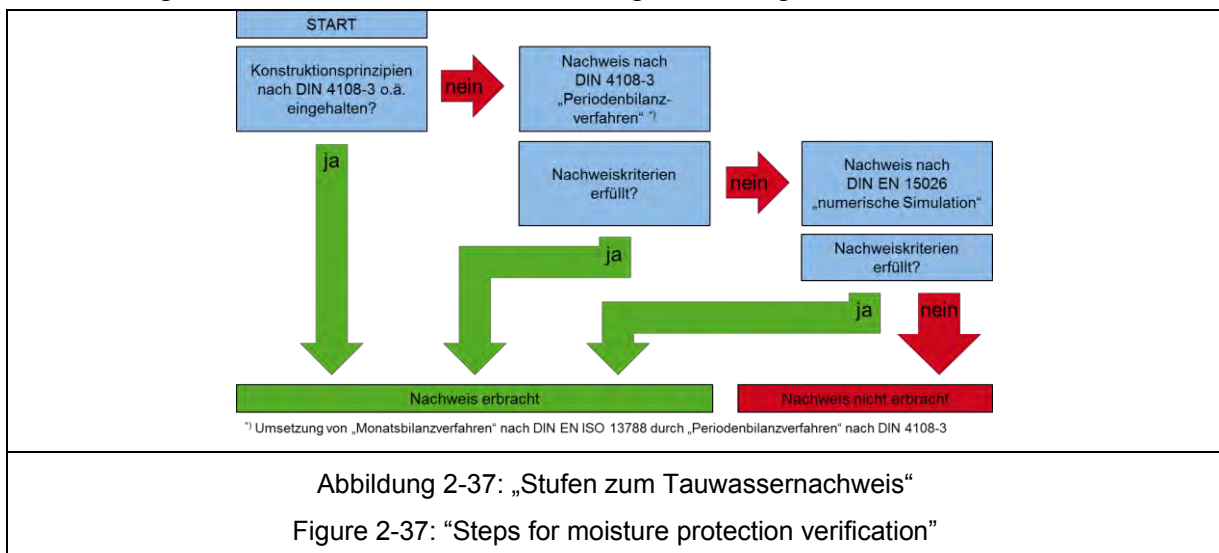
DIN 4108-3/ DIN EN ISO 13788	
Relative Luftfeuchte	
Tauwasser	$\varphi_{si} \leq 100 \%$
Schimmelpilz	$\varphi_{si} \leq 80 \%$
Korrosion	$\varphi_{si} \leq 60 \%$

Abbildung 2-36: Anforderungswerte für den Nachweis des Mindestwärmeschutzes
 Figure 2-36: Requirement values for the verifications of the minimal thermal protection

Die im Rahmen des Nachweises anzusetzenden Klimarandbedingungen sind in den entsprechenden Normen hinterlegt. Nach DIN 4108-3 bzw. -2 werden stationäre Außen- und Innenbedingungen gewählt, nach DIN EN ISO 13788 ist die Verwendung von standortabhängigen, realwetter-basierten Monatsmittelwerten Außen und der erwarteten Gebäudenutzung entsprechenden Innenbedingungen vorgeben.

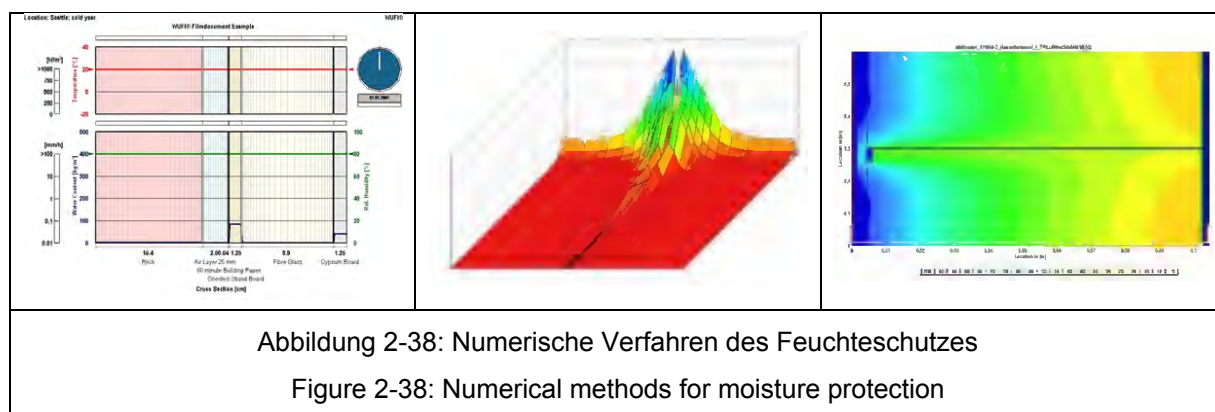
Der Nachweis gegen Schäden als Folge von Wasserdampfdiffusion im Bauteilinneren erfolgt nach DIN 4108-3 bzw. DIN EN ISO 13788. Zusätzlich zu diesen stationären Nachweisverfahren (vgl. Tabelle 2-5) ist die Verwendung von instationären Verfahren nach DIN EN 15026 möglich. Grundsätzlich gilt dabei, dass es im Bauteil nicht zu einer Netto-Akkumulation von Kondensat kommen darf; das Bauteil soll demnach innerhalb eines Klimazyklus wieder austrocknen können. Außerdem sind material-, konstruktions- sowie nutzungsspezifische Grenzwerte einzuhalten.

Die sich in diesem Gesamtkontext ergebenden Stufen, die für die Nachweisführung Anwendung finden können, sind in Abbildung 2-37 dargestellt.



Da es für den Bereich des Industrie- und Gewerbebaus keine normativen Randbedingungen gibt, werden nachfolgend auf Basis von DIN 4108-3 die Untersuchungen und Berechnungen durchgeführt. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass DIN 4108-3 explizit nur für wohn oder wohnähnlich genutzte Gebäude gilt. Ebenso beziehen sich DIN 4108-2 bzw. die dort verankerten klimatischen Angaben lediglich auf Wohngebäude.

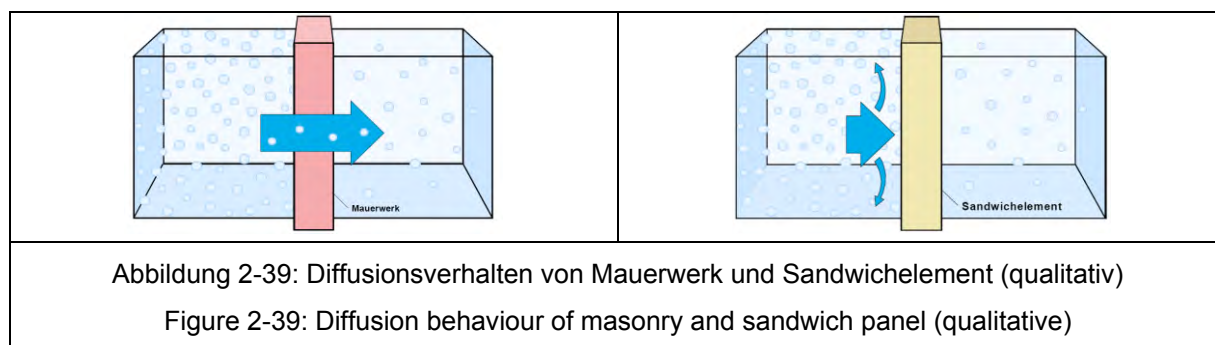
Neuere Verfahren, die eine größere Nutzungsunabhängigkeit bieten und einen größeren Anwendungsbereich abdecken, sind numerische Verfahren, deren Grundlagen seit einigen Jahren in DIN EN 15026 geregelt sind.



Im Hinblick auf Versuche, die zur Ermittlung und Bewertung der hygrischen Qualität von Bauteilen verwendet werden können, ist für die in-situ-Untersuchung wiederum die Infrarotthermografie anzuführen. Da insbesondere Faserdämmstoffe oft einen Teil ihrer Dämmeigenschaften verlieren, wenn sie feucht bzw. durchnässt sind, können diese Bereiche, die dann auch einen höheren Wärmedurchgang als benachbarte, trockene Bereiche aufweisen, ggf. als Schwachpunkte auf einer Infrarotaufnahme identifiziert werden.

Da der Betrachtungsschwerpunkt innerhalb des Forschungsvorhabens bei den Sanierungssystemen ausschließlich und bei den Bestandssystemen zu großen Teilen auf Bausystemen des Stahlleichtbaus liegt, ergeben sich diesbezüglich einige spezifische Aspekte, die zu beachten sind.

Stahl bzw. Stahlfeinblech sind hygrothermisch als luft- und dampfdicht anzusehen, so dass weder Wasserdampfkonvektion noch -diffusion durch das Material auftritt (siehe Abbildung 2-39). Für Sandwich- und Kassettenelemente bedeutet dies, dass der (homogene) Elementbereich als unkritisch einzustufen ist, wohingegen Anschlüsse, Fugen sowie Fehlstellen von besonderem Interesse sind. Die verwendeten Materialien sind i.d.R. als feuchteresistent anzusehen.

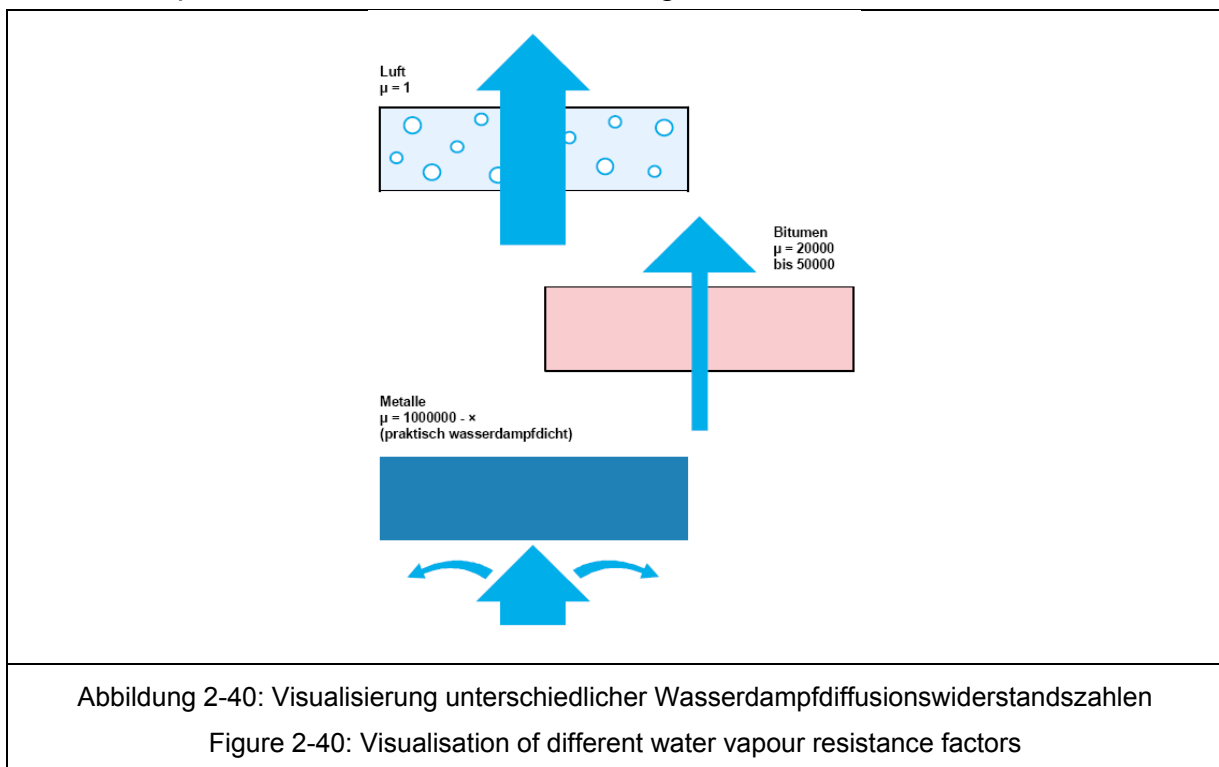


2.2.2.1.2 Bewertung nach DIN 4108-3 Evaluation according to DIN 4108-3

Physikalisch kann jeder Wasserdampfkonzentration v [kg/m³], die angibt, welche Menge (Masse) Wasser(dampf) in einem Luftvolumen vorhanden ist, ein entsprechender Wasserdampfdruck p [Pa] zugeordnet werden. Die maximale Wasserdampfkonzentration v_s bzw. der maximale Wasserdampfdruck p_s ist dabei nur abhängig von der vorhandenen Temperatur θ [°C]. Das Verhältnis von vorhandener zu maximaler Wasserdampfkonzentration bzw. von vorhandenem zu maximalem

Wasserdampfdruck wird als relative Luftfeuchte ϕ [%] bezeichnet. Demgegenüber die vorhandene Wasserdampfkonzentration auch als absolute Luftfeuchte bezeichnet.

Für die feuchteschutztechnische Bewertung von Bauteilen nach DIN 4108-3 oder DIN EN ISO 13788 sind zwei Materialeigenschaften erforderlich. Aufgrund der engen Verbindung zwischen Wärme und Feuchte ist zunächst die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] von Bedeutung. Diese Größe ist ein Maß für das Wärmedämmvermögen des jeweiligen Baustoffs. Daneben muss die Wasserdampfdurchlässigkeit bekannt sein. Diese kann einerseits mit Hilfe der Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit δ [kg/(m·s·Pa)] ausgedrückt werden; anschaulich entspricht diese hygrische Größe der thermischen Wärmeleitfähigkeit. Andererseits können die diffusionstechnischen Eigenschaften eines Baustoffes auch mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] beschrieben werden. I.d.R. findet diese Größe Anwendung. Aus bauphysikalischer Sicht handelt es sich dabei um einen relativen Wert, der die hygrischen Eigenschaften des Baustoffes im Vergleich zur Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit von Luft δ_0 angibt. Im baupraktisch relevanten Bereich kann für δ_0 ein Zahlenwert von $2 \cdot 10^{-10}$ kg/(m·s·Pa) angesetzt werden (vgl. auch DIN 4108-3). In Abbildung 2-40 sind verschiedene Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen dargestellt.



Für Folien und Abdichtungsschichten wird z.T. direkt die äquivalente Luftschichtdicke s_d [m] als weitere diffusionstechnische Kenngröße angegeben. Sie ergibt sich als Produkt aus Diffusionswiderstandszahl μ und der Schichtdicke d [m] und beschreibt, wie dick eine Luftschicht sein muss, um denselben Diffusionswiderstand wie die Materialschicht zu besitzen.

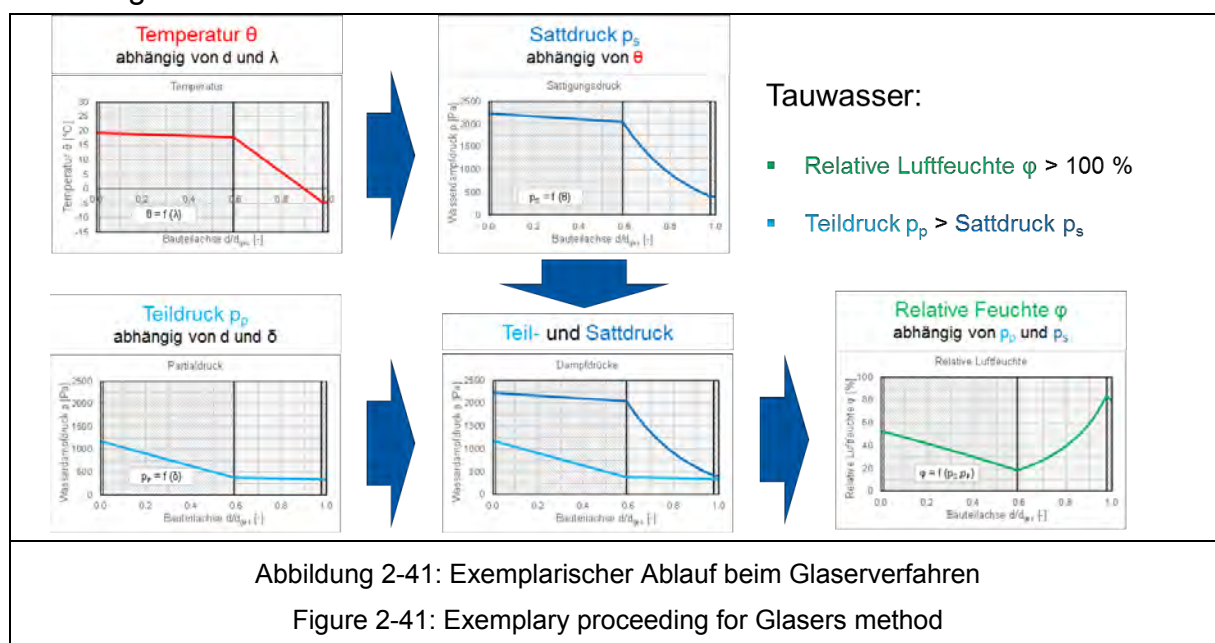
Neben den Materialeigenschaften sind die auftretenden bzw. anzusetzenden Klimarandbedingungen notwendig. Dazu zählen die Temperaturen θ und die relativen Luftfeuchten ϕ bzw. die Wasserdampfdrücke p der Umgebung innen und außen. Außerdem sind die Übergangswiderstände (thermisch R_s [m²·K/W], hygrisch

Zs [m²·s·Pa/kg]) bzw. Übergangskoeffizienten (thermisch h_s [W/(m²·K)], hygrisch β_s [kg/(m²·s·Pa)]) für die Beurteilung erforderlich. Die hygrischen Übergangparameter werden in diesem Kontext allerdings i.A. vernachlässigt.

Das Vorgehen zur Bewertung der feuchteschutztechnischen Unbedenklichkeit einer Konstruktion nach DIN 4108-3 lässt sich anhand der nachfolgend aufgeführten Schritte erläutern.

- Bestimmung des Verlaufs der Temperatur θ in Abhängigkeit von d und λ
- Bestimmung des Verlaufs des Wasserdampf-sättigungsdrucks p_s in Abhängigkeit von θ
- Bestimmung des Verlaufs des Wasserdampfpartialdrucks p_p in Abhängigkeit von d und δ
- Bestimmung des Verlaufs der relativen Luftfeuchte ϕ in Abhängigkeit von p_p und p_s

Dieser Ablauf beschreibt das sog. Glaserverfahren und ist exemplarisch in Abbildung 2-41 dargestellt.



In Zusammenhang mit dem beschriebenen Vorgehen und den bisherigen Ausführungen ist auf die (normativen) Anwendungsgrenzen des Glaserverfahrens hinzuweisen.

Da es sich um ein eindimensionales Verfahren handelt, lassen sich mehrdimensionale Strukturen nicht betrachten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Möglichkeiten untersucht, eine entsprechende Übertragung auf zweidimensionale Fragestellungen des Stahlleichtbaus aufzuzeigen. Dieser Ansatz wird an entsprechender Stelle in Abschnitt 2.2.2.3 vorgestellt, im weiteren Verlauf aber nicht weiter verfolgt.

Als weitere Beschränkung ist auf die Vernachlässigung von ggf. dominanten Transportphänomenen hinzuweisen. Das Verfahren erfasst ausschließlich den Diffusionsanteil des Feuchtetransports.

Ebenso sind insbesondere die normativ nicht erfassten Klimarandbedingungen, die beispielsweise bei Industrie- und Gewerbegebäuden auftreten, als Begrenzung für das Verfahren zu betrachten.

Schließlich kann Materialverhalten, das abhängig von Zeit, Temperatur oder Feuchtegehalt ist, nicht berücksichtigt werden.

2.2.2.1.3 Bewertung nach DIN EN 15026 Evaluation according to DIN EN 15026

Für die Grundlagen der Bewertung nach DIN EN 15026 wird an dieser Stelle auf die entsprechende Norm verwiesen. Allerdings soll im Folgenden kurz das in der Norm hinterlegte Vergleichsbeispiel vorgestellt werden. Dazu heißt es im Anhang A der Norm:

Vergleichsbeispiel — Feuchteaufnahme in einem semi-infiniten Bereich

A.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt ist eine genommene Vergleichsprüfung angegeben, die sicherstellen soll, dass die anzuwendende Software einige grundlegende Anforderungen erfüllt und Ergebnisse liefert, die innerhalb festgelegter Toleranzen korrekt sind. Das Prüfergebnis beruht auf einer analytischen Lösung für eine gekoppelte Feuchte- und Wärmeströmung in einem semi-infiniten Bereich.

ANMERKUNG Darüber hinaus sind komplexere Vergleichsbeispiele im Literaturhinweis [4] angegeben.

A.2 Problembeschreibung

In der Prüfung wird ein dicker einzelner homogener Baustoff im Gleichgewicht mit einem konstanten Umgebungsklima behandelt. Der Baustoff ist vollkommen luftdicht. Zu einem bestimmten Zeitpunkt verändern sich Temperatur und relative Feuchte sprunghaft. Die Aufgabe besteht in der Berechnung der Temperatur- und Feuchteprofile zu unterschiedlichen Zeiten nach dieser Änderung.

- Anfangsbedingung: $\varphi = 50 \%$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- nach der sprunghaften Änderung: $\varphi_s = 95 \%$, $T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Grenzwiderstände und Regenaufprall werden nicht berücksichtigt.

Ziel ist die Berechnung der Feuchte- und Temperaturverteilung nach 7 Tagen, 30 Tagen und 365 Tagen.

Eigenschaften

a) Allgemeine Daten

$T = T_{\text{ref}} = 293,15 \text{ K}$

$\rho_w = 1\,000 \text{ kg/m}^3$

$R_{\text{H}_2\text{O}} = 462 \text{ J/(kg}\cdot\text{k)}$

b) Baustoffdaten

Wasserrückhaltekurve:

$$w = \frac{146}{(1 + (8 \times 10^{-8} s)^{18})^{0,375}}$$

$$s = 0,125 \times 10^8 \left(\frac{146}{w} \right)^{0,375} - 1$$

Sorptionsisotherme:

$$w = \frac{146}{(1 + (-8 \times 10^{-8} \cdot R_{H_2O} T \rho_w \ln(\phi))^{18})^{0,375}}$$

$$\phi = \exp \left(- \frac{1}{R_{H_2O} T \rho_w} - 0,125 \times 10^8 \left(\frac{146}{w} \right)^{0,375} - 1 \right)$$

Dampfdiffusion:

$$\delta_P = \frac{M_w}{R_{H_2O} T} \frac{26,1 \times 10^{-6}}{200} \frac{1 - \frac{w}{146}}{0,503 \left(1 - \frac{w}{146} \right)^2 + 0,497}$$

Durchlässigkeit von Flüssigwasser:

$$K = \exp(-39,2619 + 0,0704 \cdot (w - 73) - 1,7420 \times 10^{-4} \cdot (w - 73)^2 - 2,7953 \times 10^{-6} \cdot (w - 73)^3 - 1,1566 \times 10^{-7} \cdot (w - 73)^4 + 2,5969 \times 10^{-9} \cdot (w - 73)^5)$$

Porosität: gleiches Maximum der Feuchtespeicherfunktion.

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 1,5 + \frac{15,8}{1000} w$

Wärmekapazität bei trockenen Baustoffen: $\rho_0 c_0 = 1,824 \times 10^6$

A.3 Ergebnisse

In den Bildern A.1 und A.2 stellt die durchgehende Linie die analytische Lösung dar; die punktierten Linien zeigen das Intervall von -2,5 % und +2,5 %. Die berechneten Ergebnisse müssen innerhalb der in Tabellen A.1 und A.2 angegebenen Gültigkeitsgrenzen liegen.

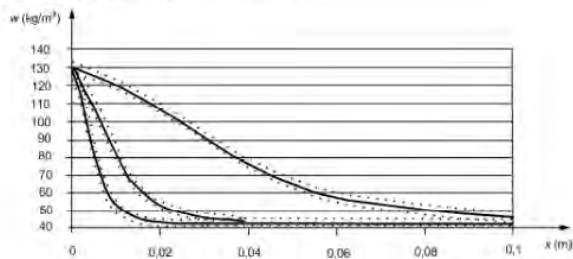


Bild A.1 — Feuchteverteilung nach 7 Tagen, 30 Tagen und 365 Tagen

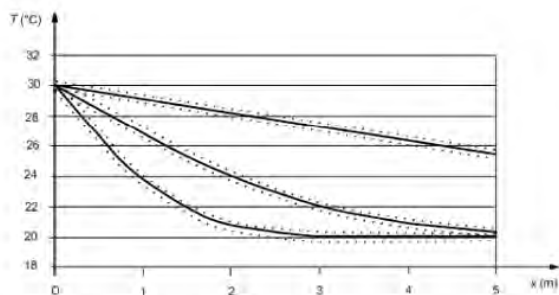
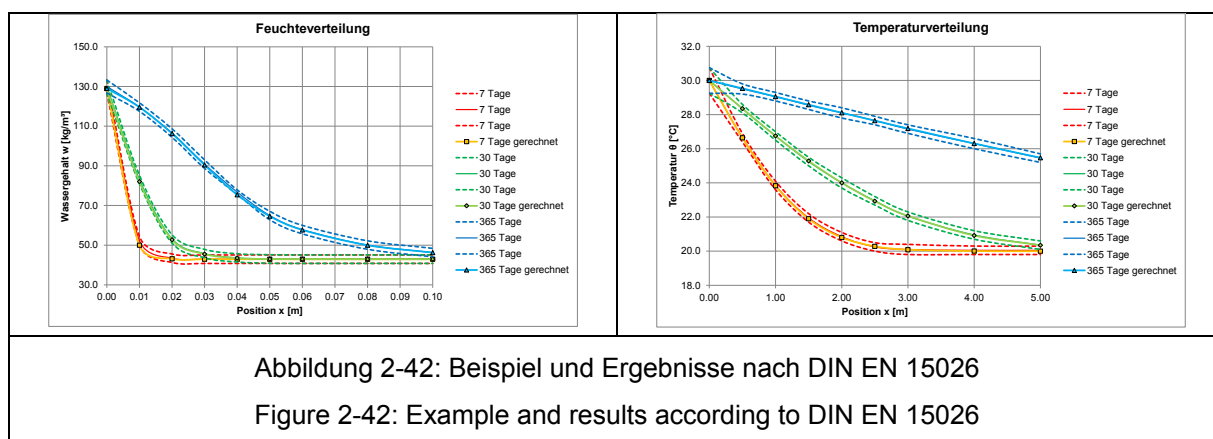


Bild A.2 — Temperaturverteilung nach 7 Tagen, 30 Tagen und 365 Tagen

Diese Vergleichsrechnung wurde durchgeführt. In Abbildung 2-42 sind die vorgegebenen sowie die ermittelten Ergebnisse dargestellt. Da nur sehr geringe Abweichungen auftreten, wird das angewandte Verfahren im Sinne von DIN EN 15026 als zulässig eingestuft.



2.2.2.2 Massive Bauweise Massive constructions

Zur Ermittlung der feuchteschutztechnischen Qualität von Massivbauwänden, die aus Beton, Porenbeton oder Mauerwerk bestehen, werden materialspezifisch unterschiedliche Varianten betrachtet. Die beiden Ausgangsvarianten bestehen jeweils aus dem ungedämmten Baustoff mit der minimalen und maximalen Dicke nach Abschnitt 2.2.1.2 mit einer raumseitig angeordneten Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 8 m. Weiter werden für diese Ausgangsvarianten jeweils Fälle mit Innen- und Außenputz berücksichtigt.

Für die beiden Baustoffe Beton und Mauerwerk werden anschließend für die zuvor betrachteten Fälle noch Varianten mit unterschiedlichen Dämmstoffdicken (Außendämmung) betrachtet.

Die angesetzten Materialeigenschaften sind in Tabelle 2-6 zusammengestellt. Grundlage der gewählten Parameter ist DIN EN ISO 10456 und DIN 4108-4.

Tabelle 2-6: Hygrothermische Materialeigenschaften bei Massivbauwänden

Table 2-6: Hygrothermal material properties for massive walls

	Dicke d [mm]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusions- widerstandszahl μ [-]
Beton	100 250	2,5	130
Porenbeton	100 500	0,1	10
Mauerwerk	100 490	1,0	25
Dampfbremse	1	0,5	8.000
Innenputz	5	0,4	10
Außenputz	10	1,0	10
Wärmedämmung	60 160	0,04	1

Nachfolgend sind die auf Grundlage von DIN 4108-3 ermittelten Temperaturverläufe im homogenen Regelbereich dargestellt (Abbildung 2-43 bis Abbildung 2-45).

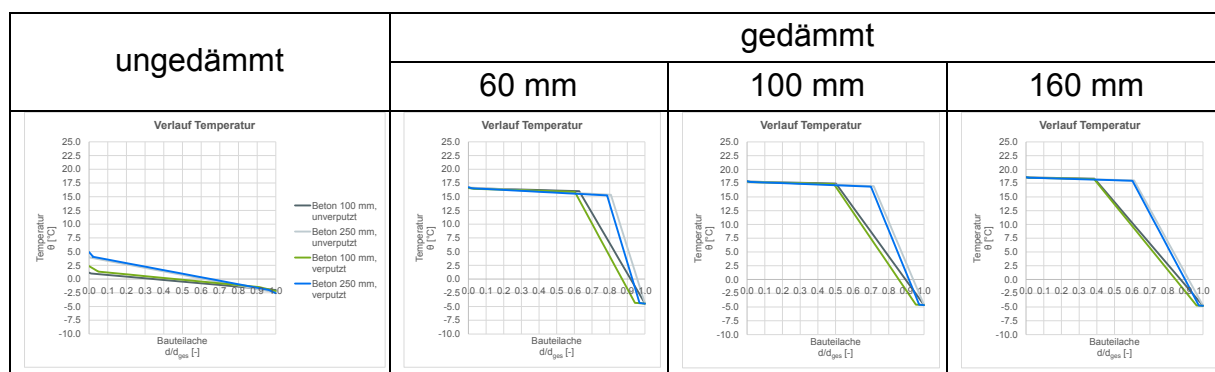


Abbildung 2-43: Temperaturverläufe Betonwände

Figure 2-43: Temperature distribution concrete walls

Für die ungedämmten Betonwände zeigt sich, dass der gesamte Wandquerschnitt Temperaturen zwischen 5 und $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorweist. Die Ursache hierfür ist die mangelhafte Wärmedämmwirkung des Baustoffs Beton. Der Temperaturabbau erfolgt verfahrensbedingt fast ausschließlich durch die Übergangswiderstände. Wird allerdings eine Dämmschicht angeordnet, zeigt sich, dass der Temperaturgradient nahezu vollständig im Dämmquerschnitt verläuft. Die Temperatur im Betonquerschnitt bleibt auch in diesem Fall relativ konstant, allerdings auf dem Niveau der raumseitig anliegenden Randbedingung.

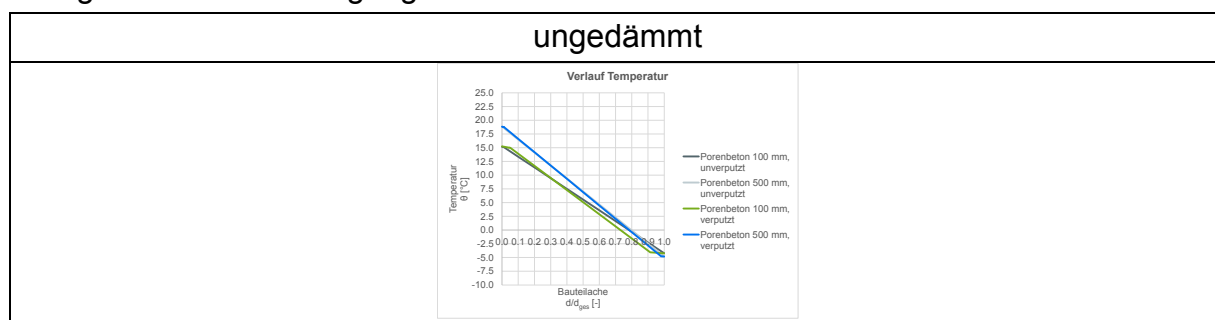


Abbildung 2-44: Temperaturverläufe Porenbetonwände

Figure 2-44: Temperature distribution gas concrete walls

Bei ungeämmten Porenbetonwänden ergibt sich aufgrund der verhältnismäßig guten thermischen Eigenschaften des Baustoffs ein Temperaturverlauf, der zwischen etwa $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Die thermische Qualität kann durch eine zusätzliche Dämmschicht wahrscheinlich weiter verbessert werden, aber ist aus feuchtetechnischer Sicht der Verhalten der ungedämmten Porenbetonwand bereits vergleichsweise günstig.

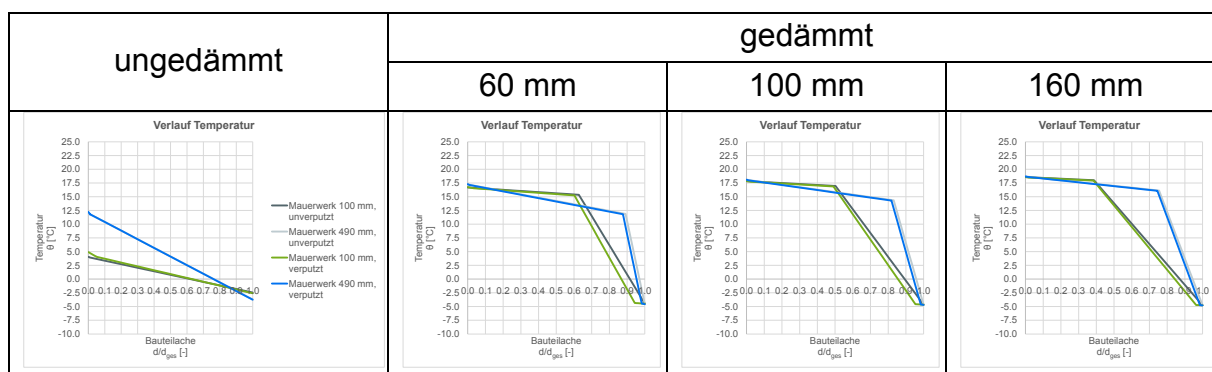


Abbildung 2-45: Temperaturverläufe Mauerwerkswände

Figure 2-45: Temperature distribution masonry walls

Die Temperaturverläufe, die für massive Mauerwerkswände bestimmt wurden, entsprechen qualitativ denen der Betonwände. Auch hier zeigt sich im ungedämmten Fall, dass die Temperaturen im gesamten Querschnitt zu gering sind. Erst durch eine zusätzliche Dämmschicht lässt sich dieses Verhalten verbessern.

Anhand der Temperaturverläufe kann mit den in DIN 4108-3 angegebenen mathematisch-bauphysikalischen Zusammenhängen der Verlauf der Wasserdampf-sättigungsdrücke bestimmt werden. Für die betrachteten Varianten sind in Abbildung 2-46, Abbildung 2-47 und Abbildung 2-48 Darstellungen zu finden.

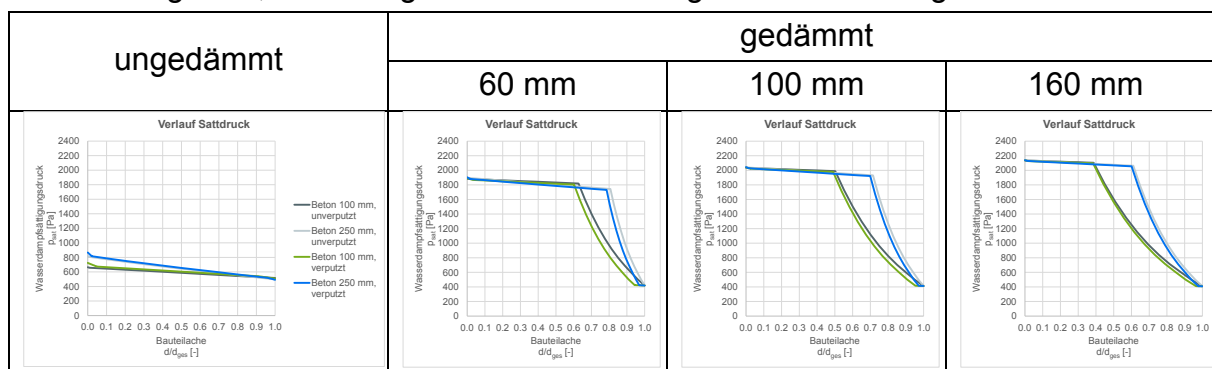


Abbildung 2-46: Sättigungsdruckverläufe Betonwände

Figure 2-46: Saturation pressure distribution concrete walls

Da der Verlauf der Sättigungsdrücke im Bauteilquerschnitt affin zu dem zugehörigen Temperaturprofil ist, lassen sich die Berechnungsergebnisse und -diskussionen mit Verweis auf die Ausführungen bzgl. der Temperaturen zusammenfassen.

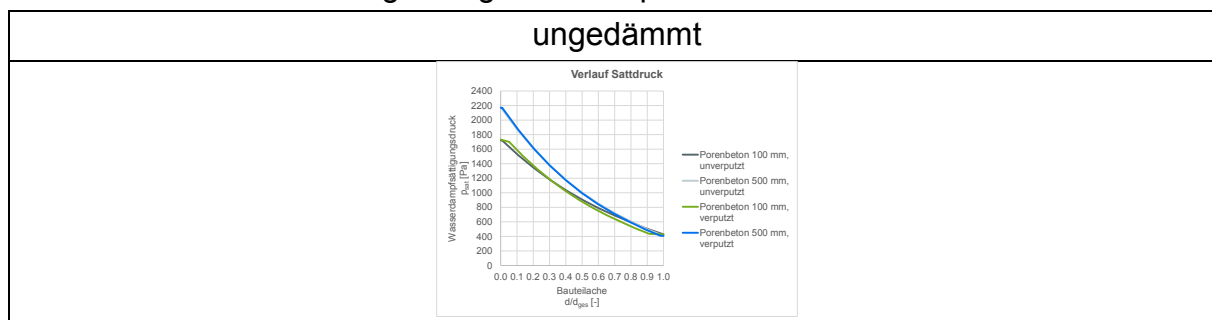


Abbildung 2-47: Sättigungsdruckverläufe Porenbetonwände

Figure 2-47: Saturation pressure distribution gas concrete walls

Ist die Temperatur bzw. der Temperaturverlauf im Bauteil niedrig (z.B. bei der ungedämmten Beton- oder Mauerwerkswand), so ergeben sich auch nur geringe Sättigungsdampfdrücke. Unabhängig von den konkret auftretenden oder angesetzten Einwirkungsgrößen der Wasserdampfpartialdrücke erhöht sich dadurch das Risiko der Tauwasserbildung.

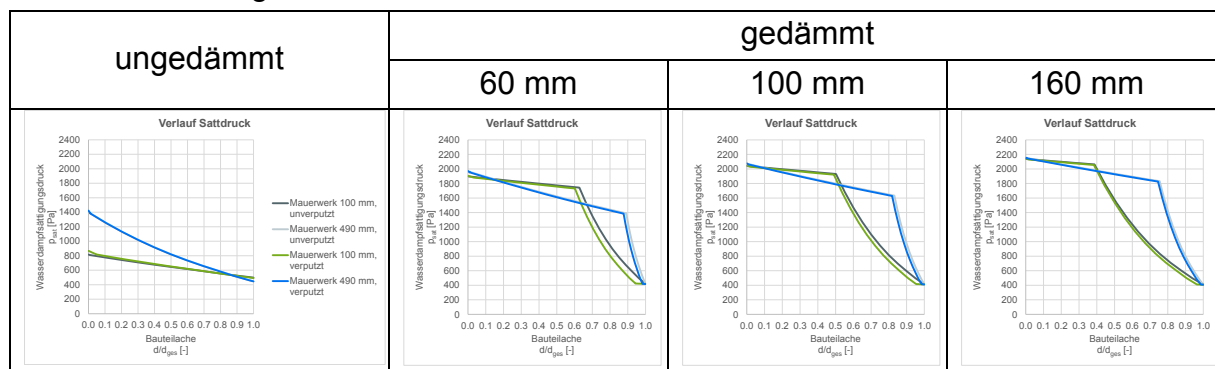


Abbildung 2-48: Sättigungsdruckverläufe Mauerwerkswände

Figure 2-48: Saturation pressure distribution masonry walls

Die unter Verwendung des Verfahrens nach DIN 4108-3 berechneten Verläufe des Wasserdampfpartialdrucks sind für die untersuchten Massivbaukonstruktionen in Abbildung 2-49 bis Abbildung 2-51 zusammengestellt.

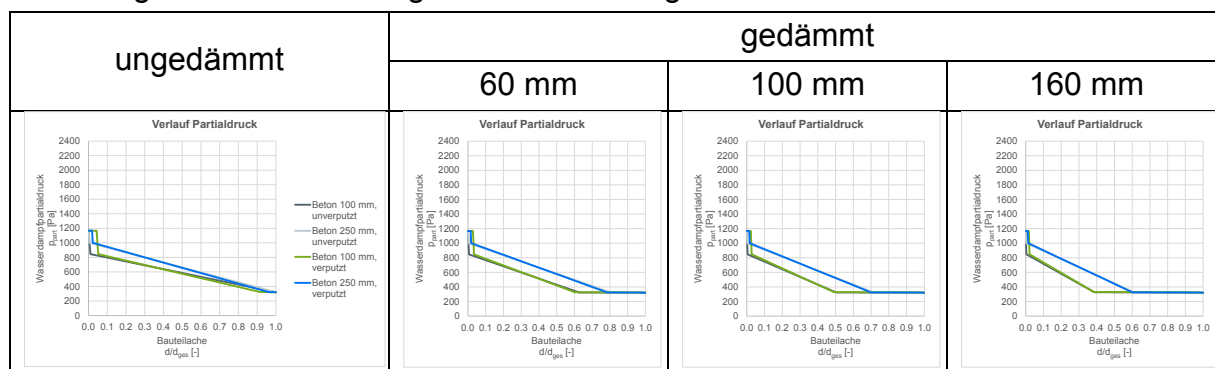
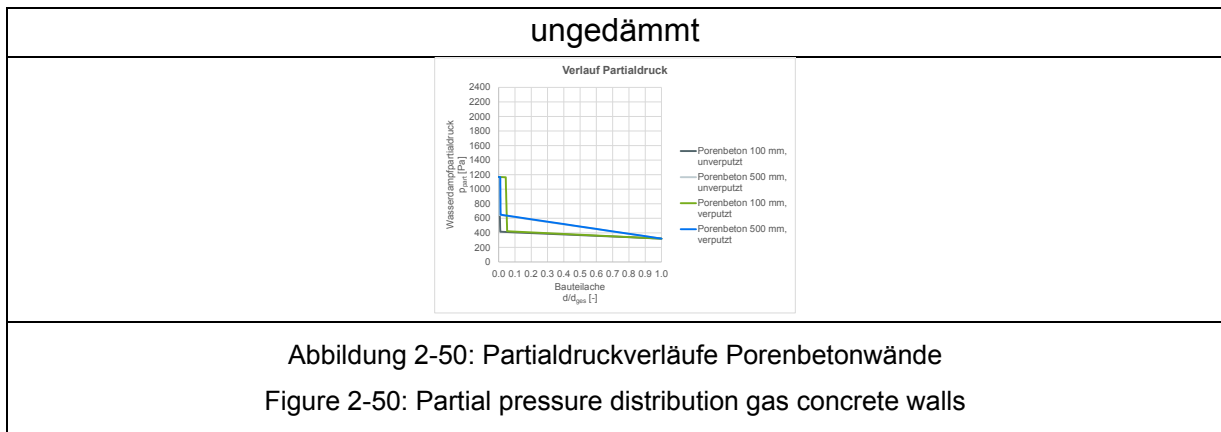


Abbildung 2-49: Partialdruckverläufe Betonwände

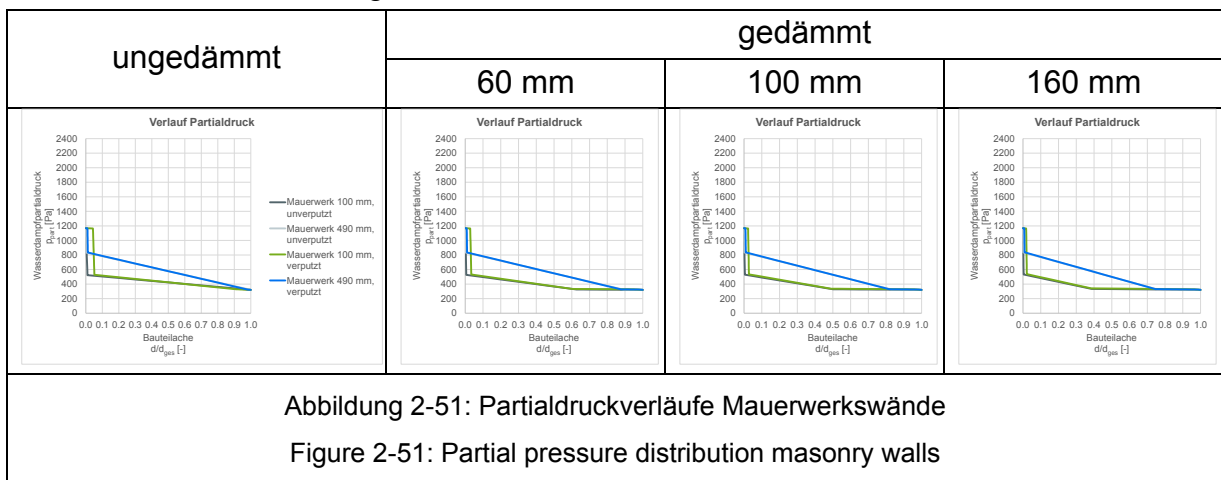
Figure 2-49: Partial pressure distribution concrete walls

Die auftretenden Partialdruckprofile im Querschnitt ergeben sich auf Grundlage der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen der einzelnen Baustoffschichten und der vorliegenden Schichtenfolge. Da der Beton einen um mehr als den Faktor 100 größeren Diffusionswiderstand als die Dämmung besitzt, erfolgt der Abbau der Partialdruckdifferenz praktisch komplett in der Betonschicht.

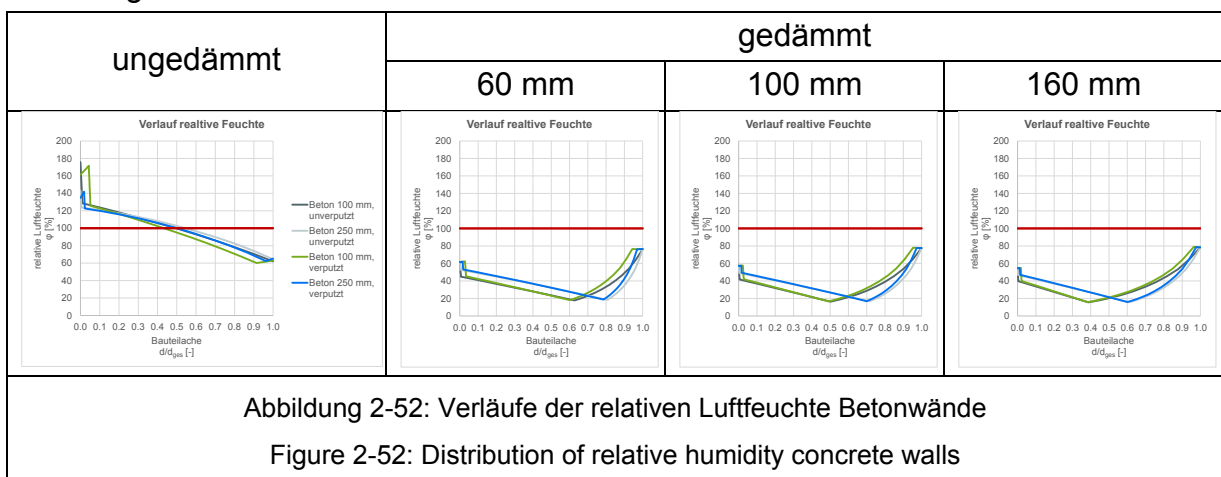
Grundsätzlich sollte der Partialdruck in den wärmeren Bereich der Baukonstruktion abgebaut werden, da so eine Überschreitung des maximal zulässigen Sättigungsdruckes vermieden werden kann. Da in den betrachteten Fällen mit Wärmedämmung die für den Partialdruckabbau relevante Betonschicht auf der warmen (Innen-)Seite des Dämmstoffs liegt, darf hier angenommen werden, dass diese Varianten sich als feuchtetechnische unbedenklich erweisen werden. Demgegenüber ist für den ungedämmten Fall aufgrund der niedrigen Temperaturen die tauwasserspezifische Unbedenklichkeit fraglich.



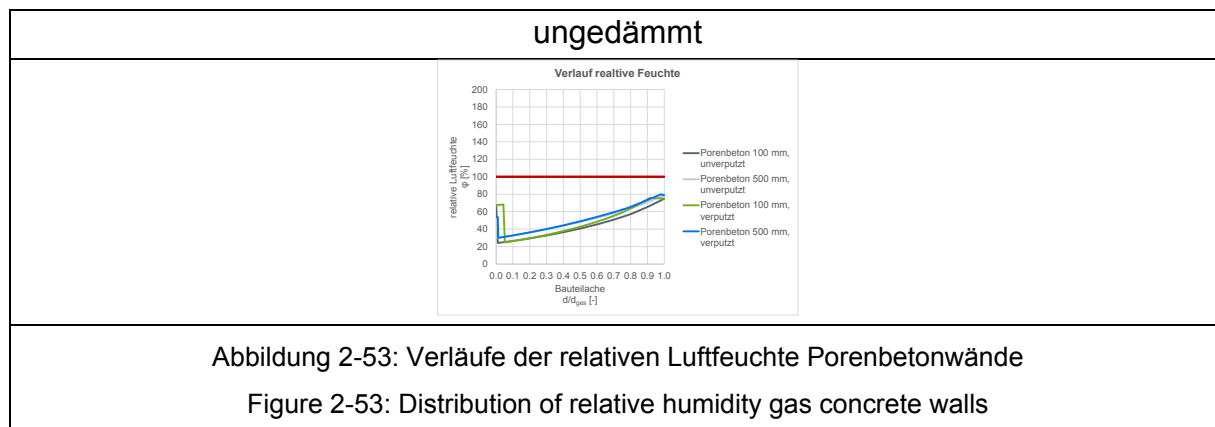
Wie die Ergebnisse der Berechnungen der ungedämmten Porenbetonwände zeigen, erfolgt der Abbau des Partialdrucks zu wesentlichen Teilen im Bereich der Innenoberfläche des Bauteils. Da hier zusätzlich von entsprechend hohen Temperaturen ausgegangen werden kann, steht zu vermuten, dass diese Varianten diffusivtechnisch zulässig sind.



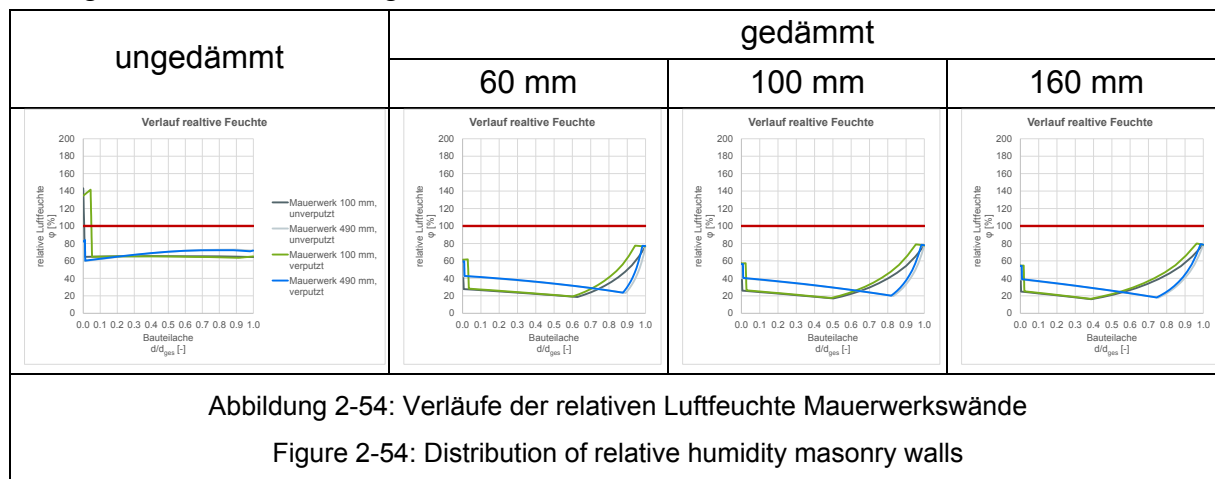
Hinsichtlich der Mauerwerkswände sei erneut auf die Ausführungen zu den massiven Betonwänden verwiesen, da bei Konstruktionstypen ähnliche Ergebnisse vorweisen. Unter Ansatz der relativen Luftfeuchte als Quotient aus Partial- und Sättigungsdruck kann die relative Luftfeuchte ermittelt werden. Die für die entsprechende Variante ermittelten Verläufe sind nachfolgend in Abbildung 2-52, Abbildung 2-53 und Abbildung 2-54 dargestellt.



Für ungedämmte Betonwände zeigt sich, dass aufgrund des ungenügenden thermischen Verhaltens auf Grundlage des Berechnungsansatzes nach DIN 4108-3 nahezu in der gesamten inneren Bauteilhälfte die relative Luftfeuchte rechnerisch über 100 % liegt. Die ergibt sich unabhängig von der Anordnung einer Dampfbremse. Erst durch die zusätzliche Wärmedämmschicht kann das Bauteilverhalten maßgeblich verbessert werden, so dass nicht nur wie in Abschnitt 2.2.1.2 erörtert die thermische Qualität gesteigert sondern auch das hygrothermische Verhalten positiv beeinflusst werden kann.



Bei ungedämmten Porenbetonwänden ist das hygrothermische Verhalten bedingt durch die verhältnismäßig gute thermische Qualität ebenfalls als positiv einzuordnen. Dabei ist der Einfluss der Dampfbremse für den Gesamtquerschnitt nur von untergeordneter Bedeutung.



Hinsichtlich der Bewertung der nicht gedämmten Mauerwerkswände ist darauf hinzuweisen, dass der Einfluss der Mauerwerksdicke einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss hat. Für die minimale betrachtete Dicke von 100 mm ergeben sich im Bereich der Innenoberfläche relative Luftfeuchten, die rechnerisch über 100 % liegen. Demgegenüber liegen die relativen Luftfeuchten für die maximale Dicke von 490 mm in diesem Bereich bei etwa 80 bis 85 %, sodass zumindest keine Tauwasserbildung zu erwarten ist. Für die gedämmten Varianten ist im Sinn von DIN 4108-3 von einer feuchtetechnischen Zulässigkeit auszugehen.

Da im weiteren Verlauf insbesondere die Varianten ohne Dämmschicht Gegenstand der Untersuchungen sein werden, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, für diese Fälle die nach DIN 4108-3 anfallenden Tauwassermassen zu bestimmen. Außerdem sind

gerade diese Varianten auch aus thermischer Sicht für aktuelle und zukünftige Anforderungen als nicht ausreichend einzustufen.

2.2.2.3 **Stahlleichtbauweise** **Lightweight steel constructions**

2.2.2.3.1 **Kassettenelemente** *Liner tray elements*

Für die feuchteschutztechnische Untersuchung von Kassettenelementen wird im weiteren Verlauf vorausgesetzt, dass das den äußeren Bauteilabschluss (Witterungsschutz) bildende Einzelbauelement (z.B. Trapezprofil, Siding) zumindest teilweise hinterlüftet ist. Aus thermischer Sicht ist diese Einzelschicht daher nicht zu berücksichtigen. Im Hinblick auf das hygrische Verhalten wird vor diesem Hintergrund daher angenommen, dass diese Schicht ebenfalls vernachlässigt werden kann. Tauwasser / Kondensat, das zwischen Dämmung und äußerem Bauteilabschluss ggf. entstehen kann, kann infolge der Hinterlüftung konvektiv abtrocknen.

Der betrachtete Bauteilaufbau besteht somit aus dem raumseitigen Kassettenprofil und der darin eingelegten Dämmung sowie u.U. der Zusätzlichen Dämmschicht. Die zwei- bzw. dreidimensionalen Effekte, die aufgrund der geometrischen Ausbildung auftreten, sind verfahrenstechnisch nicht abbildbar.

Als Varianten werden entsprechend Abschnitt 2.2.1.3 die Ausführungen mit 3 mm Trennstreifen, mit 40 mm und mit 80 mm zusätzlicher Dämmschicht untersucht. Die Kassettenprofilhöhe zu 90, 120, 160, 200 und 240 mm gewählt, die Profildicke wird mit 1,5 mm angesetzt.

Die Materialeigenschaften von Stahl und Dämmung werden nach DIN 4108-4 [27] und DIN EN ISO 10456 [28] gewählt und sind nachfolgend in Tabelle 2-7 aufgeführt. Für Stahl als Material ergibt sich dabei die Problematik, dass er sowohl dampf- als auch luftdicht ist. Die zugehörigen Dampf- und Luftleitfähigkeiten sind daher Null, bzw. die entsprechenden Widerstände Unendlich. Für den Wasserdampfdiffusionswiderstand wird in diesem Kontext in DIN EN ISO 13788 [30] angegeben, dass für Berechnungsverfahren ein finiter Wert von 100.000 angenommen werden sollte.

Tabelle 2-7: Hygrothermische Materialeigenschaften bei Kassettenelementen

Table 2-7: Hygrothermal material properties for liner tray elements

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Stahl	50	100.000
Mineralwolle	0,035	1

Die im weiteren Verlauf vorgestellten Berechnungen beziehen sich auf das Handrechenverfahren nach DIN 4108-3 [5]. Im ersten Schritt ist dabei der Temperaturverlauf im Bauteilquerschnitt für die angesetzten thermischen Randbedingungen zu ermitteln. Wie in Abbildung 2-55 zu sehen ist, ergeben sich unabhängig von der konkreten Variante sehr ähnliche Verläufe. Dies liegt u.a. auch an der gewählten Darstellungsart. Auf der x-Achse ist jeweils die normierte Bauteilachse wiedergegeben; durch Multiplikation mit der konkreten Bauteildicke (z.B. 130 mm für

die Variante „KAS 090 + 40 mm Zusatzdämmung“) lässt daraus die geometrische Bauteilachse ermitteln.

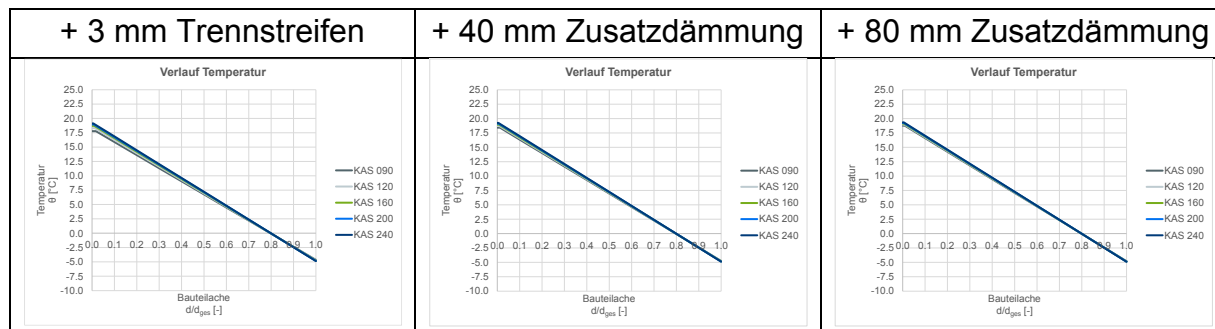


Abbildung 2-55: Temperaturverläufe Kassettenelemente
 Figure 2-55: Temperature distribution liner tray elements

Wie anhand der Temperaturverläufe bei der Variante mit 3 mm Trennstreifen zu erkennen ist, wird die Temperaturdifferenz nahezu komplett in der Dämmebene abgebaut; aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Kassettenprofils ändert sich die Temperatur durch die 1,5 mm dicke Schicht nicht.

Als zweiter Berechnungsschritt wird auf Grundlage der ermittelten Temperaturen der zugehörige Wasserdampf-sättigungsdruck bestimmt. Dieser gibt an, welche maximale Menge Wasserdampf bei der vorliegenden Temperatur in der Luft dampfförmig vorhanden sein können. (siehe Abbildung 2-56)

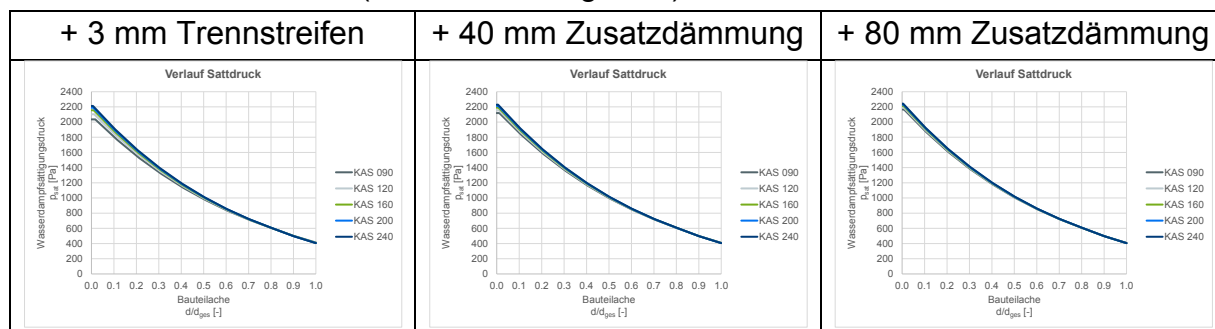
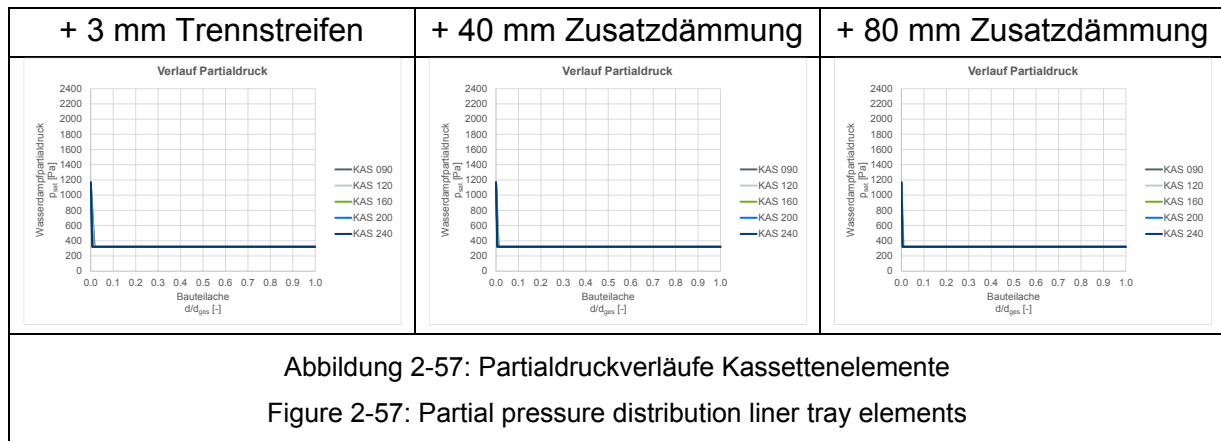
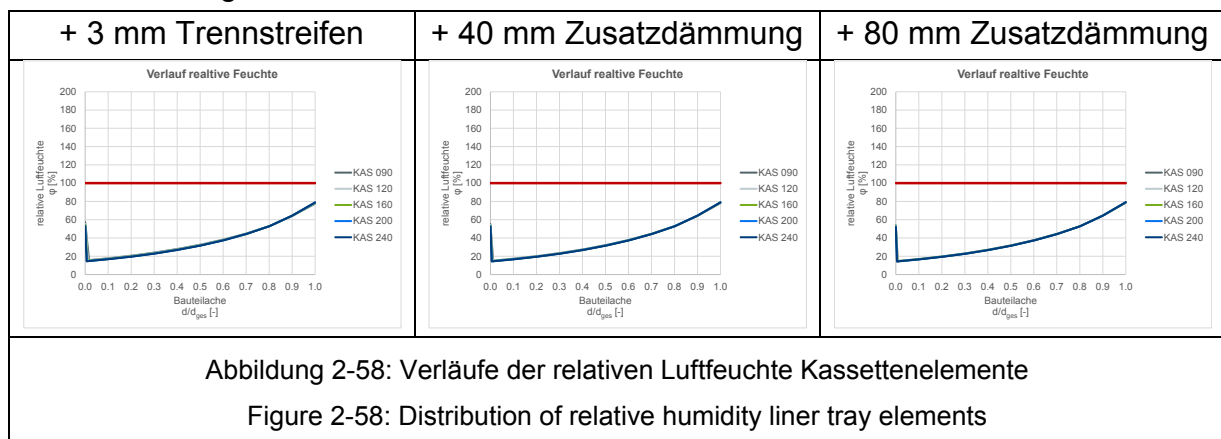


Abbildung 2-56: Sättigungsdruckverläufe Kassettenelemente
 Figure 2-56: Saturation pressure distribution liner tray elements

Mit Hilfe der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen können die Wasserdampfpartial- bzw. Wasserdampfteilrücke bestimmt werden. Diese geben auf Basis der Klimarandbedingungen an, wie die Wasserdampfpartialdruckdifferenz innerhalb des Bauteilquerschnittes abgebaut wird. Wie in Abbildung 2-57 zu erkennen ist, erfolgt dieser Abbau fast komplett durch das dampfdichte Stahlblech; innerhalb der Dämmebene bleibt der Wasserdampfpartialdruck konstant.



Im folgenden Schritt sind die Partialdruckverläufe mit den Sättigungsdruckverläufen zu vergleichen. Der Quotient aus Partial- und Sättigungsdruck ist die relative Luftfeuchte. Sie ist kleiner als 1 bzw. 100 %, falls der Partialdruck kleiner als der Sättigungsdruck ist. Tauwasser bildet sich dann, wenn der Wert 100 % erreicht bzw. überschritten wird. Die Verläufe der relativen Luftfeuchten sind in Abbildung 2-58 dargestellt. Es lässt sich für alle Varianten erkennen, dass die relative Luftfeuchte infolge des Stahlprofils absinkt und dann innerhalb der Dämmschicht kontinuierlich zunimmt. Allerdings wird der Tauwassergrenzwert nicht erreicht.



Unter Ansatz der gewählten Parameter lässt sich auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen festhalten, dass bei den betrachteten Kassettenelementen nicht mit Kondensatbildung zu rechnen ist.

2.2.2.3.2 Sandwichelemente Sandwich panels

Bewertung nach DIN 4108-3

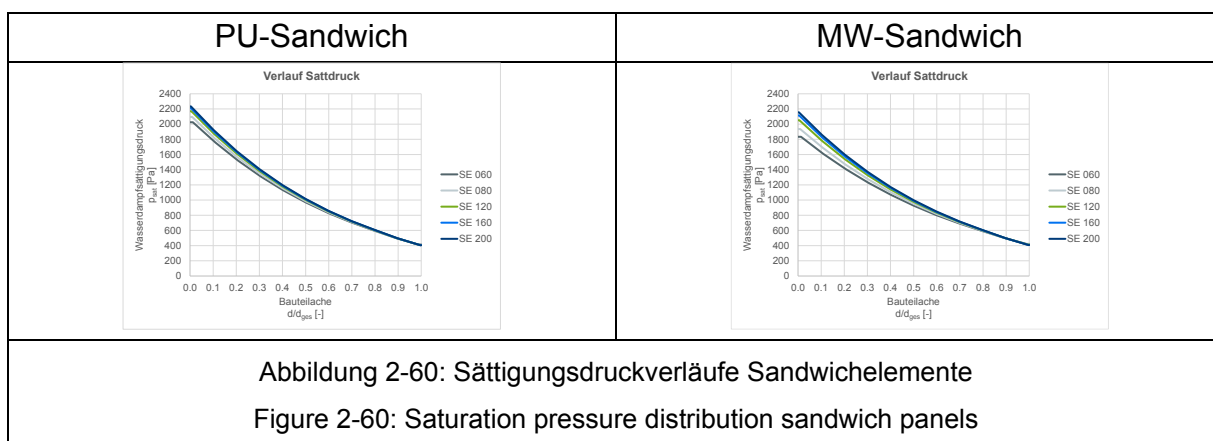
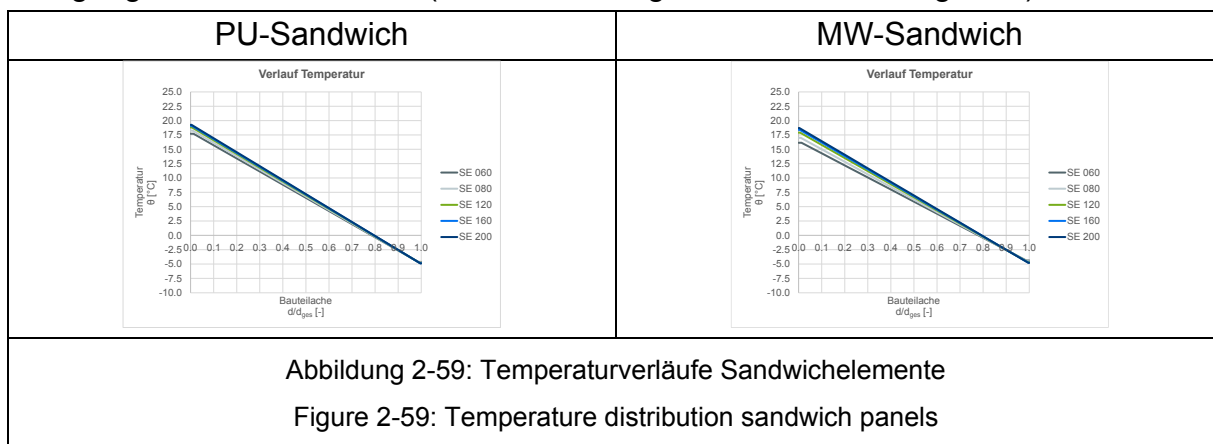
Um Sandwichelemente im Hinblick auf ihr feuchteschutztechnisches Verhalten zu beurteilen, werden nachfolgend Untersuchungen und Berechnungen vorgestellt und diskutiert, die sich wieder auf die Handrechenverfahren in Anlehnung an DIN 4108-3 beziehen. Die erforderlichen Materialeigenschaften sind in Tabelle 2-8 zusammengestellt.

Tabelle 2-8: Hygrothermische Materialeigenschaften bei Sandwichelementen

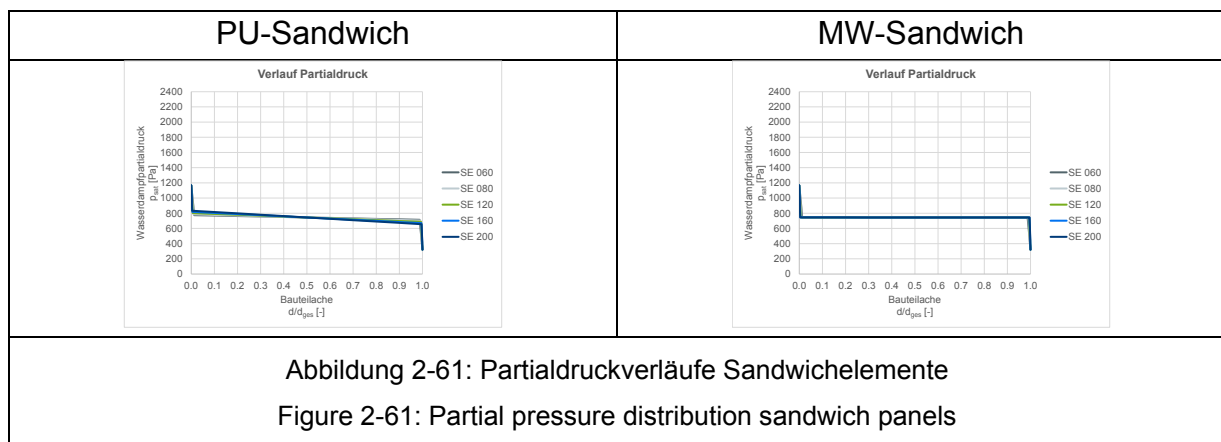
Table 2-8: Hygrothermal material properties for sandwich panels

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Stahl	50	100.000
Polyurethan	0,024	200
Mineralwolle	0,044	1

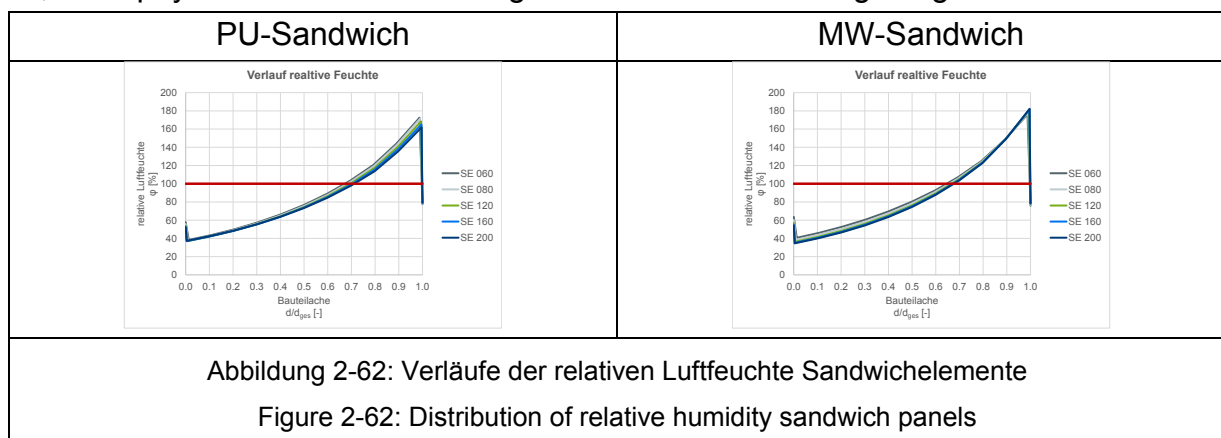
Entsprechend dem Verfahren wird ein homogener Schichtenaufbau, der aus zwei Stahlfeinblechdecksichten und einer dazwischenliegenden Dämmschicht besteht, betrachtet. Die Stahlbleche sind jeweils 0,75 mm stark, die Gesamtelementdicke beträgt zwischen 60 und 200 mm. Für die beiden Varianten PU-Sandwich und MW-Sandwich werden wiederum zunächst die Verläufe der Temperatur und des Sättigungsdruckes bestimmt. (siehe Abbildung 2-59 und Abbildung 2-60)



Im nächsten Schritt wird der Verlauf des Wasserdampfpartialdruckes bestimmt. Dabei zeigt sich, dass die Partialdruckdifferenz jeweils ca. zur Hälfte durch das innere und äußere Stahlblech abgebaut wird. (siehe Abbildung 2-61)



Werden die Partial- und die Sättigungsdruckverläufe in Relation gestellt, ergeben sich die Verläufe der relativen Luftfeuchte. Wie in Abbildung 2-62 zu sehen ist, beträgt die berechnete relative Luftfeuchte im Sandwichquerschnitt über eine Länge von rund 0,3 bzw. $0,35 \cdot d/d_{ges}$ mehr als 100 %. Demnach kommt es zu Tauwasserbildung innerhalb der beiden Stahlblechschichten. Da allerdings Stahl als Material dampf- und luftdicht ist, kann physikalisch keine Feuchtigkeit in den Querschnitt gelangen.



Die Ursache des dennoch rechnerisch auftretenden Kondensats ist in den Grenzen des Berechnungsverfahrens und der dafür notwendigen angesetzten Materialeigenschaften zu sehen. Mit dem Rechenverfahren wird der Abbau der Partialdruckdifferenz entsprechend der Wasserdampfdiffusionsdurchgangswiderstände Z bzw. der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d aufgeteilt. Da beide Stahlbleche dieselbe Diffusionswiderstandszahl und dieselbe Dicke besitzen, wird in beiden Schichten jeweils dieselbe Druckdifferenz abgebaut. Allerdings ist, wie bereits erläutert, jede der beiden Stahlschichten einzeln bereits dampfdicht, sodass sich die gesamte Partialdruckdifferenz schon an dem in Diffusionsrichtung ersten – d.h. hier dem innenliegenden – Blech abgebaut hat. Feuchtediffusion durch die Stahlschicht ist physikalisch nicht möglich. DIN EN 13788 gibt dazu den Hinweis, der Ansatz des finiten Wertes 100.000 für die unendliche Diffusionswiderstandszahl von Stahl dazu führen kann, dass vernachlässigbar kleine Mengen an Tauwasser vorgesagt werden. Diese sind allerdings den Ungenauigkeiten des Berechnungsverfahrens zuzuschreiben und sollten außer Acht gelassen werden.

Im konkreten Fall ergeben sich die in Tabelle 2-9 angegebenen Wasserdampfdiffusionsstromdichten.

Tabelle 2-9: Berechnete Wasserdampfdiffusionsstromdichten bei Sandwichelementen

Table 2-9: Calculated density of water vapour flow rate for sandwich panels

Sandwichdicke d_{SE} [mm]	Wasserdampfdiffusionsstromdichte g [kg/(m ² ·s)]	
	PU-Sandwich	MW-Sandwich
60	1,49 E-9	1,71 E-9
80	1,43 E-9	1,74 E-9
120	1,31 E-9	1,77 E-9
160	1,20 E-9	1,78 E-9
200	1,11 E-9	1,79 E-9

Unter Verwendung der Angaben aus DIN 4108-3 lassen sich für eine Tauperiode von 90 Tagen die in Tabelle 2-10 zusammengestellten Tauwassermassen ermitteln.

Tabelle 2-10: Berechnete Tauwassermassen bei Sandwichelementen

Table 2-10: Calculated dewing water amount for sandwich panels

Sandwichdicke d_{SE} [mm]	Tauwassermasse M_T [kg/m ²]	
	PU-Sandwich	MW-Sandwich
60	1,16 E-2	1,33 E-2
80	1,11 E-2	1,35 E-2
120	1,02 E-2	1,37 E-2
160	0,93 E-2	1,38 E-2
200	0,86 E-2	1,39 E-2

Setzt man die rechnerisch anfallenden Tauwassermassen in Verhältnis zu den Rohdichten von Polyurethan ($\rho = 28 \dots 55 \text{ kg/m}^3$ DIN EN ISO 10456, gewählt 35 kg/m^3 nach DIN EN 14509) und Mineralwolle ($\rho = 10 \dots 200 \text{ kg/m}^3$ DIN EN ISO 10456, gewählt 120 kg/m^3 nach DIN EN 14509) unter Berücksichtigung der jeweiligen Dicke des Sandwichelementes, ergeben sich für PU-Sandwichelemente Feuchteanteile von 0,1 bis 0,5 %, für MW-Sandwichelemente entsprechend zwischen 0,1 und 0,2 %.

In DIN 4108-3 sind allgemeine Grenzwerte von 0,5 bzw. $1,0 \text{ kg/m}^2$ angegeben. DIN EN ISO 13788 nennt dazu $0,2 \text{ kg/m}^2$.

Auf dieser Grundlage werden die anfallenden Tauwassermassen als „vernachlässigbar klein“ eingestuft.

Die Problematik, die sich aufgrund der Berechnungsmethode ergibt und die teilweise auf die (erforderliche) Verwendung eines endlichen Wertes für den unendlich großen Wasserdampfdiffusionswiderstand von Stahl, wird nachfolgend näher erläutert.

Für ein PU-Sandwich der Dicke 80 mm werden die notwendigen thermischen und hygrischen Querschnittsverläufe bestimmt. Die Materialeigenschaften entsprechen dabei zunächst den in Tabelle 2-8 aufgeführten. Im ersten Fall wird für die beiden Stahldeckbleche ein identischer Wasserdampfdiffusionswiderstand angesetzt. Für die

zweite Berechnung wird der Wasserdampfdiffusionswiderstand des inneren Stahldeckbleches um den Faktor 10 größer angenommen, als der des äußeren.

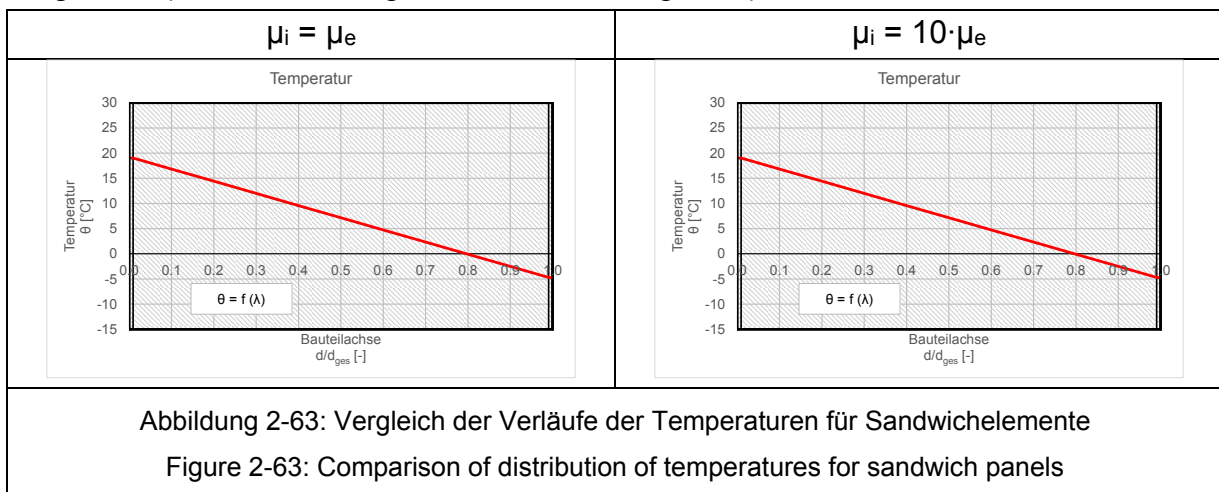
Anhand der bauphysikalischen Definition der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ kann die Materialeigenschaft „Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit“ δ bestimmt werden (siehe Gl. 2-1).

$$\mu = \delta_a / \delta \quad \text{Gl. 2-1}$$

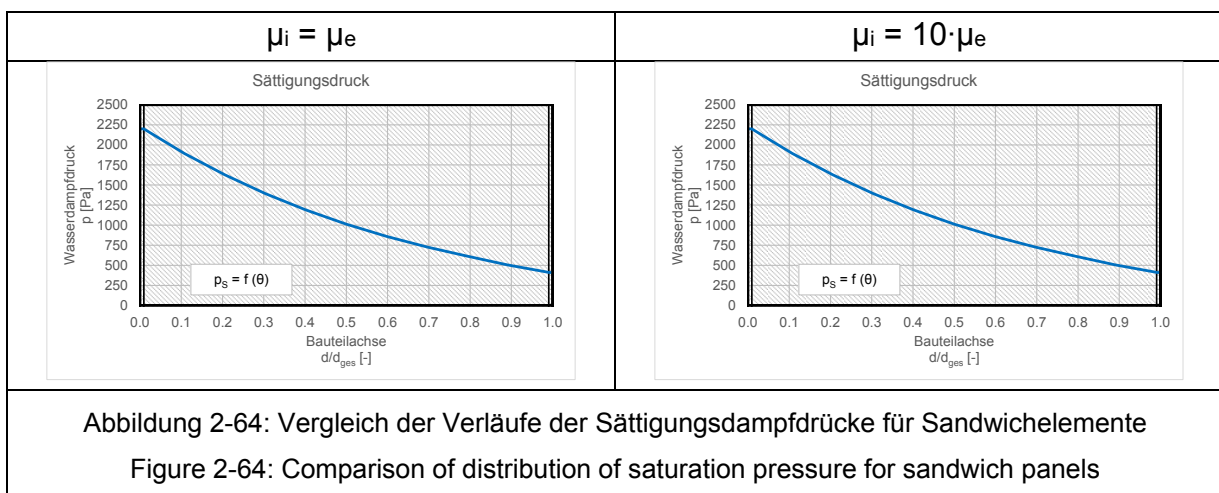
Dabei ist δ_a ein fester Bezugswert und gibt die Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit von Luft an. Der Wert beträgt bei einer Bezugstemperatur von 10 °C $\delta_a = 1,89 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, kann allerdings nach DIN 4108-3 unter praktischen Gesichtspunkten mit $2,0 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ als ausreichend genau approximiert werden.

Der nach DIN EN 13788 für Stahl anzunehmende Wert von $\mu = 100.000$ entspricht somit einer Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit von $\delta = 2,0 \cdot 10^{-15} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$. Der entsprechende Wert für das innere Stahldeckblech bei der zweiten Berechnung beträgt $\delta = 2,0 \cdot 10^{-16} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.

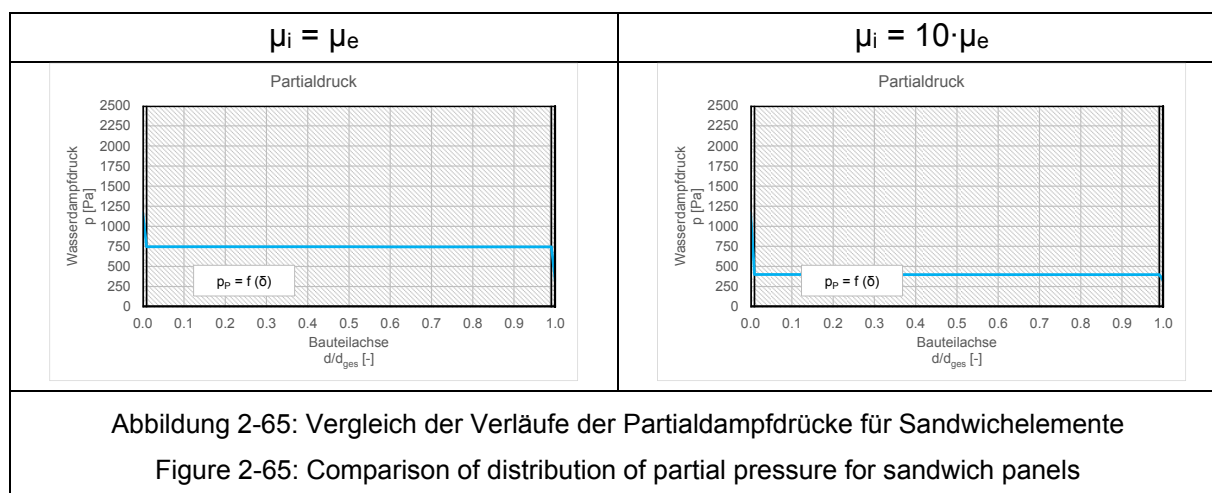
Nachfolgende sind die ermittelten thermischen und hygrischen Verläufe im Querschnitt dargestellt (siehe Abbildung 2-63 bis Abbildung 2-66)



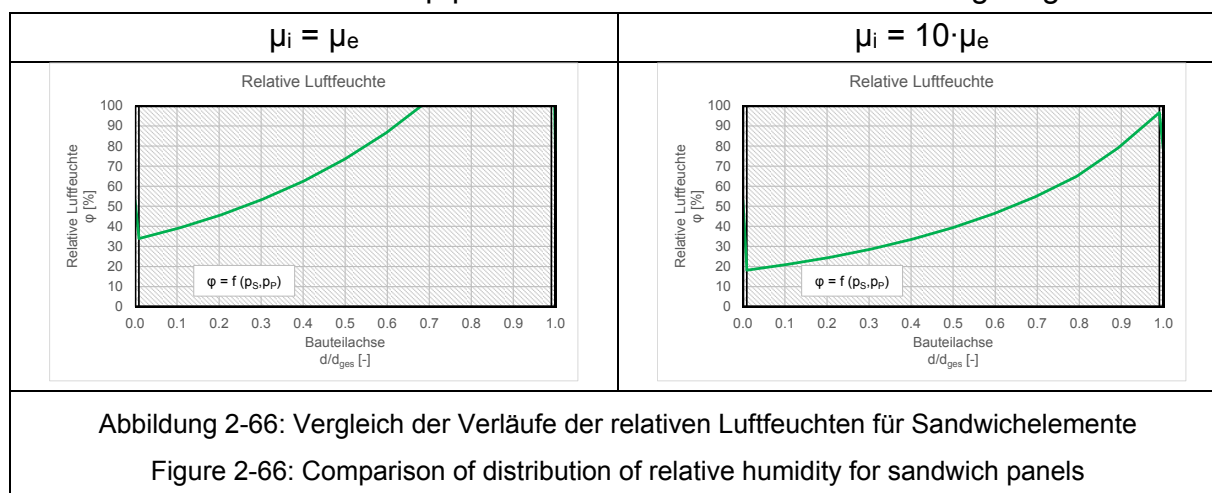
Die Temperaturverläufe werden nur von der Wärmeleitfähigkeit als Materialeigenschaft bestimmt und sind daher in beiden Fällen identisch.



Daher ergeben sich auch für beide Varianten identische Sättigungsdruckverläufe.

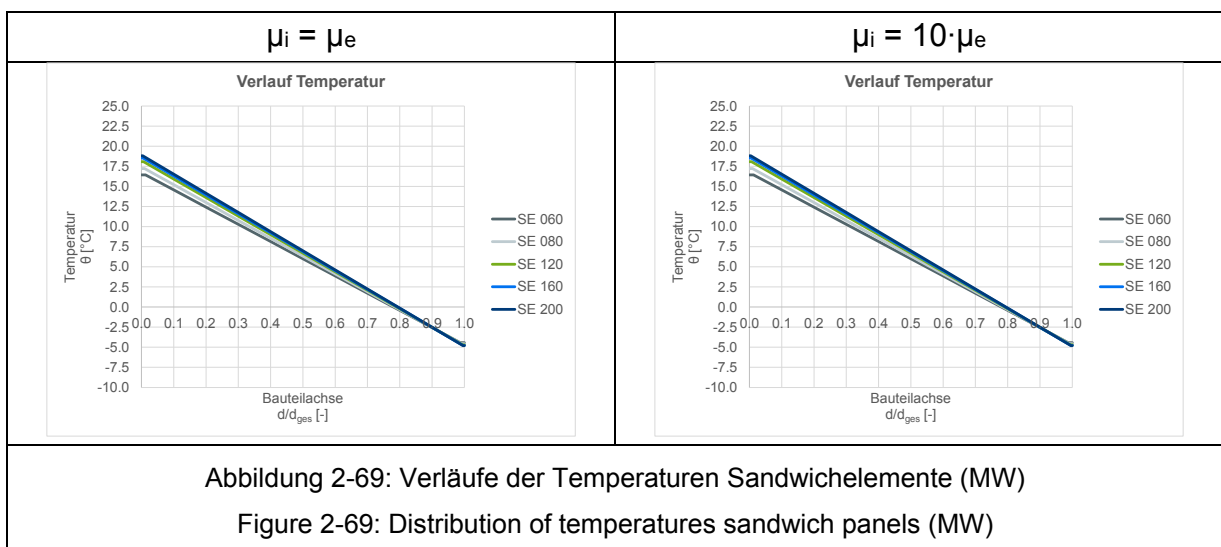
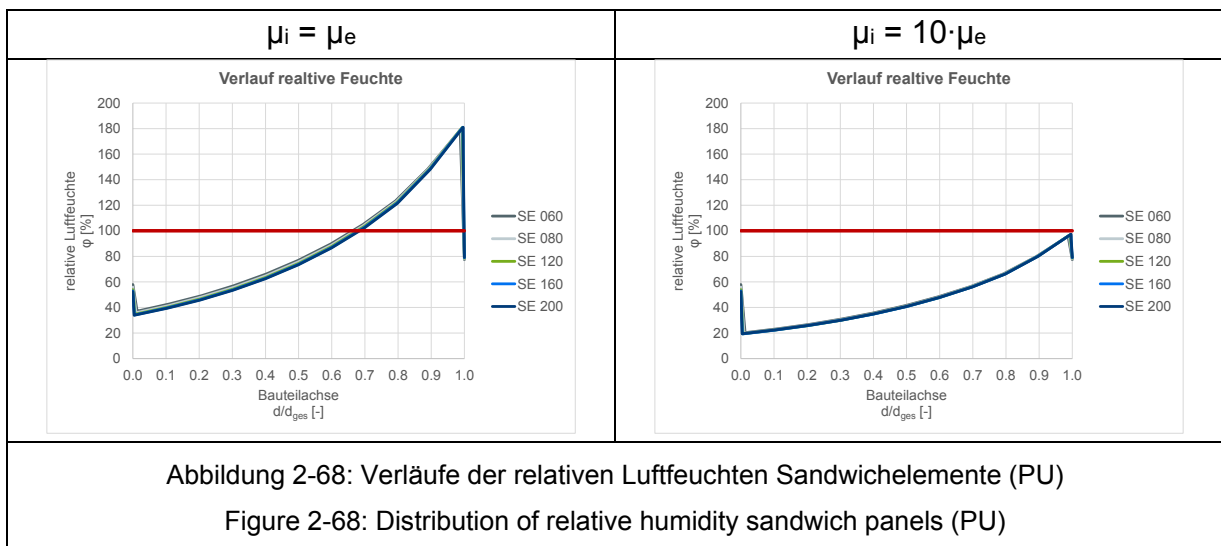
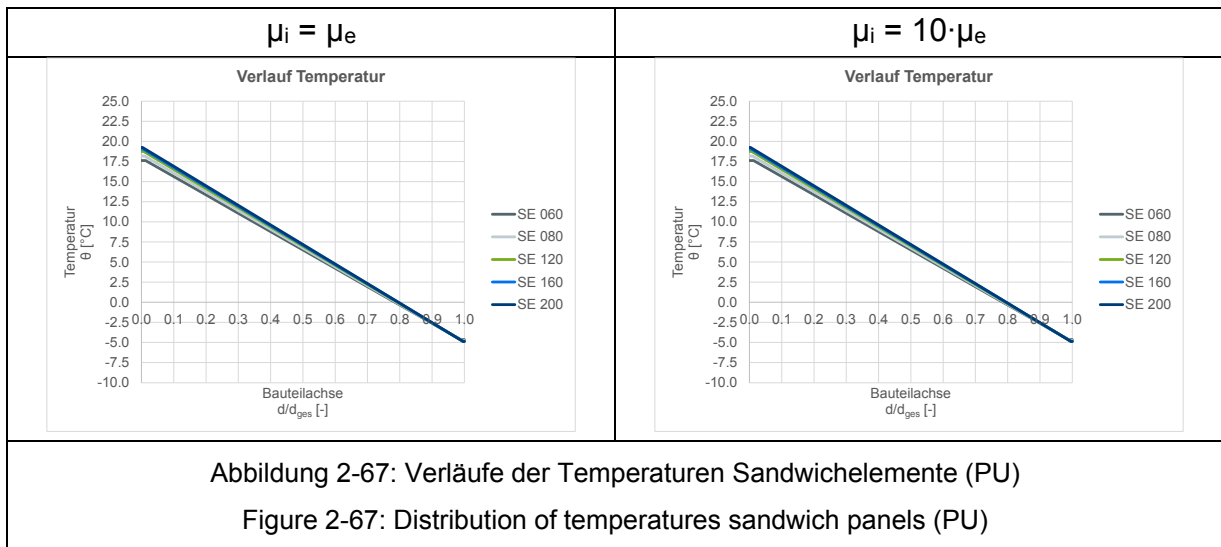


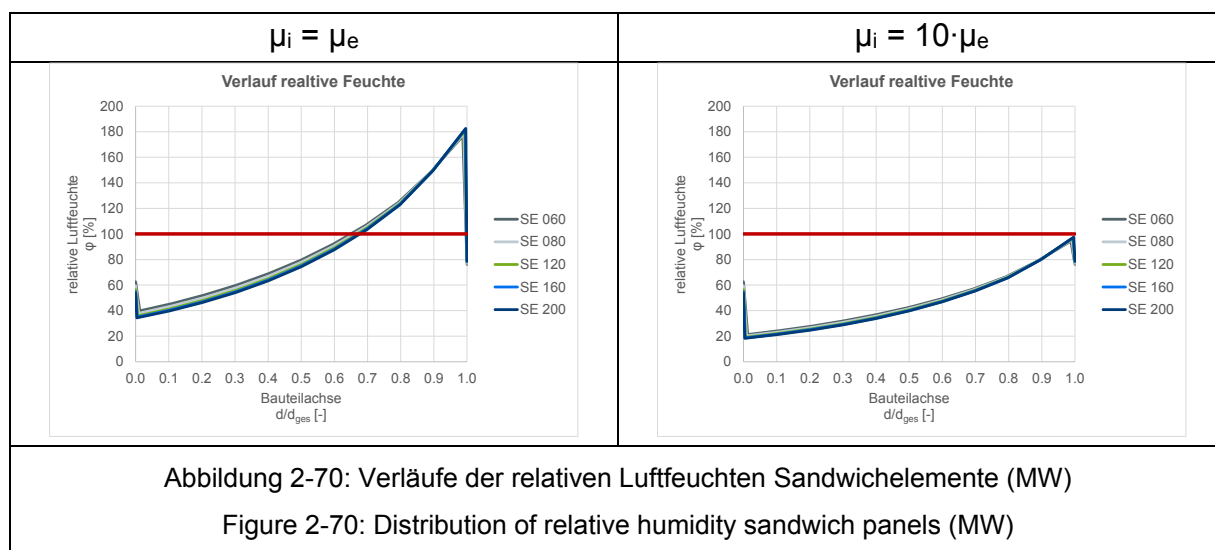
Die Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit bzw. die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl beeinflusst die Berechnung des Partialdruckverlaufes. Während im ersten Fall jeweils nahezu die Hälfte der Partialdruckdifferenz in beiden Deckblechen abgebaut wird, erfolgt der Potentialabbau im zweiten Fall fast komplett im inneren, d.h. weniger leitfähigen Stahldeckblech. Daher ist der ermittelte Wasserdampfpartialdruck im Dämmkern ebenfalls geringer.



Wie die Darstellung der Verläufe der relativen Luftfeuchte zeigt, kommt es im ersten Fall zu Tauwasserbildung hinter dem außenliegenden Deckblech. Auf Grundlage der äußerst geringen Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit ist allerdings rein anschaulich fraglich, wie das Tauwasser durch das innere Deckblech gelangt, bzw. wie lange dieser Vorgang benötigt. Die rein stationäre Betrachtungsweise, die dem Verfahren nach DIN 4108-3 zu Grunde liegt, ist hier nicht mehr ausreichend.

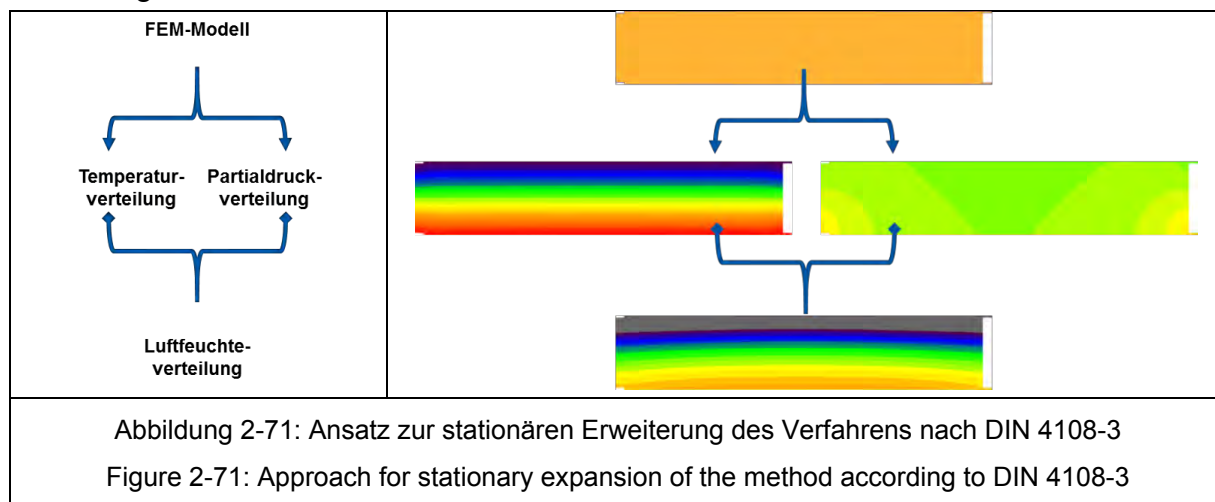
Durch die Modifikation der Materialeigenschaft kann gezeigt werden, dass es im Querschnitt nicht zur Tauwasserbildung kommt, was auch der gängigen Vorstellung für den homogenen, stör- und fehlerstellenfreien Aufbau bei Sandwichelementen entspricht. Wie die Abbildung 2-67 bis Abbildung 2-70 zeigen, gilt diese Annahme unabhängig von den betrachteten Sandwichelementdicken und auch für PU- und MW-Dämmkerne.





Bewertung nach erweiterter DIN 4108-3

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde versucht, zweidimensionale, stationäre Fragestellungen – konkret Sandwichelement mit PU- bzw. MF-Dämmkern – anhand einer Erweiterung des Verfahrens nach DIN 4108-3 zu bewerten. Grundlage war dabei der in Abbildung 2-71 dargestellt Ansatz. Danach wurden in zwei separaten FE-Berechnungen zum einen die Temperaturverteilung und zum anderen die Partialdruckverteilung ermittelt. Als Kombination aus diesen beiden wurde dann die Verteilung der relativen Luftfeuchte bestimmt.



Für die Untersuchungen wurden Sandwichelemente mit Fugentyp I untersucht. Die Elementdicke wurde zu 200 mm gewählt, für den Fugenabstand wurde ein Maß von 3 mm angesetzt.

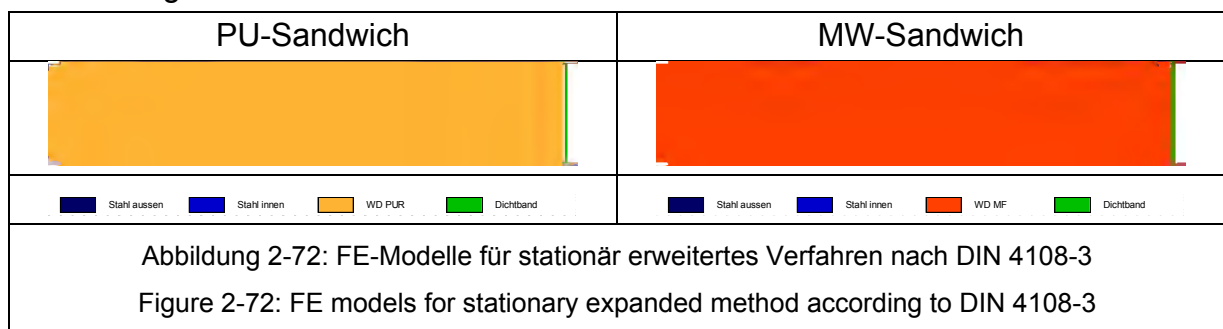
Die Materialeigenschaften, die für die PU- und MF-Sandwichelemente verwendet wurden, sind in Tabelle 2-11 zusammengestellt. Variiert wurde dabei jeweils der Wasserdampfdiffusionswiderstand des Fugendichtbandes. Als Grundlage wurden die in DIN EN ISO 10456 und DIN 4108-4 zu findenden Werte verwendet.

Tabelle 2-11: Materialeigenschaften für stationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

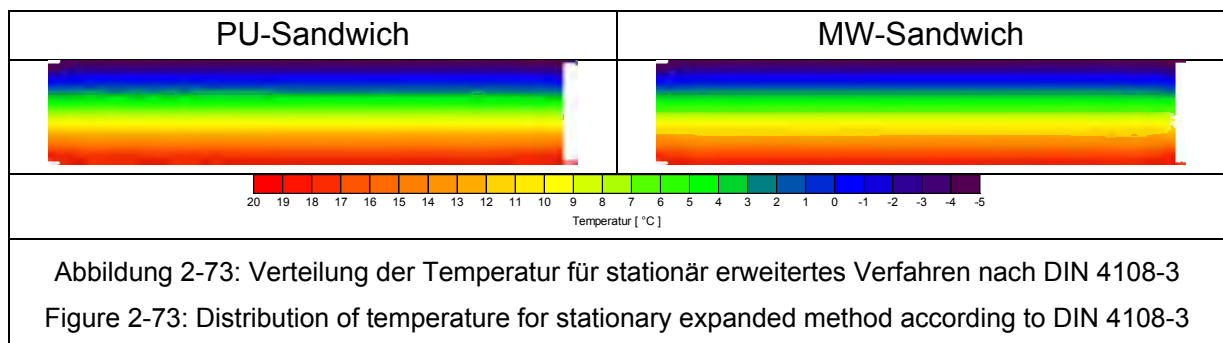
Table 2-11: Material properties for stationary expanded method according to DIN 4108-3

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Stahl außen	50	100.000
Stahl innen	50	1.000.000
Polyurethan	0,025	200
Mineralwolle	0,040	1
Luft	λ_{eq}	1
Dichtband	0,050	1 10 100 1.000 10.000

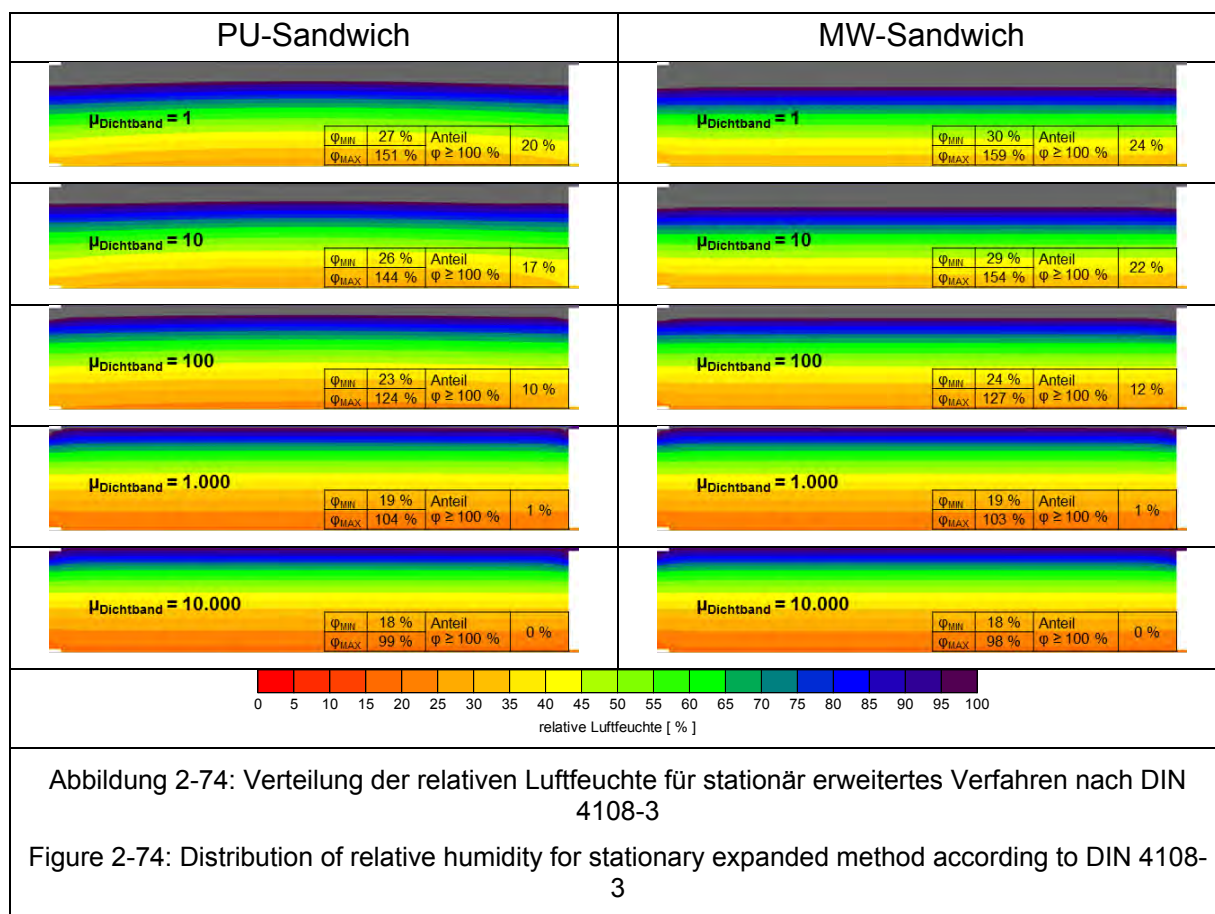
In Abbildung 2-72 sind die entsprechenden Modelle dargestellt, die für die FE-Berechnung verwendet wurden.



Die zugehörigen Temperaturverteilungen sind nachfolgend in Abbildung 2-73 zu finden. Da die Wärmeleitfähigkeit nicht variiert wurde, ist der Verlauf der Temperatur für alle betrachteten Fälle identisch.

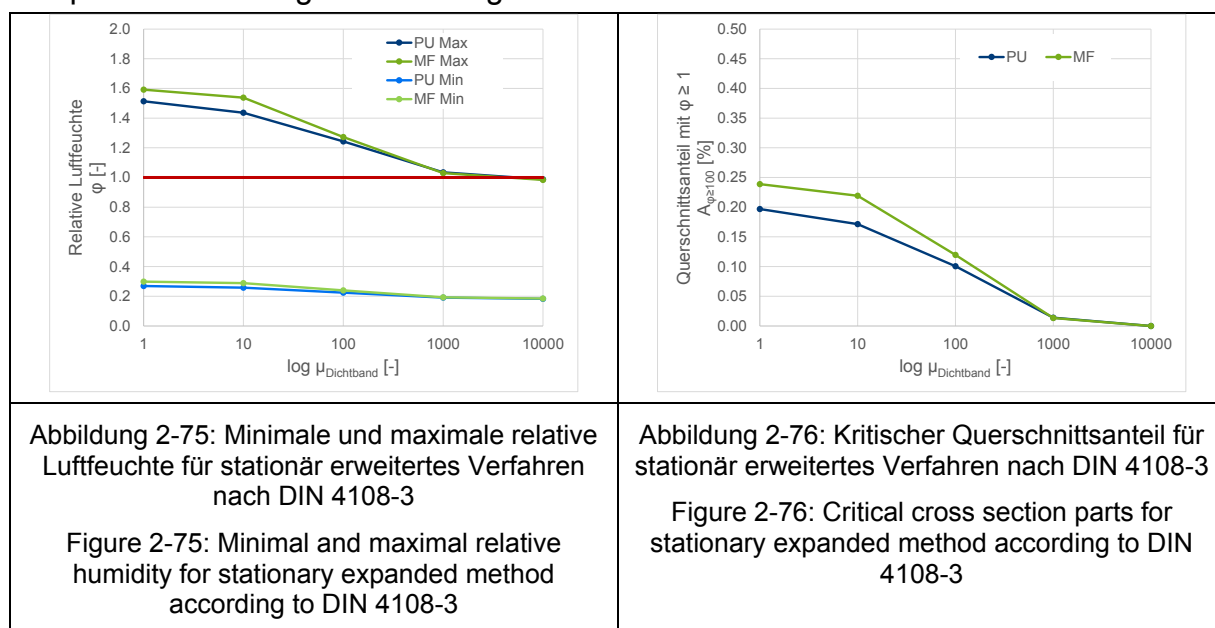


Die Verteilungen der relativen Luftfeuchten, die sich als Kombination aus Temperatur- und Wasserdampfdruckverteilung ergeben, sind nachfolgend für den jeweiligen Wasserdampfdiffusionswiderstand dargestellt (siehe Abbildung 2-74). Als Beurteilungskriterium wurde neben der minimalen und der (theoretisch) maximalen relativen Luftfeuchte auch der Flächenanteil des Querschnitts angegeben, für den die relative Luftfeuchte größer als 100 % ist.



Wie erwartet nimmt der Anteil des Querschnitts in dem die relative Luftfeuchte oberhalb von 100 % liegt mit abnehmender Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit bzw. mit steigendem Wasserdampfdiffusionswiderstand des Dichtbandes ab. Je dichter das Dichtband, desto unkritischer der Bauteilquerschnitt.

In Abbildung 2-75 und Abbildung 2-76 sind die berechneten Ergebnisse in entsprechenden Diagrammen dargestellt.



Dabei zeigt sich, dass das Dämmmaterial bei der durchgeführten Untersuchung anhand des erweiterten Verfahrens nach DIN 4108-3 nur einen untergeordneten Einfluss hat.

Der vorgestellte Ansatz wurde im weiteren Verlauf nicht weiter verfolgt. Während die eine Erweiterung auf zwei- bzw. dreidimensionale Fragestellungen grundsätzlich vielversprechend war, bestanden die weiteren Beschränkungen des Verfahrens nach DIN 4108-3 weiter.

Ein weiterer Ansatz bestand darin, für eindimensionale – d.h. homogene – Bauteile aus einzelnen Schichten numerische Untersuchungen bei Verwendung von instationären Randbedingungen durchzuführen. Dazu sind zwei Sandwichelemente mit Elementdicken von je 100 mm und PU- bzw. MW-Dämmung betrachtet worden. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 2-12 zu finden.

Tabelle 2-12: Materialeigenschaften für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Table 2-12: Material properties for transient expanded method according to DIN 4108-3

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Stahl	50	1.000.000
Polyurethan	0,025	200
Mineralwolle	0,040	1

In Abbildung 2-77 sind die beiden Querschnitt dargestellt. Gekennzeichnet sind außerdem Punkte innerhalb der Querschnitte, für die im Folgenden Auswertungen und Ergebnisse dargestellt werden. Dabei wird zwischen den Positionen

- Oberflächen der Stahlprofile, innen und außen – „S_i“ und „S_e“
- Übergang zwischen Stahlprofile und Dämmung – „S-D“ und „D-S“
- in der Dämmung, innen, Mitte und außen – „D_i“ und „D_m“ und „D_e“

unterschieden.

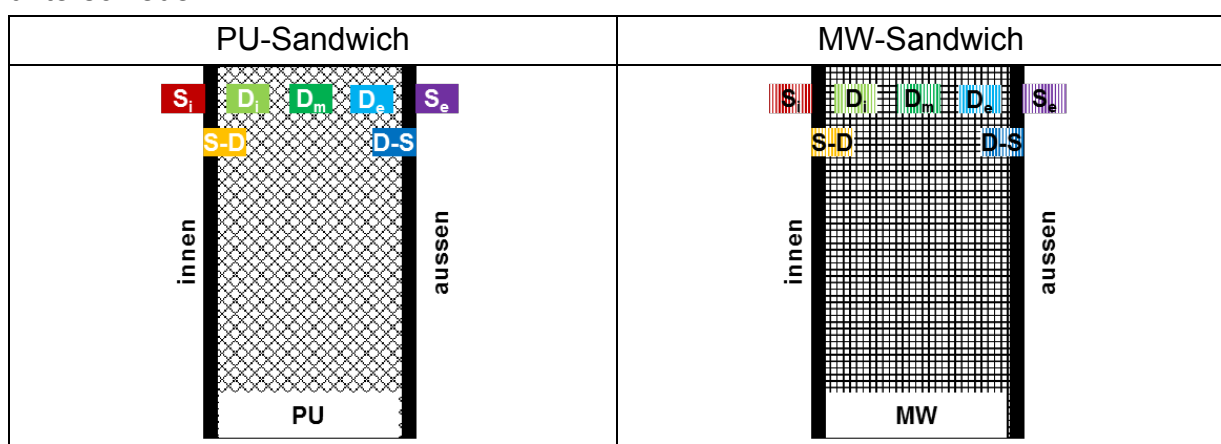


Abbildung 2-77: Querschnitt für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Figure 2-77: Cross section for transient expanded method according to DIN 4108-3

Die Klimarandbedingungen für die numerischen Berechnungen sind in Abbildung 2-78 visualisiert. Die Außenbedingungen sind instationär, während die Innenbedingungen konstant angesetzt werden. Betrachtet wurde ein Zeitraum von einem Jahr.

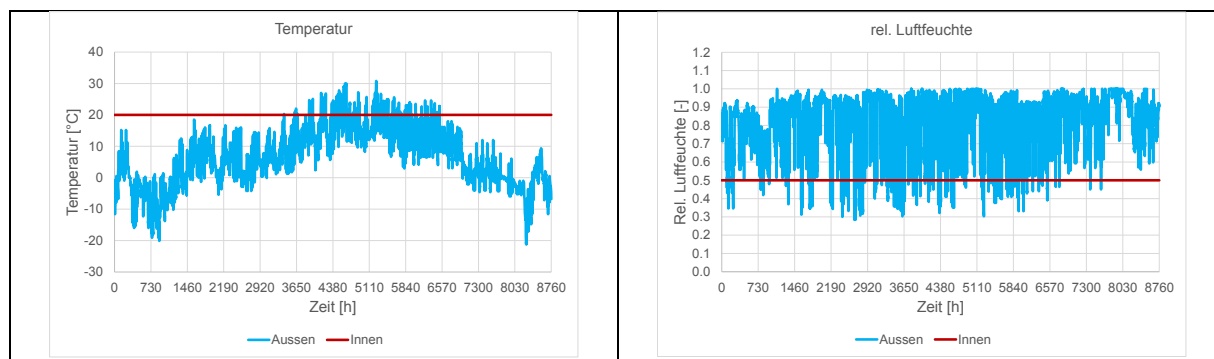


Abbildung 2-78: Temperatur und relative Luftfeuchte für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Figure 2-78: Temperature and relative humidity for transient expanded method according to DIN 4108-3

Auf Grundlage der dargestellten Temperaturen und relativen Luftfeuchten lässt sich der Verlauf des Wasserdampfpartialdrucks bestimmen, siehe Abbildung 2-79. Wenn der Wasserdampfpartialdruck auf der Außenseite geringer als der auf der Innenseite ist, liegt ein Diffusionsstrom von innen nach außen vor – i.A. ist dies im Winterhalbjahr der Fall. Im Sommerhalbjahr herrschen umgekehrte Verhältnisse, sodass sich ein Diffusionsstrom von außen nach innen ergibt. Der nachstehende Verlauf verdeutlicht diese Aussage.

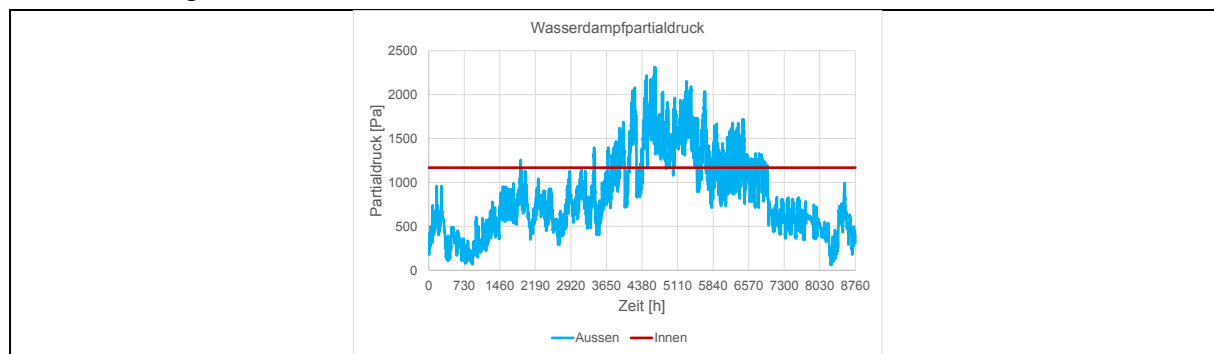


Abbildung 2-79: Wasserdampfpartialdruck für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Figure 2-79: Water vapour partial pressure for transient expanded method according to DIN 4108-3

Als Ergebnisse der numerischen Untersuchungen werden nachfolgend die an den unterschiedlichen Positionen in den Querschnitten berechneten relativen Luftfeuchten als Funktion der Zeit dargestellt. In den Diagrammen von Abbildung 2-80, Abbildung 2-81 und Abbildung 2-82 beziehen sich die durchgezogenen Linien jeweils auf die Variante mit PU-Dämmkern, die gestrichelten entsprechend auf das Sandwichelement mit MW-Dämmung.

In Abbildung 2-80 sind die Ergebnisse für die beiden Stahlprofilblechoberflächen zu sehen. Für die Innenoberfläche (rote Linien) sind nur geringe Abweichungen zwischen den beiden Dämmstoffvarianten erkennbar. Auf der Außenoberfläche (lila Linien) zeigt sich demgegenüber, dass die relative Luftfeuchte bei der MW-Variante höher ist, als bei der PU-Variante. Die Ursache ist in der schlechteren Dämmwirkung von Mineralwolle im Vergleich zu Polyurethan zu sehen, die sich auch in den zugehörigen

Wärmedurchgangskoeffizienten wiederfinden. Für PU ergibt sich der Wert $U_{PU} = 0,244 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, für MW $U_{MW} = 0,382 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

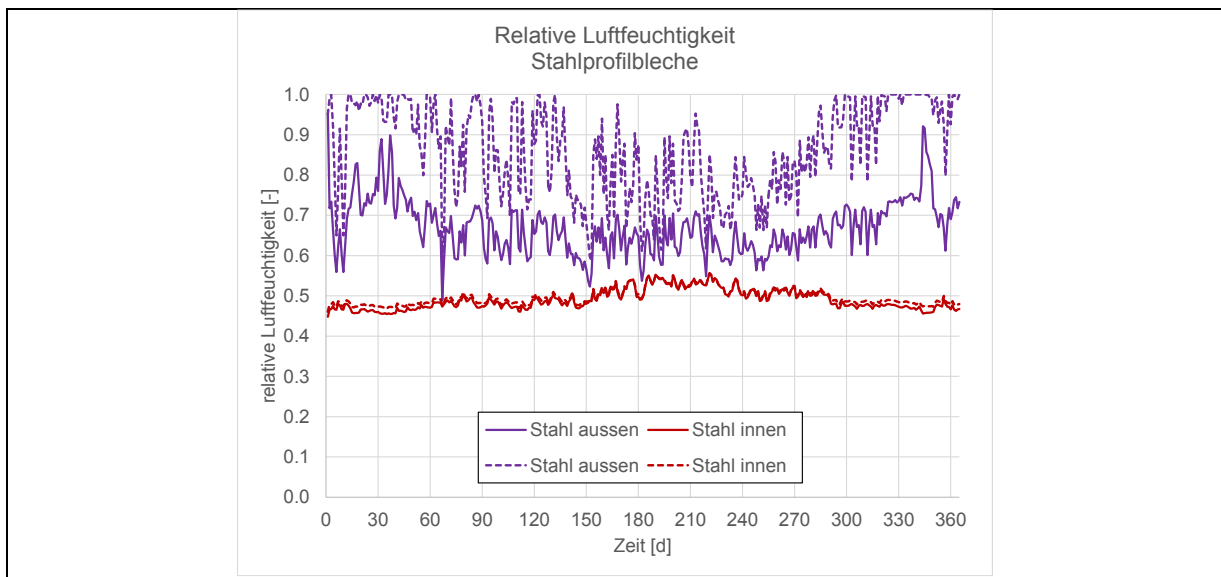


Abbildung 2-80: Ergebnisse 1 für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Figure 2-80: Results 1 for transient expanded method according to DIN 4108-3

Abbildung 2-81 zeigt als Ergebnisse die relativen Luftfeuchten, die sich unmittelbar an den Übergängen zwischen Stahlprofilblech und Dämmstoff ergeben. Abweichungen zwischen den beiden untersuchten Varianten lassen sich dabei nicht erkennen.

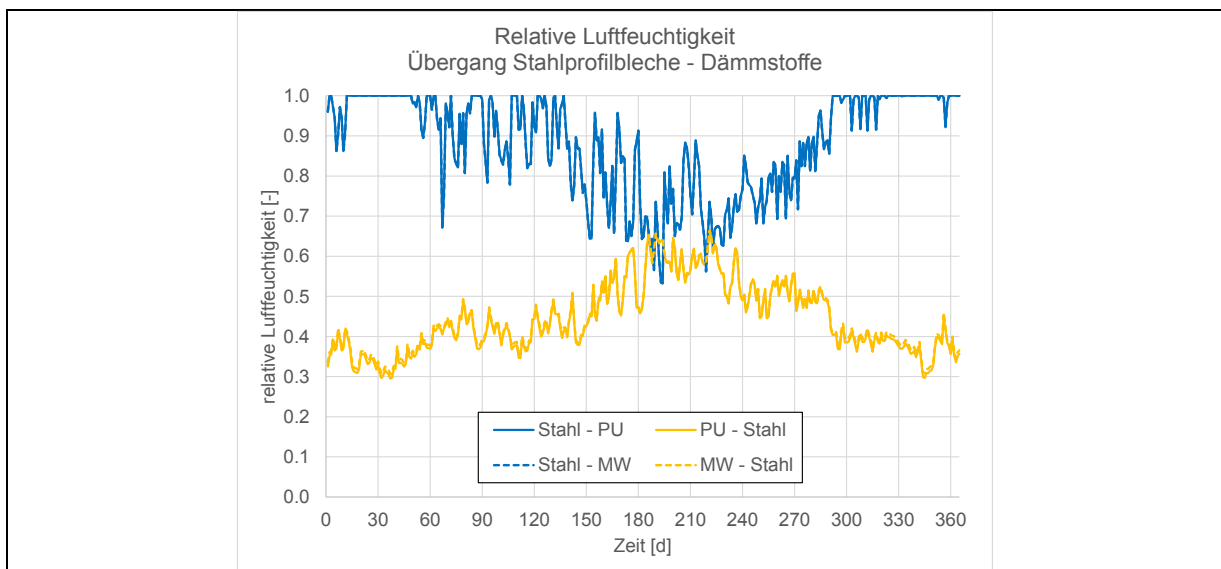


Abbildung 2-81: Ergebnisse 2 für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Figure 2-81: Results 2 for transient expanded method according to DIN 4108-3

In Abbildung 2-82 sind schließlich die ermittelten Werte an drei verschiedenen Positionen im Dämmmaterial zu sehen. Auch anhand dieser Ergebnisse lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen PU und MW feststellen. Für den betrachteten (eindimensionalen) Aufbau verhalten sich beide Stoffe sehr ähnlich, was u.a. auch auf die flankierenden dampfdichten Stahlprofilbleche zurückgeführt werden kann.

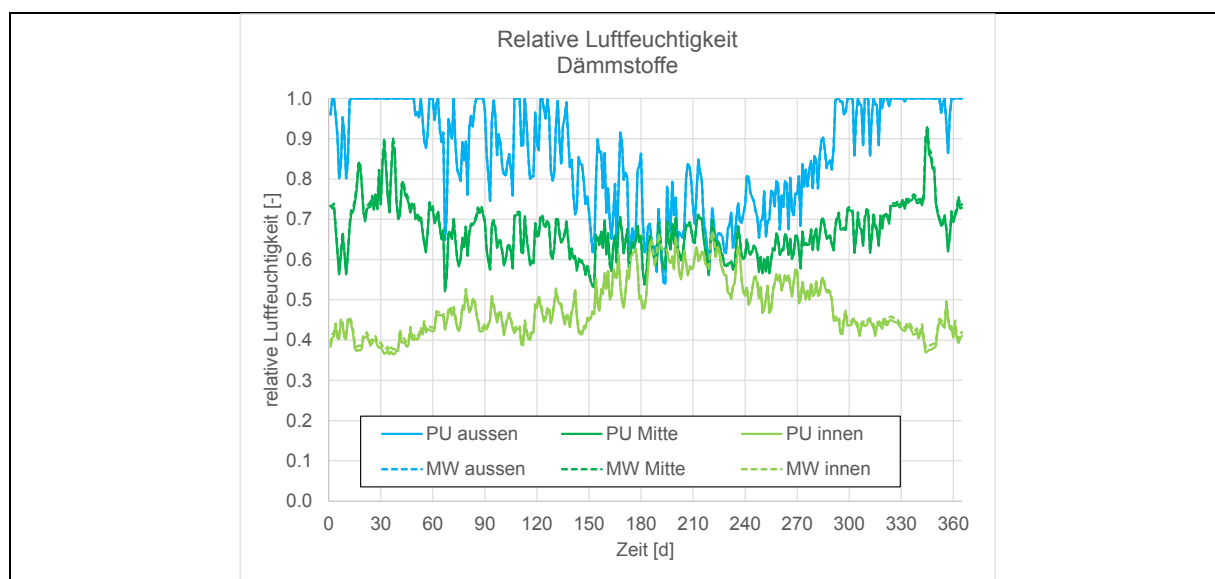


Abbildung 2-82: Ergebnisse 3 für instationär erweitertes Verfahren nach DIN 4108-3

Figure 2-82: Results 3 for transient expanded method according to DIN 4108-3

Die zuvor beschriebenen Ansätze führten allerdings nicht zu Ergebnissen, die im Sinne des Forschungsprojektes voll umfänglich als zufriedenstellend eingestuft wurden. Daher wurde der ursprüngliche Ansatz, wonach die Übertragung bewährter konservativer Rechenansätze von eindimensionalen Fragestellungen auf mehrdimensionale Geometrien unter Verwendung „einfacher“ bzw. einfach zu bestimmender Materialparameter – Wärmeleitfähigkeit λ und Diffusionswiderstand μ – nicht weiter verfolgt.

Bewertung nach DIN EN 15026

Demgegenüber wurde im weiteren Verlauf – insbesondere für die Betrachtung der sanierten Konstruktionen in Abschnitt 3 – der numerisch komplexe, in DIN EN 15026 verankerte Ansatz mit den entsprechenden Materialfunktionen – Feuchtespeicherfunktion $w(\phi)$ und andere feuchteabhängige Eigenschaften wie $\lambda(w)$ und $\delta(w)$ – aufgegriffen und auf den Bereich des Stahlleichtbaus angewendet (vgl. Abbildung 2-83).

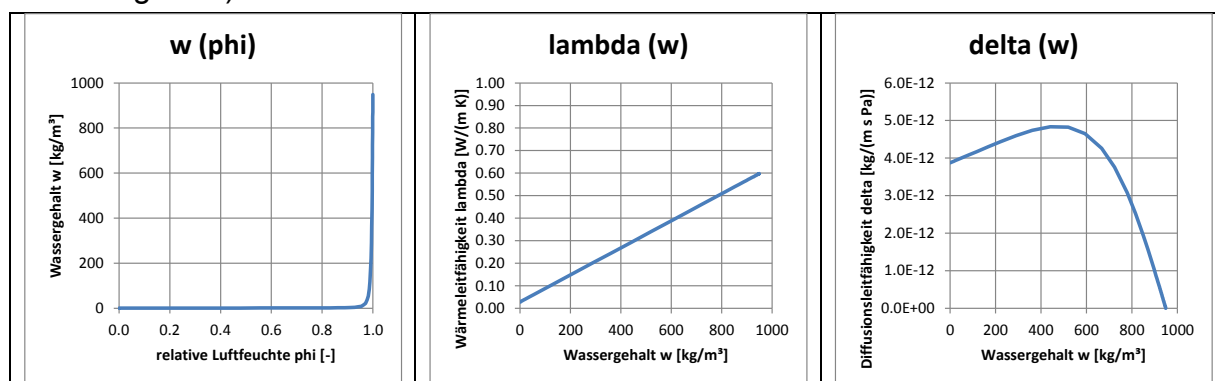


Abbildung 2-83: Exemplarische Materialfunktionen für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-83: Exemplary material functions for method according to DIN EN 15026

Zu Verifizierung der anzuwendenden Methode wurde diese zunächst u.a. mit dem in DIN EN 15026 angeführten Vergleichsbeispiel überprüft. Dazu wird auf Abschnitt 2.2.2.1.3 verwiesen.

Für die im Weiteren durchgeführten Untersuchungen wurden die bereits in Abbildung 2-77 dargestellten homogenen Sandwichquerschnitte wieder aufgegriffen. Zusätzlich zu der Variante „Sandwichelement“ wurden auch die beiden Extremfälle „ohne Außenblech“ bzw. „ohne Innenblech“ untersucht. In Abbildung 2-84 sind die drei betrachteten Querschnittsvarianten dargestellt. Die Fälle wurden bewusst so gewählt, dass sie jeweils einen realitätsnahen (Sandwichelement) und zwei (akademische) Fälle abbilden, von den einer als „günstig“ (ohne Außenblech) und einer als „ungünstig“ (ohne Innenblech) angesehen werden kann. Als Wärmedämmung wurde wiederum PU und MW mit den zugehörigen Materialfunktionen betrachtet.

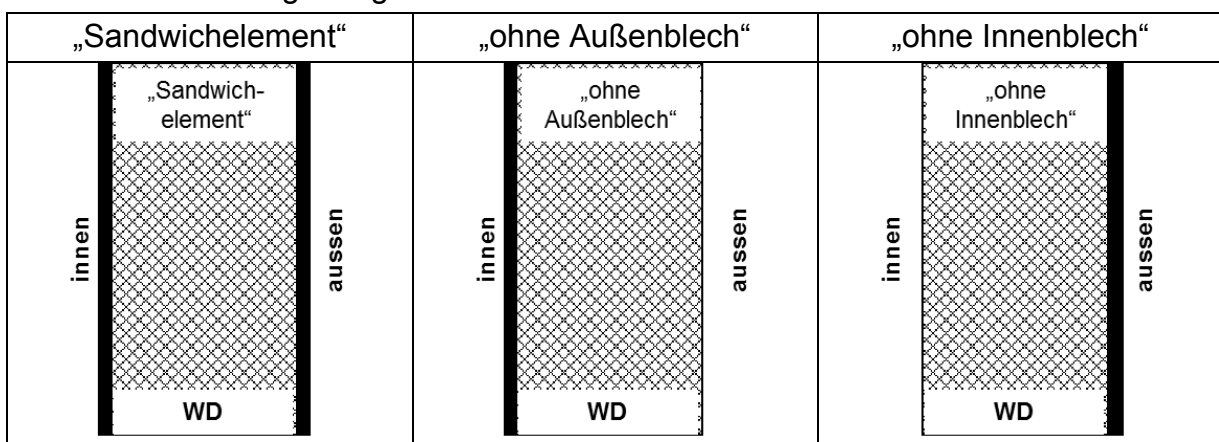


Abbildung 2-84: Querschnittsvarianten für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-84: Cross section variations for method according to DIN EN 15026

Die Klimarandbedingungen wurden in Anlehnung an DIN 4108-3 wie in Abbildung 2-85 visualisiert angesetzt. Als Betrachtungszeitraum wurde dabei eine 90 tägige Tauperiode gefolgt von einer 90 täglichen Verdunstungsperiode gewählt.

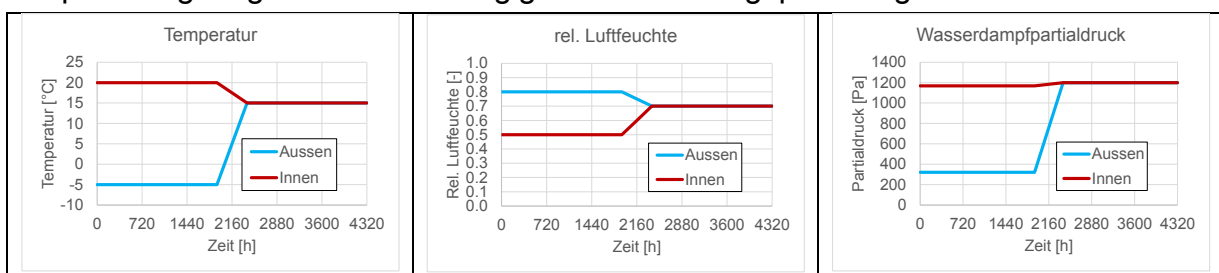


Abbildung 2-85: Klimarandbedingungen für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-85: Climatic boundary conditions for method according to DIN EN 15026

Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen zusammengestellt. Dabei wurde jeweils der Verlauf der relativen Luftfeuchte und des Wassergehaltes im Querschnitt dargestellt. Um den gesamten Berechnungszeitraum von einer Tauperiode (90 Tage) und einer Verdunstungsperiode (ebenfalls 90 Tage) gemäß DIN 4108-3 (vgl. auch die Klimarandbedingungen in Abbildung 2-85) in einem entsprechenden Querschnittsdiagramm übersichtlich wiedergegeben zu können, wurden die Bandbreiten zwischen minimal und maximal im Querschnitt auftretenden dargestellt.

Für den gesamten Berechnungszeitraum liegen die Werte innerhalb des so gekennzeichneten Bandbreitenkorridors.

Für die Varianten mit PU-Dämmung sind die Ergebnisse in Abbildung 2-86 und Abbildung 2-87 zu finden. Die Verläufe der relativen Luftfeuchten zeigen, dass sich beim „Sandwichelement“ tendenziell eine höhere Luftfeuchte im Bereich des Außenbleches einstellen, wohingegen auf der Innenseite ein Trocknungseffekt auftritt. Falls das Außenblech nicht vorhanden ist, kann das Bauteil austrocknen und es kommt zu keiner Ansammlung im Außenbereich. Wird hingegen das Innenblech nicht berücksichtigt, akkumuliert in Feuchtigkeit hinter dem Außenblech sowie aber auch im gesamten Querschnitt.

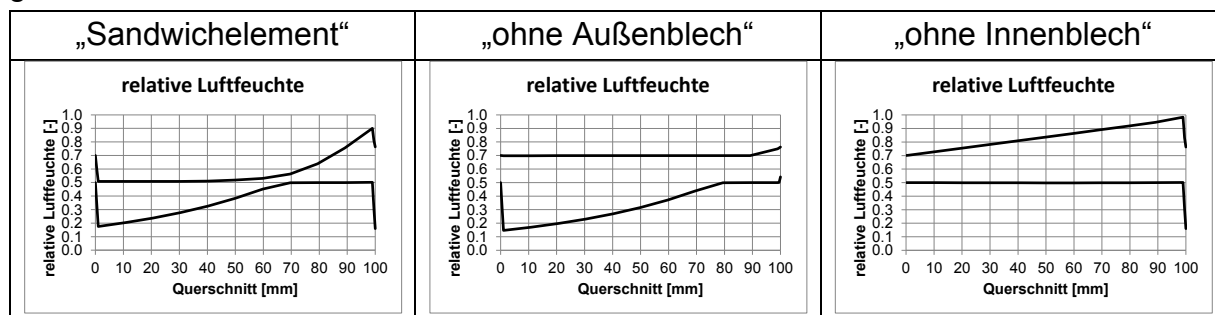


Abbildung 2-86: Ergebnisse „PU ϕ “ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-86: Results “PU ϕ ” for method according to DIN EN 15026

Die entsprechenden Aussagen finden in den Verläufen der Wassergehalte eine Bestätigung. Während für die ersten beiden Varianten keine signifikante Feuchte- bzw. Wasseransammlung auftritt, kommt es bei der dritten Variante zu großen Wassergehalten im Bereich des Außenblechs.

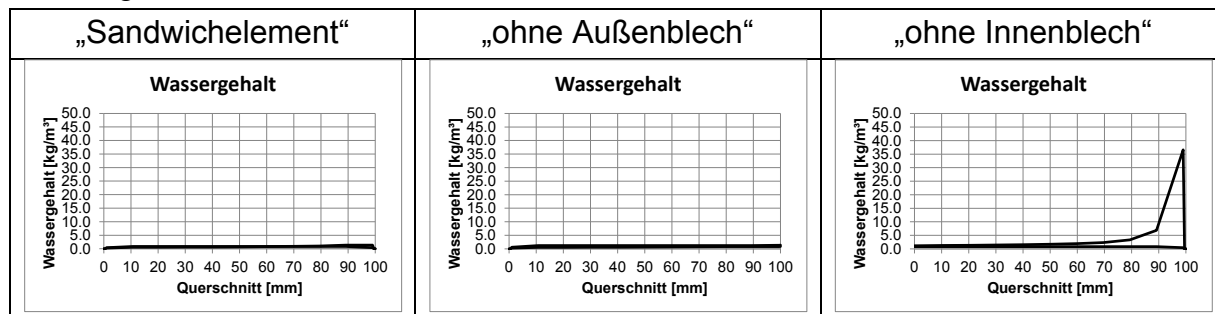


Abbildung 2-87: Ergebnisse „PU w“ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-87: Results “PU w” for method according to DIN EN 15026

Bei der Verwendung von Mineralwolle-Dämmung anstelle von Polyurethan, lassen sich die in Abbildung 2-88 und Abbildung 2-89 dargestellten Ergebnisse bestimmen. Die Aussagen hinsichtlich der PU-Dämmung gelten dabei grundsätzlich auch bei Verwendung von MW-Dämmung. Allerdings kommt es in diesem Fall bei Variante „ohne Innenblech“ zu relativen Luftfeuchte, die größer als oder nahe 100 %, in rund der Hälfte des Querschnitts.

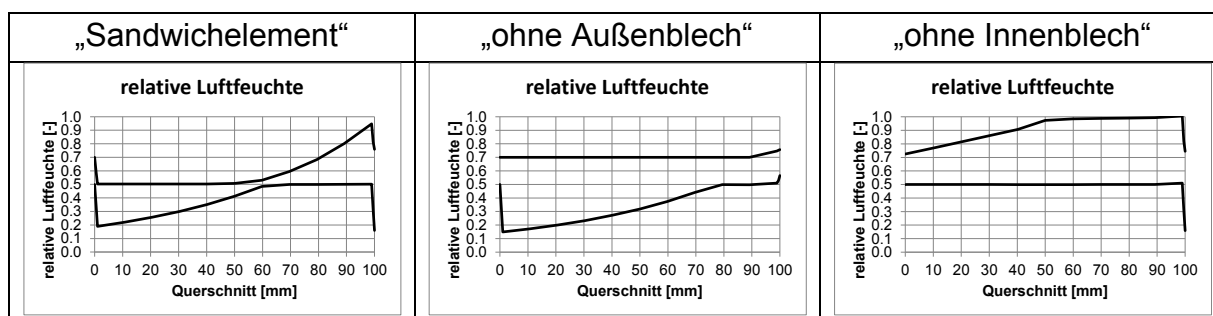


Abbildung 2-88: Ergebnisse „MW ϕ “ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-88: Results “MW ϕ ” for method according to DIN EN 15026

Auf Grund der höheren Feuchtespeicherkapazität von Mineralwolle verbunden mit der ebenfalls höheren Hygroskopie des Dämmstoffs im Vergleich zum (geschlossen porigen) Polyurethan, treten Wassergehalte auf, die sehr viel größer sind. Wie rechts in Abbildung 2-89 zu sehen, liegen die maximalen Wassergehalte auf einem höheren Niveau.

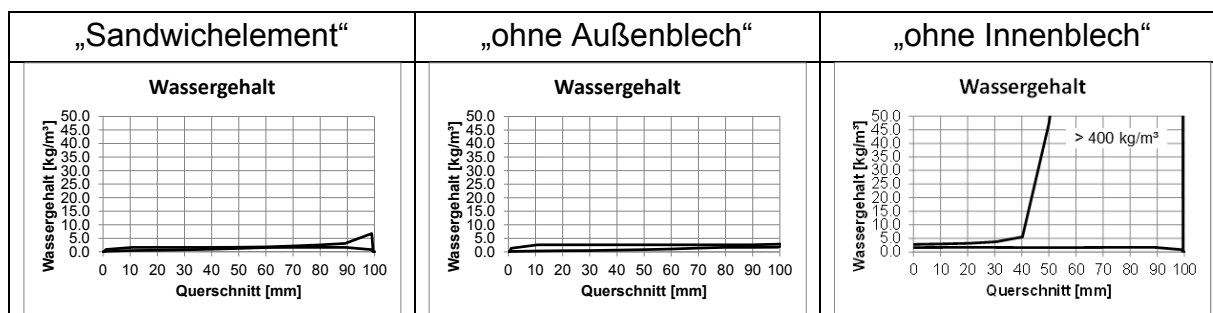


Abbildung 2-89: Ergebnisse „MW w“ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-89: Results “MW w” for method according to DIN EN 15026

Um eine Aussage hinsichtlich des Austrocknungsvermögens des Gesamtquerschnitts zu erhalten, wurde in einem weiteren Schritt der im Querschnitt vorhandene integrale Wassergehalt in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt. Abbildung 2-90 zeigt die zugehörigen Diagrammdarstellungen.

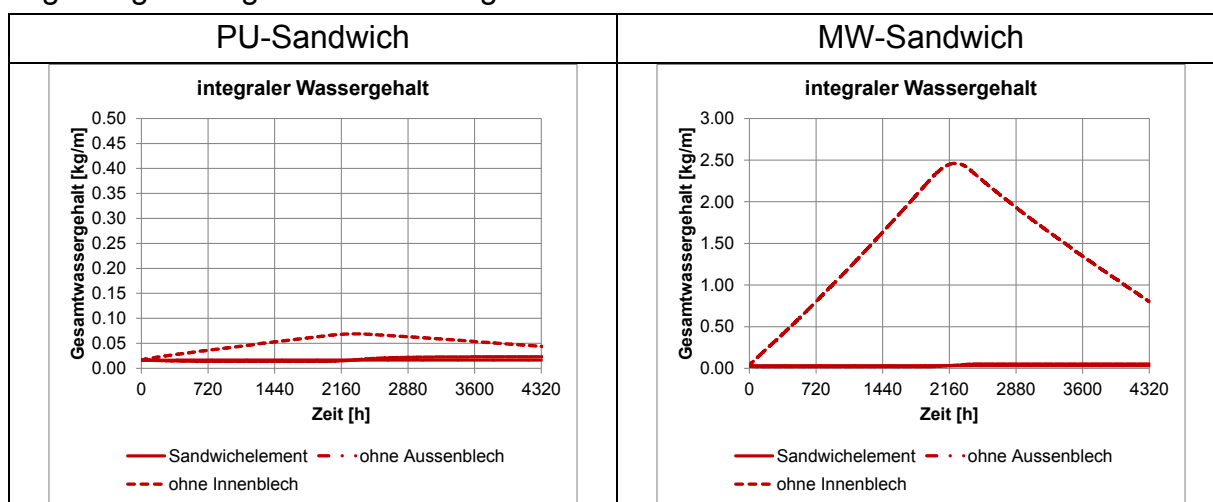


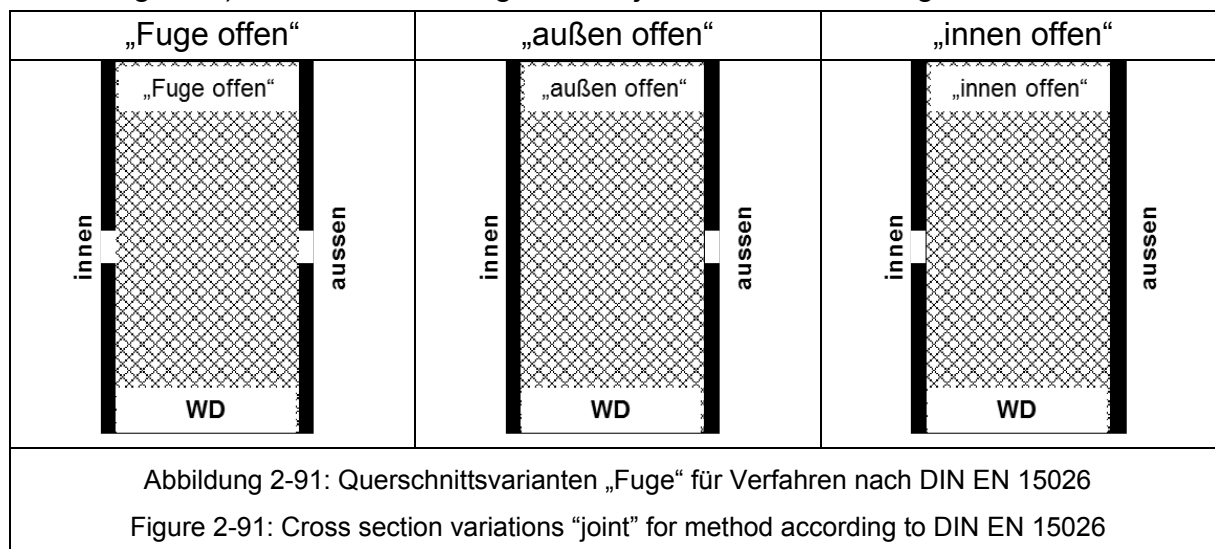
Abbildung 2-90: Ergebnisse „w_{tot}“ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-90: Results “w_{tot}” for method according to DIN EN 15026

Es ist zu erkennen, dass das Gesamtfeuchteniveau für die beiden Varianten „Sandwichelement“ und „ohne Außenblech“ unabhängig vom Dämmstoff sehr niedrig und auch nahezu konstant ist. Die Variante „ohne Innenblech“ hingegen zeigt in der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraum – d.h. in der Tauperiode nach DIN 4108-3 – eine deutliche Auffeuchtung. Insbesondere bei der MW-Dämmung nimmt der Wassergehalt stark zu. Zu beachten ist bei der Darstellung, dass die beiden Diagramme unterschiedliche Abszissengrößen besitzen.

In der Verdunstungsperiode ist zu erkennen, dass eine Austrocknung stattfindet. Allerdings ist dieser Effekt bzw. die Dauer des Auftretens dieses Effektes für beide Dämmstoffe nicht ausreichend, um auf das anfängliche Feuchteniveau absinken zu können. Vor allem ist dieses Phänomen bei der MW-Dämmung zu beobachten, so dass hier von einer langfristigen Feuchtansammlung ausgegangen werden muss – eine positive Feuchtebilanz ist nicht gegeben.

Da die drei Querschnittsvarianten entsprechend angelegt wurden, um die auftretenden Effekte zu beurteilen, dienen diese Berechnungen dazu, zu zeigen, dass Sandwichelemente im Regelquerschnittsbereich feuchtetechnisch unbedenklich sind, so lange keine Fehlstelle vorhanden ist. Die Untersuchungen lassen sogar die Vermutung zu, dass eine Fehlstelle im außenliegenden Blech ebenfalls unschädlich ist. Um dieser Vermutung nachzugehen, wurden die nachfolgend dargestellten vereinfachten Fugenvarianten mittels numerischer Untersuchungen betrachtet (siehe Abbildung 2-91). Die Breite der Fuge wurde jeweils mit 5 mm angesetzt.



Die Klimarandbedingungen wurden nicht verändert und sind in Abbildung 2-85 zu finden.

Die Darstellungsweise der Ergebnisse entspricht ebenfalls der bereits zuvor verwendeten. Betrachtet wurde jeweils der Querschnittsbereich, der sich durch einen Schnitt in der Mitte der Fuge ergibt.

Abbildung 2-92 und Abbildung 2-93 zeigen die Verläufe der relativen Luftfeuchten bzw. des Wassergehaltes für das Sandwichelement mit PU-Dämmung. Die Aussagen hinsichtlich der Ansammlung der Feuchtigkeit im Bereich der Stahlbleche gelten entsprechende. Auch die Berechnungen der Fugenvariante zeigen, dass es zu einer Feuchttakkumulation innerhalb des Querschnitts kommt, falls die Feuchtigkeit

ungehindert von innen in das Bauteil eindringen kann. Die Variante „innen offen“ ist als ungünstigste zu bewerten.

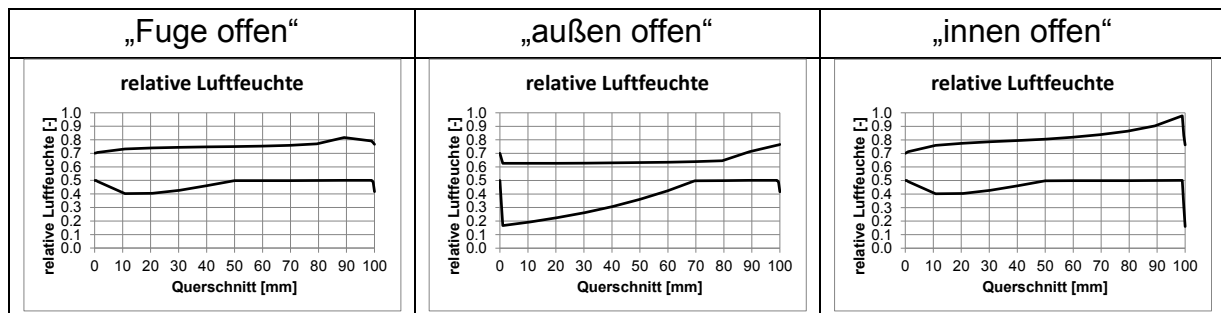


Abbildung 2-92: Ergebnisse „PU Fuge ϕ “ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-92: Results “PU joint ϕ ” for method according to DIN EN 15026

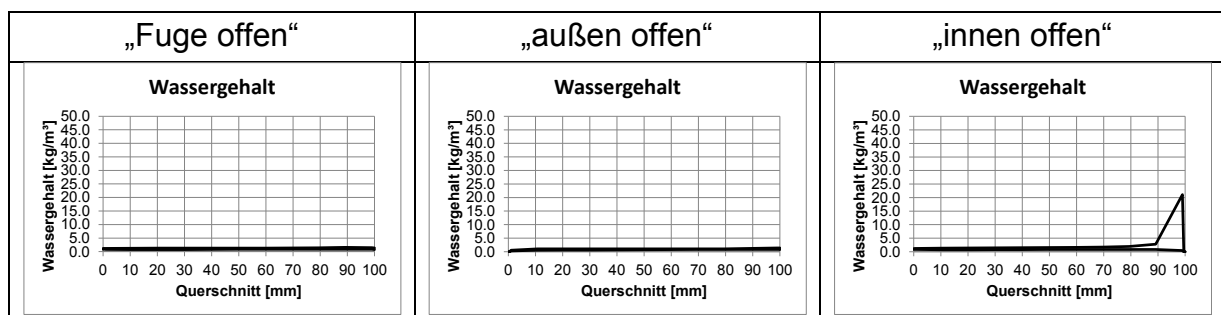


Abbildung 2-93: Ergebnisse „PU Fuge w“ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-93: Results “PU joint w” for method according to DIN EN 15026

In Abbildung 2-94 und Abbildung 2-95 sind die Ergebnisse, die mit MW-Dämmung erzielt wurden, zu finden. Der Bereich, für den die relative Luftfeuchte größer oder nahe an 100 % liegt, ist bei der Variante „innen offen“ zwar nicht so groß wie bei dem zuvor diskutierten Beispiel. Allerdings steigt auch hier der Wassergehalt im Querschnitt enorm an.

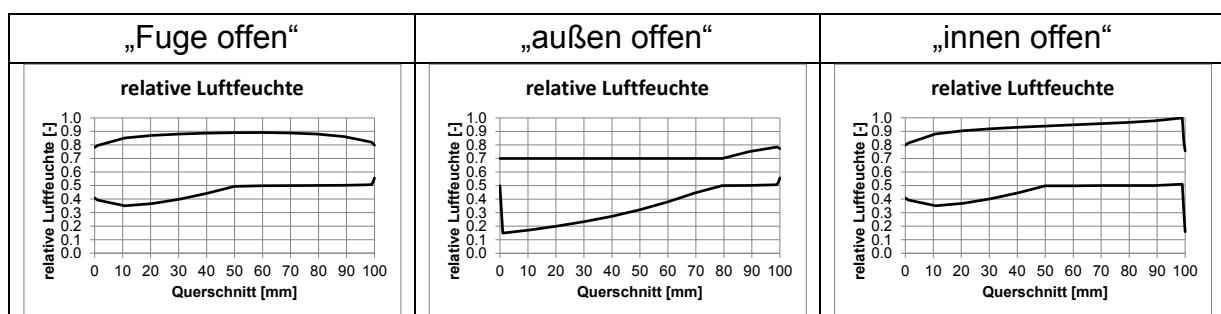


Abbildung 2-94: Ergebnisse „MW Fuge ϕ “ für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 2-94: Results “MW joint ϕ ” for method according to DIN EN 15026

Als Ursache sei an dieser Stelle erneut auf die Feuchtespeicherfunktion und die größere Hygroskopie von Mineralwolle verwiesen.

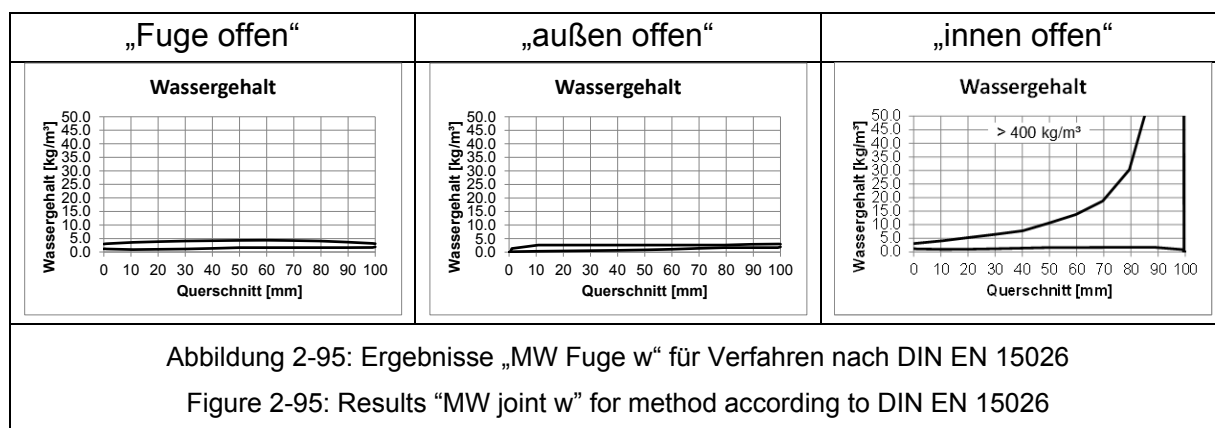
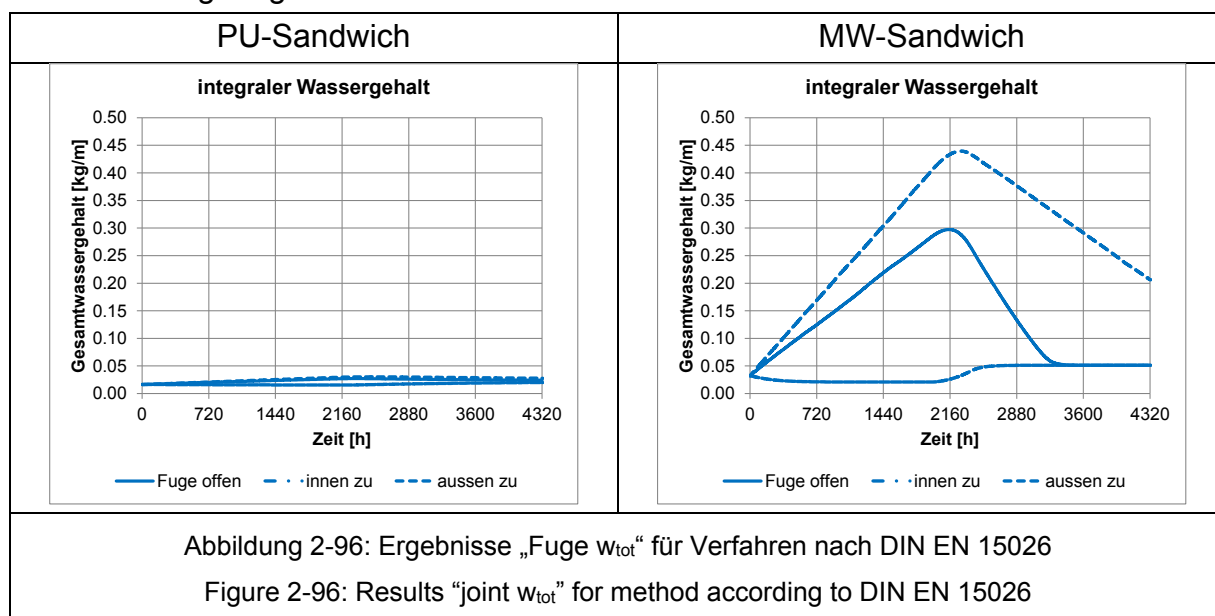


Abbildung 2-96 zeigt wiederum eine zeitabhängige Darstellung des Gesamtwassergehaltes. Für beide Dämmstoffe liegen die Werte in ähnlichen Größenordnung, die im Vergleich zu den in Abbildung 2-90 für Mineralwolle auftretenden gering sind.



Insbesondere bei der Verwendung von Mineralwolle zeigen sich weitere Effekte. Zum einen kommt bei einer außen geschlossenen Fuge – ähnlich wie bei der Variante ohne Innenblech – zu einer Feuchteansammlung innerhalb der Tauperiode, wenn sich auch die Größenordnungen unterscheiden. In so in das Bauteil eindringenden Feuchtigkeit kann in der Verdunstungsperiode nicht vollständig wieder entweichen. Für die Variante mit offener Fugen auf beiden Seiten dringt ebenfalls Feuchtigkeit in der Tauperiode ein, kann aber innerhalb der Verdunstungsperiode wieder entweichen ist somit als unschädlich einzustufen. Bei der Varianten mit einer Fuge, die innen geschlossen ist – d.h. außen ist die Fuge offen – kommt es zur Inversion der Effekte: in der Tauperiode kann das Bauteil nach außen hin austrocknen, feuchtet sich aber in der Verdunstungsperiode von außen wiederum auf, allerdings nur bis zu einer Größe, die der Anfangsfeuchte entspricht.

2.2.3 Luftdichtheitsqualität Air tightness quality

2.2.3.1 Grundlagen Background

Die Forderung nach einer möglichst luftundurchlässigen Gebäudehülle leitet sich aus den normativ-gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich der Energieeinsparung ab. Danach sind die Energie- bzw. Wärmeverluste, die in Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste eingeteilt werden können, so weit wie möglich zu reduzieren. Während der Transmissionsanteil den Beitrag durch Wärmeübertragung in Form von Wärmeleitung durch die (Baustoffe und -teile der) Gebäudehülle umfasst (siehe dazu die Ausführungen zur thermischen Qualität von Gebäudehüllen, u.a. Abschnitt 2.2.1), sind im Lüftungsanteil alle energetischen Verluste, die als direkte Folge einer (konvektiven) Luftdurchströmung der Gebäudehülle entstehen, enthalten. Dabei sind insbesondere lokale Fehlstellen in Anschlussbereichen von wesentlicher Bedeutung.



Abbildung 2-97: Luftdichtheitsprüfsand, BlowerDoor-Messung und Leakage-Ortung mit Nebel
Figure 2-97: Air tightness testing rig, BlowerDoor measurement and leakage location with fog

Somit ist vom energetischen Standpunkt aus eine möglichst luftdichte Gebäudehülle und eine Vermeidung von Leckagestellen anzustreben. Hier ist neben einer

entsprechenden Planung insbesondere die sorgfältige und fachgerechte praktische Ausführung maßgebend.

Zur Bewertung bzw. Untersuchung der Qualität der Luftdichtheit werden meist experimentelle Methoden verwendet. Auf Bauteilebene lassen sich mit standardisierten Luftdichtheitsprüfstände, die auf Laborverfahren nach DIN EN 12114 zurückzuführen sind, quantitative Messungen und Beurteilung durchführen. Um die Luftdichtheit von Gesamtgebäuden zu bestimmen und zu bewerten, kommen BlowerDoor-Messungen als Vor-Ort-Verfahren nach DIN EN 13829 zum Einsatz. Insbesondere in Verbindung mit Infrarot-Messungen können so Fehlstellen in der Gebäudehülle identifiziert werden. In Abbildung 2-97 sind exemplarisch die Untersuchungsmethoden aus dem Bereich Luftdichtheit dargestellt.

2.2.3.2 Massive Bauweise **Massive constructions**

Für Bauteil in massiver Bauweise, bei denen Beton, Porenbeton oder Mauerwerk in lastabtragender Funktion Anwendung finden, wird in diesem Kontext auf die Anforderungen, Vorgaben und Ausführungshinweise in DIN 4108-7 verwiesen. Hinsichtlich der darin angegebenen Prinzip- und Beispielskizzen sei darauf verwiesen, dass explizit auch andere Lösungen zulässig sind, wenn das Prinzip der Luftdichtheit eingehalten wird.

2.2.3.3 Stahlleichtbauweise **Lightweight steel constructions**

Die Luftdichtheit der im Rahmen des Forschungsvorhabens berücksichtigten Bausystemen in Stahlleichtbauweise hängt aufgrund der als luft- und dampfdicht anzusehenden Regelquerschnittsbereich (siehe u.a. DIN EN 14509) in großem Maß von der Planungs- und Ausführungsqualität der Anschlussdetails im Allgemeinen sowie der Sandwichlängs- und Kassettenstoßfugen im Speziellen ab.

Angaben und Hinweise zur vorhandenen und erreichbaren Luftdichtheitsqualität sind beispielsweise innerhalb des FOSTA-Forschungsprojektes P 880 [35] zu finden. Die Inhalte des zugehörigen Abschlussberichtes fassen den Stand der Technik auf diesem Feld zusammen. Daher wird an dieser Stelle darauf verzichtet, die Ergebnisse im Einzelnen aufzuführen und stattdessen auf den Bericht verwiesen.

2.3 Statische Aspekte **Statical aspects**

2.3.1 Dach- und Wandkonstruktionen in Stahlleichtbauweise **Roof- and façade in lightweight steel construction**

2.3.1.1 Allgemeines **Preface**

Gebäudefassaden in Stahlleichtbauweise werden derzeit in der Regel aus Stahl-Sandwich-elementen oder Stahl-Kassettenprofilkonstruktionen hergestellt und vorwiegend im Industriebau eingesetzt. Auf Grund zahlreicher ökonomischer und

technologischer Vorteile konnten sich diese beiden Stahlleichtbausysteme gegen Ende des letzten Jahrhunderts gegen die bis dahin üblichen, massiven Fassadenbauweisen durchsetzen und dominieren heute den Markt. Zunächst wurden diese Fassadentypen wegen ihres einfachen, bedingt durch die Produktionsprozesse linienförmigen Erscheinungsbildes nur in Gebäuden mit geringem architektonischen Anspruch (beispielsweise Lager- und Produktionshallen) eingesetzt, technische Weiterentwicklungen, wie beispielsweise die verdeckte Befestigung in der Längsfuge der Sandwichelemente oder neuartige Außenschalen für die Kassettenprofilfassaden, ermöglichen heute auch den Bau optisch hochwertiger Fassaden für repräsentative Gebäude. Diesbezüglich wird auf [51] verwiesen.

Auch Dächer von Industrie- und Gewerbehallen werden in Stahlleichtbauweise ausgeführt. Dabei dominieren Stahl-Sandwichelemente und ein- oder mehrschalige Trapezprofilkonstruktionen den Markt.

Auf die statischen Grundlagen und Besonderheiten der genannten Stahlleichtbauweisen wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

2.3.1.2 Sandwichelemente **Sandwich panels**

2.3.1.2.1 Allgemeines **Preface**

Sandwichelemente im Bauwesen bestehen in der Regel aus zwei dünnen, dehnsteifen Deckschichten und einer dazwischenliegenden dicken, schubweichen Kernschicht. Durch die schub- und zugfeste Verbindung der einzelnen Schichten entsteht ein Verbundquerschnitt mit verändertem Tragverhalten, der sogenannte „Sandwicheffekt“. Die Kombination der jeweils günstigen Eigenschaften der unterschiedlichen Deckschicht- und Kernmaterialien ermöglicht den Abtrag vergleichsweise großer Lasten bei äußerst geringem Eigengewicht. [50] Im üblichen Hochbau werden in der Regel Deckschichten aus Stahl und die Kernmaterialien Polyurethan (PUR), beziehungsweise Polyisocyanat (PIR) und Mineralwolle (MW) verwendet. Durch die sehr guten Wärmedämmeigenschaften dieser Kernmaterialien können die Funktionen „Dichten“, „Dämmen“ und „Tragen“ in einem einzigen Bauteil vereint werden. Die schnelle und einfache Montage der Sandwichelemente erlaubt eine rasche und effiziente Bauausführung selbst unter widrigen Witterungsbedingungen [40].



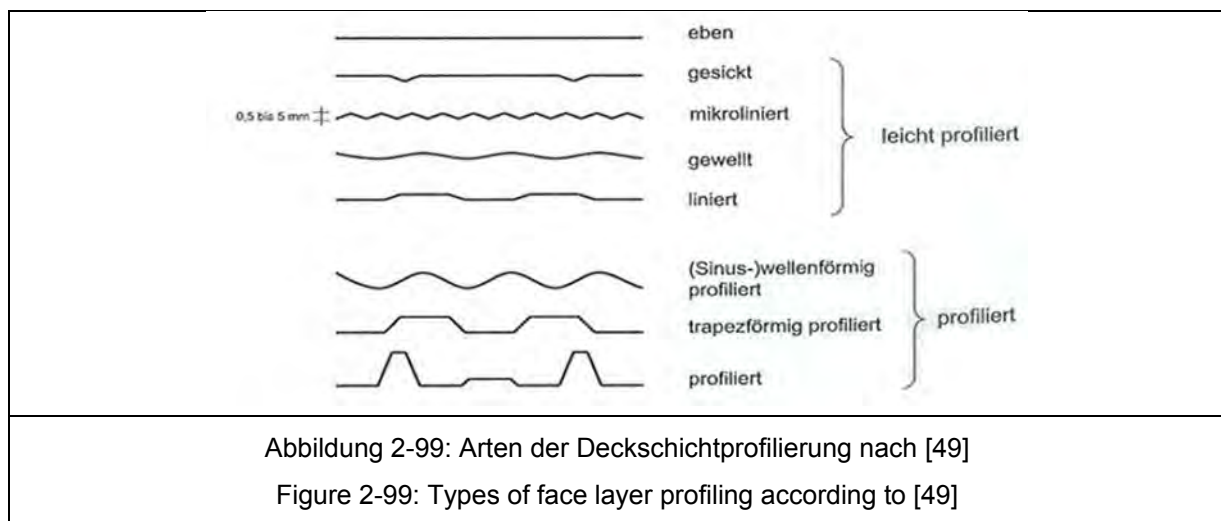
Abbildung 2-98: Industriehalle mit einer Fassade aus Sandwichelementen

Figure 2-98: Industrial application of sandwich panels

2.3.1.2.2 Deckschichten

Face-layer

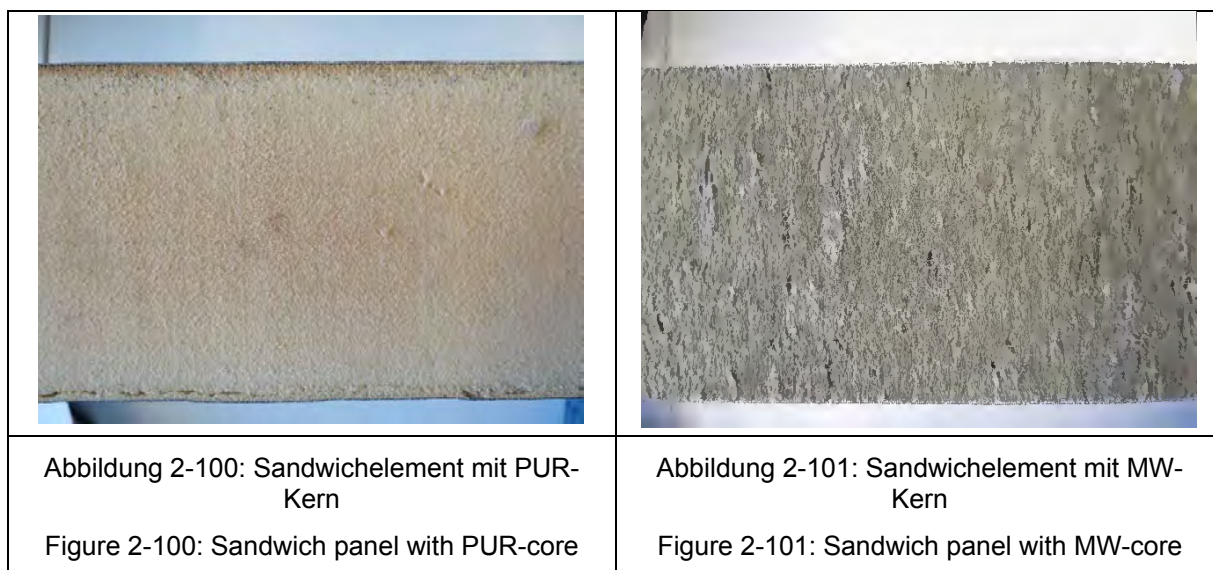
Die Deckschichten von Sandwichelementen werden im Wesentlichen durch Zug- und Druckspannungen beansprucht, die sich aus dem Biegemoment infolge äußerer Einwirkung ergeben. Folglich müssen sie über eine hohe Steifigkeit verfügen. Aus der gebäudeabschließenden Funktion der Sandwichelemente ergeben sich weitere Anforderungen an die Deckschichten, wie beispielsweise Schlag- und Verschleißfestigkeit, Widerstand gegen Umwelteinflüsse und eine hohe Oberflächengüte. All diesen Anforderungen kann der Werkstoff Stahl genügen, weshalb er in der Regel für Sandwichelemente im Bauwesen verwendet wird. Die Stahldeckschichten müssen gemäß den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für Sandwichelemente in Deutschland (siehe dazu Abschnitt 2.3.1.2.6) in der Regel eine Mindeststreckgrenze von 220 N/mm^2 und eine Mindestblechdicke von $0,5 \text{ mm}$ im Außenbereich und $0,4 \text{ mm}$ im Innenbereich aufweisen. Üblicher Weise werden die Deckschichten für Sandwichelemente im Bauwesen aus Stahl der Güte S320GD (1.0250) oder S350GD (1.0529) hergestellt und werkseitig mit einem Korrosionsschutzsystem versehen [40]. Dabei werden Feuerverzinkung, eine organische Beschichtung oder Duplexsysteme angewendet. Bei der Farbwahl der äußeren Deckschicht müssen Beanspruchungen infolge Temperaturdifferenz beachtet werden, siehe dazu Abschnitt 2.3.1.2.6. Gemäß [45] und [46] werden die drei Farbgruppen sehr hell, hell und dunkel unterschieden. Die Deckschichten von Sandwichelementen werden heute in der Regel profiliert. Nach [49] werden drei Arten der Oberflächenstruktur unterschieden: eben (keine Profilierung), leichte Profilierung mit $h \leq 5 \text{ mm}$ und starke Profilierung. Die folgende Abbildung 2-99 zeigt die im Bauwesen üblichen Deckschichtprofilierungen und ihre Bezeichnungen.



Stark profilierte Deckschichten werden häufig im Dachbereich eingesetzt, da die Längsfuge in den Hochsicken einfacher Witterungsbeständig ausgeführt werden kann. Zusätzlich können stark profilierte Deckschichten im Dachbereich auf Grund ihrer hohen Eigensteifigkeit einer Eigengewichtsverformung infolge Kriechens des Kernmaterials entgegenwirken. Leichte Profilierungen erhöhen die aufnehmbare Drucknormalspannung im Deckblech, die Knitterspannung. Zusätzlich haben sie den gestalterischen Vorteil, dass leichte Unebenheiten, Dellen und Beulen an der Oberfläche kaschiert werden.

2.3.1.2.3 Kernmaterialien Core materials

Die Kernschicht von Sandwichelementen muss trotz niedriger Dichte über ein vergleichsweise hohes Schubmodul, eine hohe Scherfestigkeit und hohe Steifigkeit senkrecht zu den Deckschichten verfügen. Als Kernmaterial für Sandwichelemente im Bauwesen können nach [49] Polyurethan- bzw. Polyisocyanathartschaum (PUR bzw. PIR), extrudiertes Polystyrol (EPS, XPS), Phenolharzschäume, Schaumglas und Mineralwolle (MW) eingesetzt werden. Dabei dominieren wegen ihrer sehr guten Wärmedämmeigenschaften die PUR- und PIR-Produkte den Markt in Deutschland. Bei erhöhten Schall- und Brandschutzanforderungen und aus ökologischen Gründen werden (nicht brennbare) MW-Produkte eingesetzt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Querschnitt von Sandwichelementen mit PUR- (Abbildung 2-100) und MW-Kern (Abbildung 2-102).



Polyurethan-Hartschaum besteht im Wesentlichen aus Polyol, Isocyanat und einem Treibmittel, in der Regel Pentan. Werden Polyol und Isocyanat in flüssigem Zustand gemischt, kommt es zu einer chemischen Reaktion, die das Verdampfen des Treibmittels hervorruft. Das entstandene Gemisch schäumt je nach Treibmittelkonzentration bis zu seinem 30- bis 50-fachen Volumen auf und die feinporige Struktur entsteht. PUR und PIR haben vor dem vollständigen Erhärten eine klebrige Zwischenphase, die eine dauerhafte Verbindung mit den Deckschichten ermöglicht. Das in den Zellen eingeschlossene Treibmittel ermöglicht mit seiner niedrigen Wärmeleitfähigkeit die guten Wärmedämmeigenschaften, die geschlossene Zellstruktur begünstigt ein gutes Feuchteverhalten. So kann Wasser nur an angeschnittenen Zellen aufgenommen werden. Dauerhaft temperaturbeständig ist PUR bei Temperaturen zwischen - 30 und + 90 °C. PIR ist wegen einer gegenüber PUR höher vernetzten Struktur bis zu + 170 °C temperaturbeständig und weist ein besseres flammenschutztechnisches Verhalten auf. [17]

Der Begriff Mineralwolle umfasst die Werkstoffe Steinwolle und Glaswolle. Für Sandwichelemente im Bauwesen werden in der Regel gepresste Platten aus Steinfasern genutzt. Bedingt durch den Herstellungsprozess hängen die mechanischen Eigenschaften stark von der Fasergeometrie und der Faserrichtung ab. [47] Daher ist es, um hohe Festigkeiten zu gewährleisten, wichtig, dass die einzelnen Fasern lotrecht zur Deckschicht angeordnet werden. [17] Mineralwolle hat eine deutlich höhere Rohdichte als PUR oder PIR, was zu einem höheren Eigengewicht, aber besseren Schallschutzeigenschaften der gesamten Sandwichkonstruktion führt. Steinwolle hat eine gute Brandbeständigkeit, erst bei zirka 800 °C beginnt ein Zusammensintern des Materials und der Schmelzpunkt liegt bei 1000 °C. Die Wärmedämmeigenschaften von Sandwichelementen mit Mineralwollkern sind schlechter als die von PUR- oder PIR-Sandwichelementen.

In der folgenden Tabelle 2-13 sind die wesentlichen Materialeigenschaften des Deckschichtmaterials Stahl und der Kernmaterialien PUR und MW zusammengestellt. Hinweise: Bei den zusammengestellten Werten handelt es sich lediglich um Anhaltswerte, die einer groben Einordnung der Materialien dienen sollen, einzelne am Markt erhältliche Produkte können abweichen. Zur Verbindung von MW-Kern und

Deckschicht ist eine zusätzliche Klebschicht erforderlich, diese wird hier jedoch auf Grund des geringen Einflusses auf das Gesamtverhalten vernachlässigt.

Tabelle 2-13: Unterschiedliche Materialeigenschaften der einzelnen Schichten eines Sandwichelementes [51]

Table 2-13: Different material properties of the individual layers of a sandwich element [51]

Eigenschaft	Deckschicht Stahl	Kernschicht PUR	Kernschicht MW
Rohdichte [kg/m ³]	7860	35 bis 45	90 bis 150
Elastizitätsmodul [N/mm ²]	210.000	2 bis 6	1)
Schubmodul [N/mm ²]	81.000	2 bis 5	1)
Druckfestigkeit [N/mm ²]	320 bis 350	0,10 bis 0,15	1)
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	50	≤ 0,025	≤ 0,045
Baustoffklasse (DIN 4102-1)	A1	B1 bis B3	A1 bis A2
1) stark abhängig von der Faserrichtung der Mineralwolle			

2.3.1.2.4 Produktionsverfahren Production methods

Sandwichelemente im Bauwesen werden in der Regel im Doppelbandverfahren hergestellt. Dabei werden Ober- und Unterschale von zwei unterschiedlichen Coils abespult und an ihren Oberflächen und Längsrändern profiliert. An den Längsrändern entstehen typische Nut- und Federstöße, die eine einfache Montage ermöglichen. Anschließend wird in einem kontinuierlichen Prozess das Kernmaterial eingebracht und verklebt. Folglich ist bei diesem Herstellungsprozess die Breite der Elemente fest vorgegeben und die Länge variabel. Die folgende Abbildung 2-102 zeigt schematisch die kontinuierliche Sandwichherstellung in einer Doppelbandanlage.

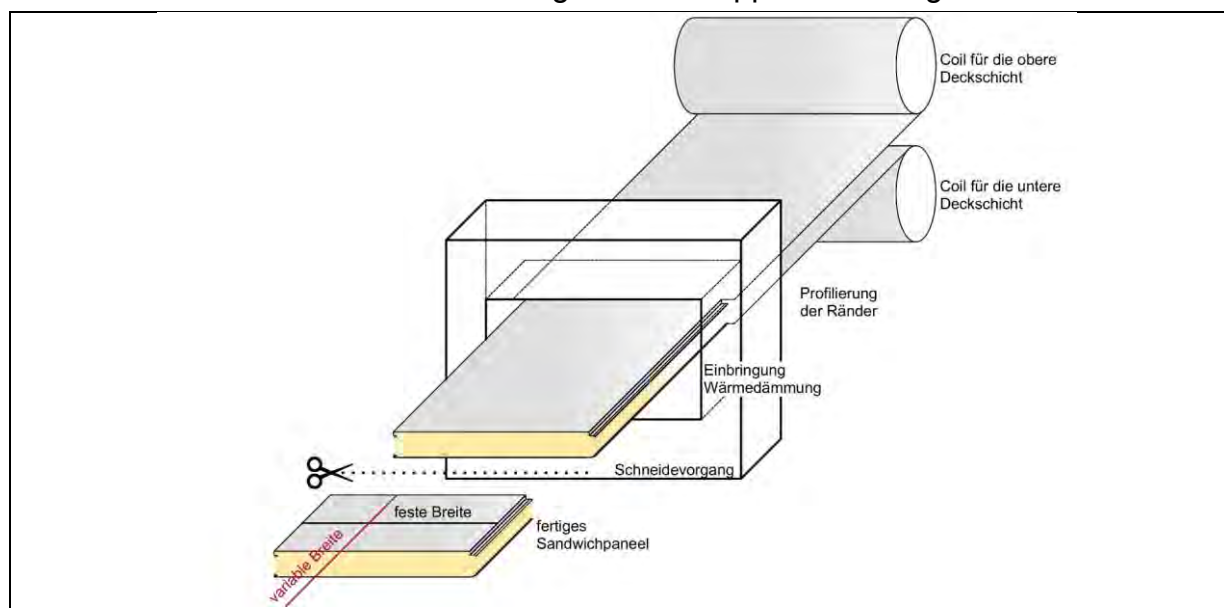


Abbildung 2-102: Kontinuierliche Sandwichherstellung in einer Doppelbandanlage [51]

Figure 2-102: Continuous sandwich production in a double belt plant [51]

Auch eine diskontinuierliche Herstellung von Sandwichelementen in Stückfertigung ist möglich. Dabei werden zunächst die vorgefertigten Deckschichten in einer Stützform fixiert. Anschließend wird das Kernmaterial eingebracht. Bei diesem Verfahren können Sandwichpanelle mit Profilierung an den Längs- und Querrändern und Längen bis ca. 15 m produziert werden. Dieses Herstellungsverfahren ist aufwendiger, deshalb unwirtschaftlicher und damit weniger verbreitet.

2.3.1.2.5 Befestigung Fastening

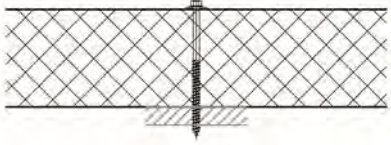

Für die Befestigung von Sandwichelementen stehen zwei grundlegend unterschiedliche Methoden zur Verfügung [49]. Zum einen können die Elemente direkt in einer Durchsteckmontage mit der Unterkonstruktion kraftschlüssig verbunden werden [46]. Diese Verankerung durchstößt das Sandwichelement und führt damit zu einer wärmeschutz- und dichtungstechnischen Schwächung, kann dafür aber flexibel auf dem Sandwichelement angebracht werden. Im Fassadenbereich ist der größte Nachteil dieser Verankerung die Sichtbarkeit der Schraubenköpfe. Die damit verbundene geringe optische Qualität hat in der Praxis dazu geführt, dass diese Verankerung baupraktisch immer seltener ausgeführt wird. Die folgende Abbildung 2-103 zeigt sichtbare Schraubenköpfe an der Außenseite eines Sandwichelementes in typischer äquidistanter Anordnung.



Abbildung 2-103: Direkte Befestigung in Durchsteckmontage [51]

Figure 2-103: Direct fixing in push-trough installation [51]

Alternativ können Sandwichelemente indirekt / verdeckt verankert werden. Bei dieser Befestigungsmethode werden die Sandwichelemente nicht sichtbar in ihren profilierten Längsfugen verankert. Eine Übergreifung der Elemente in der Längsfuge verdeckt dabei die Schraubenköpfe, siehe Abbildung 2-104 (rechts). Da bei dieser Methode die Sandwichelemente nur an einem Längsrand mit der Unterkonstruktion verschraubt werden und der andere Längsrand in der Fuge eingehängt wird, ist die Tragfähigkeit gegenüber der direkten Befestigung teilweise deutlich reduziert.

Herkömmliche Verankerung in Durchsteckmontage (sichtbare Befestigung)	Durchsteckmontage im Elementlängsstoß (verdeckte Befestigung)
	
<p>Abbildung 2-104: Direkte und indirekte Verankerung von Sandwichelementen [51] Figure 2-104: Direct and indirect mounting of sandwich panels [51]</p>	

2.3.1.2.6 Normative Regelungen und bauaufsichtliche Belange Normative regulations and building inspectorate issues

Die europäische Normenreihe EN 14509 [29] regelt den Einsatz von Sandwich-elementen seit Oktober 2010. Dabei ist erforderlich, dass alle verwendeten Elemente über eine CE-Kennzeichnung verfügen. In Deutschland sind bislang zusätzlich allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen durch das Deutsche Institut für Bautechnik erforderlich. [45],[46] Diese bauaufsichtlichen Zulassungen geben die Tragfähigkeitswerte für die verschiedenen Versagensmechanismen, wie beispielsweise die Knittertragfähigkeit von druckbeanspruchten Deckschichten an. Für die Befestigungsmittel gibt es gesonderte allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, die zusätzlich beachtet werden müssen. Hier werden beispielsweise Tragfähigkeiten für das Überknöpfen des Schraubenkopfes aus dem Deckblech oder das Herausziehen der Schraube aus der Unterkonstruktion angegeben. Die in den bauaufsichtlichen Zulassungen ausgewiesenen Bemessungsgrößen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit werden anhand von umfangreichen experimentellen Untersuchungen ermittelt. Auch für Sonderbefestigungen, wie etwa die verdeckte Befestigung werden zur Erlangung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Zusätzlich gibt es für bislang nicht bauaufsichtlich geregelte technische Problemstellungen Empfehlungen der Europäischen Konvention für Stahlbau (ECCS Recommendation des Technical Committee 7), die die neusten wissenschaftlichen Erkenntnisse zusammenfassen. Diese Empfehlungen werden vom Deutschen Institut für Bautechnik in der Regel im Zuge der Erwirkung einer bauaufsichtlichen Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall als Stand der Technik anerkannt.

2.3.1.3 Kassettenprofilfassaden Liner-tray Façades

2.3.1.3.1 Allgemeines Preface

Kassettenprofilfassaden sind zweischalige wärmegeämmte Wandkonstruktionen und bestehen in der Regel aus einer Kassettenprofil-Innenschale, einer Dämmung, die in die Kassettenprofile eingelegt wird und einer Außenschale, die die Dämmung vor Witterungseinflüssen schützt und die schmalen Kassettenurte gegen seitliches Ausweichen stabilisiert. Die modulare Bauweise der Kassettenprofilfassaden erlaubt

eine einfache und kostengünstige Montage. Auch für Sanierungen eignen sich Kassettenprofilfassaden in besonderem Maß, da der modulare Aufbau punktuelle Veränderungen und einen einfachen Rückbau ermöglicht.

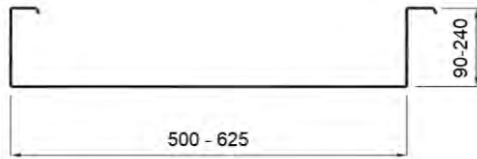
2.3.1.3.2 Kassettenprofile

Liner trays

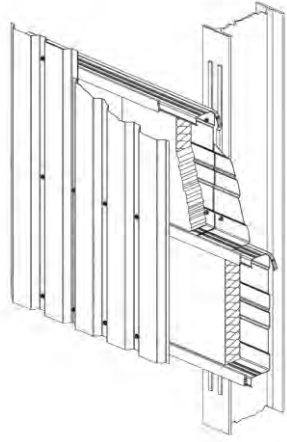
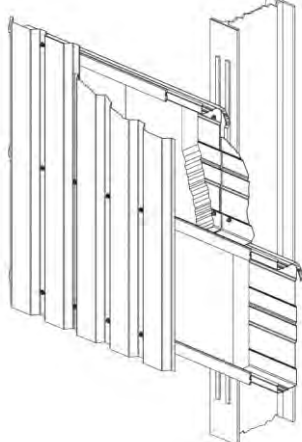
Die Stahlkassettenprofile haben in der Regel eine Breite von 500 bis 625 mm und eine Länge von 2.000 bis 18.000 mm. Die Höhe der Kassettenprofile korrespondiert mit der Dämmdicke des Fassadensystems und kann entsprechend der bauphysikalischen und statischen Anforderungen gewählt werden. Die Blechdicke kann zwischen 0,75 und 1,5 mm gewählt werden. Stahlkassettenprofile werden im Allgemeinen aus Stahlblech der Sorten S 280 GD (1.0244), S 320 GD (1.0250) und S 350 GD (1.0529) nach DIN EN 10346 durch Kaltumformen hergestellt. Diese Stahlbleche haben im kontinuierlichen Schmelztauchverfahren hergestellte Zinküberzüge, die häufig mit zusätzlichen Kunststoffbeschichtungen versehen werden. [43]

Tabelle 2-14: Typische Abmessungen und Daten von Stahlkassettenprofilen

Table 2-14: Typical liner tray dimensions and data


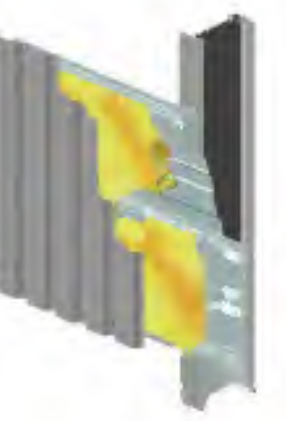
Profilhöhe [mm] Baubreite [mm]	Abmessungen Profilquerschnitt	Blechdicke [mm]	Eigenlast [kN/m ²]
90 bis 240 500 bis 625		0,75; 0,88; 1,00; 1,13; 1,25; 1,50	0,088 bis 0,231

Die Kassettenprofile werden horizontal verlegt und im üblichen Hallenbau direkt an der primären Tragstruktur befestigt. Die Ausrichtung der schmalen Gurte hat dabei keinen Einfluss auf das Tragverhalten und kann frei gewählt werden, siehe Abbildung 2-105 und Abbildung 2-106. Die Kassettenprofile können als Ein- oder Mehrfeldträger verlegt werden und Spannweiten bis zu 10 m erreichen. Das Tragverhalten von Kassettenprofilen ist komplex. Die Annahme ebener Querschnitte gilt nicht und die Spannungsverteilung im Querschnitt ist nichtlinear. Bei positiver Momentenbeanspruchung müssen lokales Beulen der druckbeanspruchten Querschnittsteile, die Forminstabilität des schmalen Gurtes („distortional buckling“) sowie das Eindrehen des breiten zugbeanspruchten Gurtes („flange curling“) berücksichtigt werden. Zusätzlich ist für den breiten Gurt der Einfluss der Schubverzerrung („shear lag“) zu berücksichtigen. Bei negativer Momentenbeanspruchung müssen für den breiten (druckbeanspruchten) Gurt die Effekte des Plattenbeulens, der Eindrehung der Gurte und der Schubverzerrung überlagert werden.

	
<p>Abbildung 2-105: Stahlkassettprofil-Wandkonstruktion (schmale Kassettengurte nach unten gerichtet) [44] Figure 2-105: Liner-tray façade system (small flange downwards) [44]</p>	<p>Abbildung 2-106: Stahlkassettprofil-Wandkonstruktion (schmale Kassettengurte nach oben gerichtet) [44] Figure 2-106: Liner-tray façade system (small flange downwards) [44]</p>

2.3.1.3.3 Dämmung Insulation

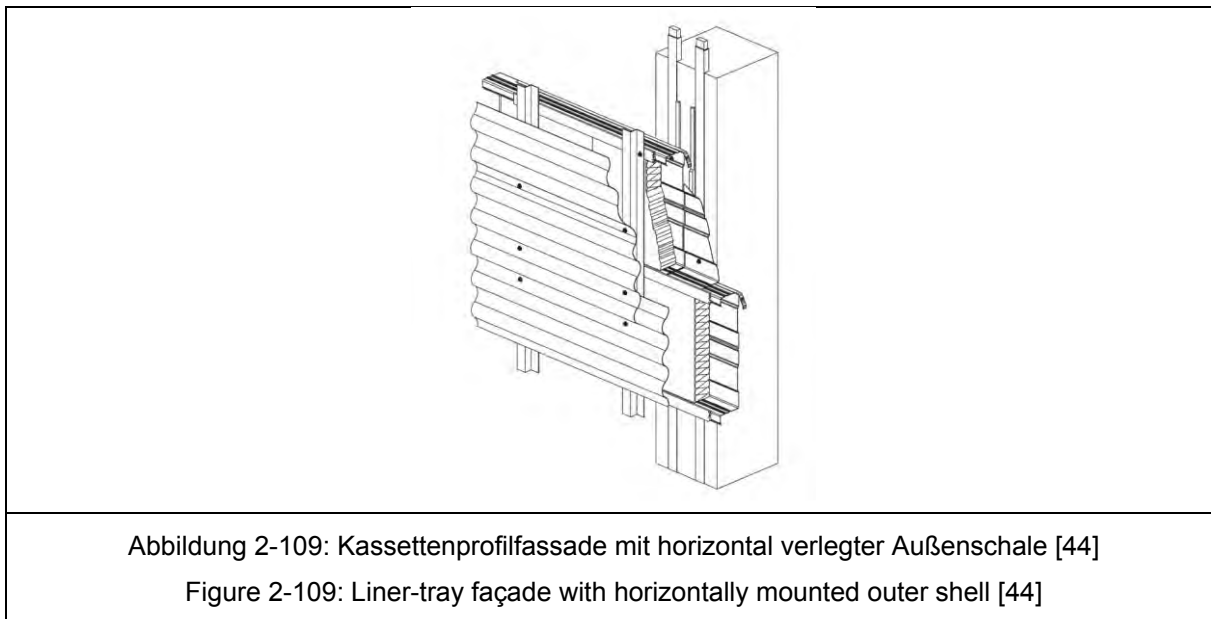
Die Dämmung der Kassettprofilfassaden wird zwischen den Kassettenteilen verlegt. Dafür bieten unterschiedliche Hersteller Dämmplatten an, die speziell für die jeweiligen Kassettprofile zugeschnitten sind. Diese Dämmplatten haben in der Regel eine Größe, die eine einfache händische Montage ermöglicht. Als Dämmmaterial in Kassettprofilfassaden wird Mineralwolle (häufig Steinwolle) verwendet. Neben den klassischen Dämmplatten, deren Dämmdicke der Höhe der Kassettenteile entspricht können Dämmplatten verwendet werden, die die Stege ca. 40 bis 60 mm überdecken und so durchgehende Wärmebrücken vermeiden. Das Eigengewicht der Dämmung wird bei der Bemessung der Kassettenteile in der Regel vernachlässigt.

	
<p>Abbildung 2-107: Kassettprofilfassade mit Dämmung zwischen den Stegen [41] Figure 2-107: Liner-tray façade with Insulation between webs [41]</p>	<p>Abbildung 2-108: Kassettprofilfassade mit Zusatzdämmung [41] Figure 2-108: Liner-tray façade with additional Insulation [41]</p>

2.3.1.3.4 Befestigung Fastening

Die Kassettenprofile werden zunächst an ihrer Unterkonstruktion oder direkt an einer primären Tragstruktur befestigt. Dazu können, je nach Material des Untergrundes (beispielsweise Stahl, Mauerwerk oder Beton) und Ausführungsvariante, unterschiedliche Befestigungsmittel gewählt werden. Je Auflager müssen gemäß den Prüfbescheiden (siehe Abschnitt 0) mehrere Befestigungsmittel angeordnet werden. Im üblichen Stahlhallenbau werden neben Bohrbefestigern häufig Setzbolzen verwendet. Zusätzlich werden die einzelnen Kassettenprofile innerhalb einer Fassade an ihren Stegen in vorgegebenem Abstand miteinander verschraubt. Für weiterführende Angaben zur Befestigung von Kassettenprofilfassaden wird auf [44] verwiesen. Auf die Verschraubung der schmalen Kassettenstege mit der Außenschale wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

2.3.1.3.5 Außenschale Outer shell



Die Außenschale von Kassettenprofilfassaden schützt die Dämmung des Fassadensystems vor Witterungseinflüssen und dient der optischen Gestaltung. Zusätzlich muss die Außenschale die stabilitätsgefährdeten schmalen Gurte der Kassettenprofile in einem vorgegebenen Abstand gegen seitliches Ausweichen stabilisieren. Die Außenschale kann horizontal oder vertikal verlegt werden. Trapezprofile als Außenschale werden in der Regel vertikal verlegt, um Schmutzablagerungen in den Tiefsicken zu vermeiden. Vertikal verlegte Trapezprofile können zur Stabilisierung gegen seitliches Ausweichen direkt im statisch erforderlichen Abstand mit den schmalen Kassettenurten verbunden werden, siehe Abbildung 2-107. Überdeckt die Dämmung die schmalen Gurte der Kassettenprofile (siehe Abbildung 2-108) können dafür sogenannte Distanzbefestiger verwendet werden. Horizontal verlegte Außenschalen werden an zusätzlichen, vertikal verlegten Z- oder Hutprofilen befestigt, die die schmalen Kassettenurte gegen seitliches Ausweichen stabilisieren, siehe Abbildung 2-109. Somit muss eine horizontal verlegte Außenschale

keine Lasten in ihrer Ebene abtragen und auch kleinteiligere Strukturen mit optisch ansprechenderem Erscheinungsbild sind prinzipiell möglich.

2.3.1.3.6 Normative Regelungen und bauaufsichtliche Belange *Normative regulations and building inspectorate issues*

Für kaltgeformte Profile ist derzeit DIN EN 1993-1-3 [54] gültig. In dieser Norm sind Bemessungsregeln zur Bestimmung der Momenten Tragfähigkeit von Kassettenprofilen enthalten. Für eine vereinfachte Bemessung werden in DIN EN 1993-1-3 abhängig von der Belastungsrichtung wirksame Querschnittsflächen definiert. Auf den wirksamen Querschnittsflächen basierend können die entsprechenden Biegemomentennachweise geführt werden. In DIN EN 1993-1-3 gibt es keine Angaben zu vertikalen Beanspruchungen der Kassettenprofile in Profiltafelebene (beispielsweise Eigengewicht). In DIN 18807-3/A1 [53] wird die Regelung zum Umgang mit Vertikallasten zur Verfügung gestellt, dass ein statischer Nachweis bis zu einem Bemessungswert der Eigenlast der Außenschale einschließlich gegebenenfalls vorhandener Distanzprofile von 0,23 kN/m² nicht erforderlich ist. Es wird also davon ausgegangen, dass gegenüber den senkrecht zur Fassade wirkenden Lasten (bislang in der Regel Windlasten) geringe Vertikallasten infolge Eigengewicht vernachlässigt werden können. Das Eigengewicht der Außenschalen wird nach [39] nicht über die Kassettenprofile, sondern an den zur seitlichen Halterung erforderlichen Festpunkten abgetragen. Diese Bauart ist üblich, und bei Systemen mit Distanzbefestigern sogar vorgeschrieben. Die analytische Ermittlung der Widerstandswerte der Kassettenprofile nach DIN EN 1993-1-3 kann zu konservativen Ergebnissen führen, sodass in der Praxis häufig versuchsgestützte Widerstandswerte verwendet werden. Diese liegen nach entsprechender Typenprüfung für die herstellereigenspezifischen Bauteilgeometrien tabelliert vor.

2.3.1.4 Trapez- und Wellprofile *Trapezoidal- and corrugated sheets*

2.3.1.4.1 Allgemeines *Preface*

Trapez- und Wellprofile können im Wand- und Dachbereich eingesetzt werden. Wegen der gegenüber Trapezprofilen schlechteren statischen Eigenschaften bei gleicher Bauhöhe und Blechdicke werden Wellprofile in der Regel nur als sichtbare Außenschale eingesetzt. Neben weiteren gestalterischen Gesichtspunkten ist der Vorteil der Wellprofile, dass sich in den Tiefsicken bei horizontaler Verlegung keine Schmutzablagerungen bilden. Wellprofile haben einen sinusförmigen Querschnitt und Bauhöhen bis 55 mm, Trapezprofile haben Bauhöhen bis 200 mm. Beide Profiltypen haben Baubreiten bis ca. 1.075 mm. bei den Trapezprofilen mit größerer Bauhöhe erhöhen Obergurt-, Untergurt- und Stegsicken sowie Stegversätze (in Längsrichtung eingeprägte Rillen und Nuten) die Tragfähigkeit [17]. Beide Profiltypen werden aus kontinuierlich feuerverzinktem, kunststoffbeschichtetem Stahlblech nach DIN EN 10346 in Rollformanlagen mit Doppelwalzen kontinuierlich hergestellt und haben in der Regel Blechdicken zwischen 0,75 und 1,5 mm. Gängige Lieferlängen bis 18 m sind üblich, auch größere Lieferlängen sind möglich. Trapez- und Wellprofile können auch

in gerundeter Ausführung auf Tonnen- und Bogendächern verlegt werden, siehe dazu [17].



Abbildung 2-110: Rollformanlage für Feiblech
 Figure 2-110: Roll forming line for thin sheets

Werden Trapez- und Wellprofile als Außenschale eines mehrschaligen Wand- oder Dachaufbaus eingesetzt haben sie nur eine untergeordnete statische Funktion. Als tragende Innenschale von mehrschaligen Wand- und Dachaufbauten werden in der Regel Trapezprofile verwendet. Die folgenden Abbildung 2-111 und Abbildung 2-112 zeigen beispielhaft einen mehrschaligen Wand- und Dachaufbau mit Trapezprofilen. Tragende Innenschalen werden im Dachbereich in „Positivlage“ verlegt (die breiten Gurte liegen oben), wasserführende Schichten werden in „Negativlage“ verlegt (die breiten Gurte liegen unten und die schmalen Gurte oben).

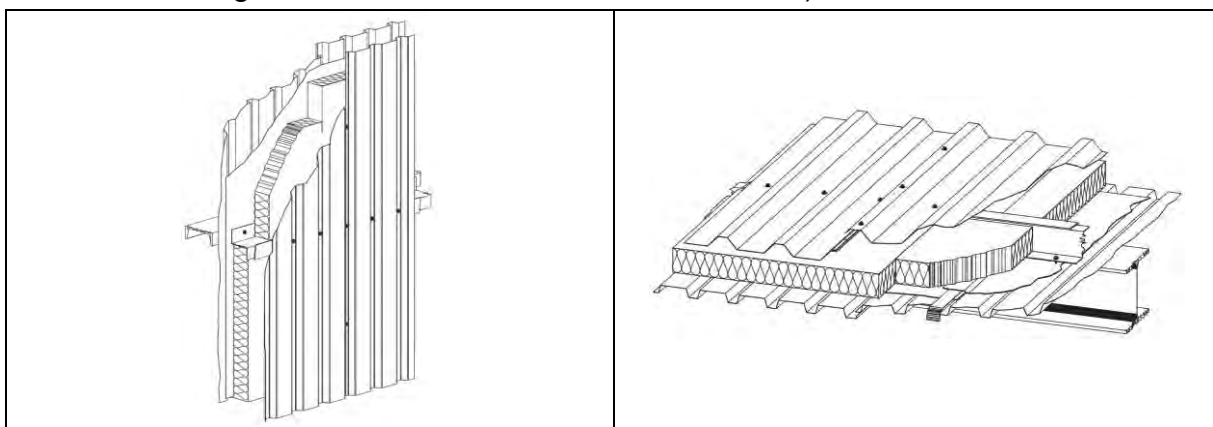


Abbildung 2-111: Zweischalige Riegel-Wandkonstruktion [44]
 Figure 2-111: Double-shell bolted wall construction [44]

Abbildung 2-112: Zweischaliges Trapezprofildach [44]
 Figure 2-112: Double-shell trapezoidal profile roof [44]

2.3.1.4.2 Trapezprofile als aussteifende Bauteile Trapezoidal sheets as stiffening components

Trapezprofile können auch zur seitlichen Stabilisierung stabilitätsgefährdeter Bauteile und zur globalen Aussteifung herangezogen werden. Die in der Ebene der

Trapezprofile vorhandene Schubsteifigkeit kann mit vorhandenen Bemessungsansätzen rechnerisch erfasst werden, siehe dazu [42], [17].

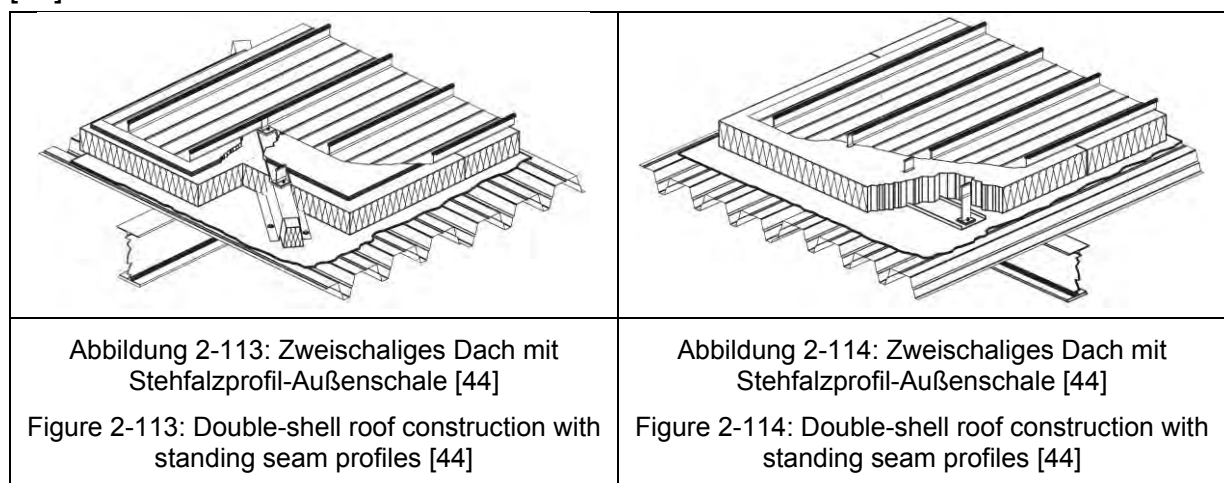
2.3.1.4.3 Normative Regelungen und bauaufsichtliche Belange
Normative regulations and building inspectorate issues

Die Verwendung von Trapezprofilen im Fassaden- und Dachbereich ist normativ geregelt. Derzeit gültig ist DIN EN 1993-1-3 [54], aber auch Teile der alten Normreihe DIN 18807 besitzen noch Gültigkeit [53]. Die Widerstandswerte von Trapezprofilen können rechnerisch oder versuchsgestützt ermittelt werden. Herstellerspezifische Bemessungstabellen weisen für die einzelnen Profilreihen bei Biegebeanspruchung Widerstandswerte und zulässige Stützweiten aus und erleichtern so die Nachweisführung in der Praxis.

2.3.1.5 Weitere Profiltypen
Other profile types

2.3.1.5.1 Stehfalzprofile
Standing seam profiles

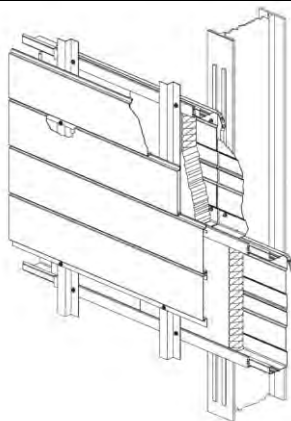
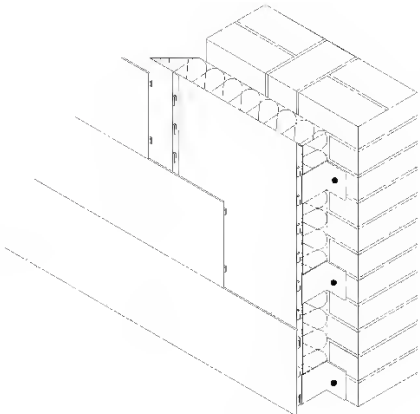
Stehfalzprofile werden im Dachbereich (als Außenschale) heute zunehmend eingesetzt. Stehfalzprofile werden vom First zur Traufe verlegt und verdeckt mit Klippverbindern befestigt. Diese Klippverbinder ermöglichen eine Montage ohne Durchdringungen der Dachhaut. Stehfalzprofile haben in der Regel eine Breite von 250 bis 800 mm. Die Längsstoßüberdeckungen werden mit speziellen Maschinen verbördelt. Die folgende Abbildung 2-113 und Abbildung 2-114 zeigen beispielhaft zweischalige Dachkonstruktionen mit unterschiedlicher Verlegerichtung der Trapezprofil-Innenschale. Stehfalzprofile benötigen in Deutschland eine Herstellerspezifische allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt, die auch die Klippverbinder umfasst. Für weitere Informationen zu Stehfalzprofilen wird auf [44], [17] verwiesen.



2.3.1.5.2 Fassadenprofile
Façade profiles

Neben den bereits genannten Profiltypen können für einen optisch hochwertigen Wandabschluss Fassadenprofile verwendet werden [17]. Diese Fassadenprofile

werden auch als „Sidings“, „Paneele“ oder „Liner“ bezeichnet und fast ausschließlich als Außenschale im Wandbereich eingesetzt. Fassadenprofile werden geschraubt, eingehakt oder mit Klammern an dafür vorgesehene Unterkonstruktionen befestigt. Als Unterkonstruktionen für einhakenbefestigte Fassadenprofile werden spezielle Hut- oder Z-Profile verwendet, die über entsprechende Profilierungen verfügen. Fassadenprofile können horizontal und vertikal verlegt werden und benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt. Fassadenprofile können auf unterschiedlichen Tragstrukturen verlegt werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 2-115 eine Kassettenprofilfassade mit einer horizontal verlegten Außenschale aus Fassadenprofilen, Abbildung 2-116 zeigt eine gedämmte Mauerwerkswand mit einer Fassadenprofil-Außenschale.

	
<p>Abbildung 2-115: Kassettenprofilfassade mit Fassadenprofil-Außenschale [44] Figure 2-115: Liner-tray façade with façade profile outer shell [44]</p>	<p>Abbildung 2-116: Gedämmte Mauerwerkswand mit Fassadenprofil-Außenschale Figure 2-116: Insulated brick wall with façade profile outer shell</p>

2.3.2 Baustatische Randbedingungen für Dach- und Fassadensanierungen Structural boundary conditions for renovation of roof and façade systems

Neben den aktuell gültigen Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen müssen bei Sanierungsmaßnahmen in Deutschland die Landesbauordnungen der einzelnen Bundesländer berücksichtigt werden. Hier heißt es in der Regel: „Bauliche Anlagen sowie andere Anlagen und Einrichtungen [...] sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet wird“ [55].

Im Sanierungsfall, also der „Änderung“ einer baulichen Anlage ist es häufig der Fall, dass sich die aktuellen bautechnischen Vorschriften gegenüber den zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen bautechnischen Vorschriften verändert haben. In diesem Fall ist zu klären, auf welcher Grundlage statische Nachweise zu führen sind. Dazu gibt das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) in [52] die folgenden Hinweise:

- Zunächst haben bauliche Anlagen grundsätzlich Bestandsschutz, auch wenn sie nicht mehr dem inzwischen geänderten Recht (den aktuellen Technischen

Baubestimmungen) entsprechen. Seitens der Bauaufsichtsbehörden kann dieser Grundsatz durch baurechtliche Verfügungen insbesondere dann durchbrochen werden, wenn Leben oder Gesundheit durch erhebliche Gefahren bedroht sind.

- Bei der Änderung baulicher Anlagen müssen die aktuellen Technischen Baubestimmungen beachtet werden. Sie wirken allerdings vom Grundsatz her zunächst zwingend nur auf die unmittelbar von der Änderung berührten Teile.
- Bei Umbaumaßnahmen sind zunächst nur die unmittelbar von der Änderung berührten Teile mit den Einwirkungen nach den aktuellen Technischen Baubestimmungen nachzuweisen. Hierunter fallen Anbauten und Aufstockungen bei bestehenden baulichen Anlagen.
- Bei Baumaßnahmen, die Auswirkungen auf das bestehende Gebäude haben (z.B. Wanddurchbrüche, Versetzen von tragenden Wänden, Nutzungsänderung in einem Geschoss, Aufstockungen) ist in jedem Einzelfall zu prüfen, inwieweit die Einwirkungen nach den aktuellen Technischen Baubestimmungen auch auf die nicht unmittelbar von der Baumaßnahme betroffenen Teile anzusetzen sind. Der bauliche Bestandsschutz bleibt nur dann erhalten, wenn die Standsicherheit der bestehenden baulichen Anlage, die nach den ursprünglichen bautechnischen Vorschriften nachgewiesen wurde, auch weiterhin gewährleistet ist.
- Die Anwendung aktueller Technischer Baubestimmungen für die Bemessung und Ausführung beschränkt sich auf die unmittelbar von der Änderung berührten Teile von baulichen Anlagen. Die Aufnahme der weiter zu leitenden Lasten aus eigenständigen neuen Teilen von baulichen Anlagen (z.B. Anbau, Aufstockung, Antenne) darf zunächst mit den ursprünglichen bautechnischen Vorschriften nachgewiesen werden. Ist die Lastaufnahme nur mit zusätzlichen Verstärkungen möglich, so sind diese mit den aktuellen Technischen Baubestimmungen nachzuweisen.

Folglich müssen bei Fassaden- und Dachsanierungen die unmittelbar von der Änderung berührten Teile unter Berücksichtigung der aktuellen Lastannahmen mit den aktuellen Technischen Baubestimmungen erneut nachgewiesen werden.

2.3.3 Lastannahmen **Current Load specifications**

2.3.3.1 Allgemeines **Preface**

Bei der Bemessung von Fassaden müssen Eigenlasten und zur Fassade lotrechte Windlasten berücksichtigt werden (andrückend und abhebend). Bei Stahlleichtbaufassaden ist das Eigengewicht in der Regel nicht bemessungsmaßgebend und wird bei der Nachweisführung häufig vernachlässigt. Werden Sandwichelemente verwendet, müssen zusätzlich Zwängungskräfte infolge unterschiedlicher Deckschichttemperaturen beachtet werden. Während Temperaturdifferenzen bei statisch bestimmten (Einfeldträger-) Systemen nur zu Verformungen führen, kann der Lastfall Temperaturdifferenz bei statisch unbestimmten (Mehrfeldträger-) Systemen bemessungsmaßgebend werden. Zur Nachweisführung von temperaturbeanspruchten Sandwichelementen wird auf [17], [45], [49] verwiesen. Im Dachbereich müssen Eigen-, Wind-, Schnee-, Temperaturdifferenz- und Nutzlasten berücksichtigt werden. Bei der Bemessung von Dachkonstruktionen wird das Eigengewicht in der Regel berücksichtigt. Es kann bei abhebenden Lasten günstig wirken. Zu Wartungs- und Montagezwecken müssen auch filigrane Stahlleichtbaudächer begehrbar sein. Hierbei ist häufig die punktuelle Lasteinleitung kritisch, sodass lastverteilende Maßnahmen (beispielsweise Holzbohlen) vorgeschrieben werden. Sodann werden Mannlasten bei der Bemessung von Stahlleichtbaudächern, weil mit lastverteilenden Maßnahmen nicht mehr maßgebend, häufig vernachlässigt.

2.3.3.2 Bemessungsrelevante Normen **Relevant standards**

Die bauaufsichtliche Einführung von Normen fällt in den Zuständigkeitsbereich der einzelnen Bundesländer. Die für die Lastannahmen zuständige europäische Normenreihe „Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke“ ist heute in allen Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt und ersetzt die nationalen Normen der Reihe DIN 1055. In der folgenden Tabelle 2-15 sind die für die Bemessung von Fassaden und Dächern maßgebenden Normen der Reihe Eurocode 1 zusammengestellt. Zu jeder Norm ist der zugehörige nationale Anhang zu beachten. Für Temperaturlasten bei Sandwichelementen wird auf DIN EN 14509 [29] verwiesen. Zusätzlich müssen je nach Bauweise vorhandene allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen beachtet werden.

Tabelle 2-15: Lastannahmen für Fassade und Dach

Table 2-15: Design loads for façade and roof

Einwirkung	Norm	Titel
Eigengewicht und Nutzlasten	DIN EN 1991-1-1 (2010-12)	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
	DIN EN 1991-1-1/NA (2010-12)	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
Schnee	DIN EN 1991-1-3 (2010-12)	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten
	DIN EN 1991-1-3/NA (2010-12)	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten
Wind	DIN EN 1991-1-4 (2010-12)	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
	DIN EN 1991-1-4/NA (2010-12)	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten

3 Bauphysikalische Untersuchungen Building physical investigations

Für die im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Bestandskonstruktionen wurden jeweils unterschiedliche Möglichkeiten der energetischen Sanierung betrachtet. Außer Sandwichelementen wurden dabei auch sog. modulare Stahlleichtbaukonstruktionen hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Verbesserungspotentiale und Auswirkungen bewertet. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Kombination aus Bestandskassettensfassaden mit Sandwichelementen als Ertüchtigungsmaßnahme, da das thermische Verhalten dieser „Hybridelemente“ als besonders günstig einzustufen ist. Neben der rein thermischen Untersuchung und Beurteilung der jeweiligen Sanierungsmaßnahme waren auch die hygrischen bzw. die kombiniert hygrothermischen Bauteileigenschaften Gegenstand des Forschungsvorhabens. Ergänzend zu den numerischen Berechnungen wurden für ausgewählte Bausysteme auch experimentell Versuche durchgeführt. Zusätzlich zu bauphysikalischen Erkenntnissen standen dabei auch Aspekte, die die Wechselwirkung zwischen Tragverhalten und Bauphysik betreffen, im Focus der Betrachtung. Abschließend wurde die zuvor auf Ebene der Einzelbauteile ermittelte energetische Qualität der sanierten Bauteile auf die Gesamtgebäudeebene übertragen und in Bezug zu den übrigen Einflussparametern vor dem Hintergrund praktischer Energieeinsparpotentiale bewertet.

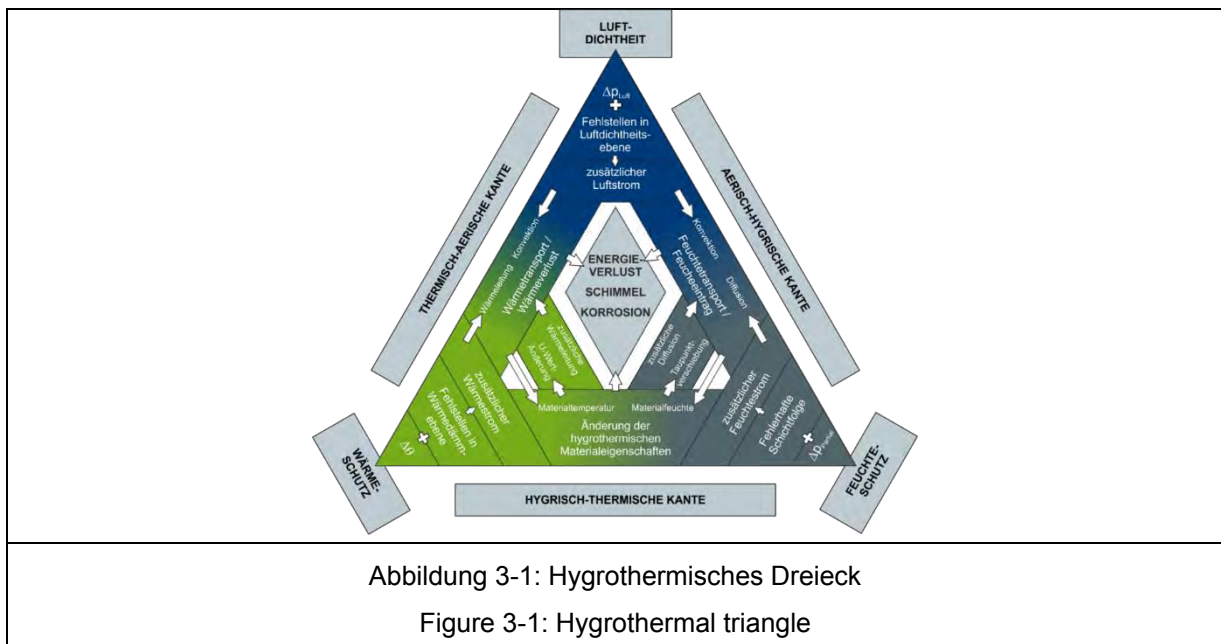
For the existing constructions examined in the research project different possibilities of energetic refurbishment were considered. In addition to sandwich elements, so-called modular build-up systems were also evaluated with regard to their potential for improvement in terms of building physics and their impact. One focus was on the combination of existing liner tray façades with sandwich elements as a refurbishment method, since the thermal behavior of these "hybrid elements" can be classified as particularly favorable. In addition to the purely thermal examination and assessment of the respective remedial measure, the hygric or combined hygrothermal component properties were also the subject of the research project. Besides the numerical calculations, experimental tests were carried out for selected building systems. In addition to building physics findings were also aspects that affect the interaction between structural behavior and building physics, in the focus of consideration. Finally, the energy quality of the rehabilitated components previously determined at the level of the individual components was transferred to the overall building level and assessed in relation to the other influencing parameters against the background of practical energy-saving potentials.

3.1 Anforderungen und Zusammenhänge Requirements and interrelations

Als Voraussetzung für eine hohe energetische Effizienz wird eine luftdichte Gebäudehülle gefordert. Falls diese im Gebäudebestand nicht oder nur ungenügend vorhanden ist, sollten die primären Sanierungsmaßnahmen in diesem Bereich ansetzen.

Um eine weitere Steigerung der Effizienz erreichen zu können, sollten die wärmeschutztechnischen Eigenschaften der Gebäudehülle verbessert werden. Allerdings kommt es dabei i.d.R. zur Veränderung des feuchteschutztechnischen Verhaltens des einzelnen Bauteils bzw. der gesamten Gebäudehülle.

Vor diesem Hintergrund ist eine ganzheitliche, integrale hygrothermische Optimierung erforderlich. Die Zusammenhänge werden in Abbildung 3-1 dargestellt.



Bei der Sanierung mit Bausystemen des Stahlleichtbaus, die Stahlfeinblechschichten enthalten und im Sinne des Forschungsvorhaben auf der Außenseite des Bestandsbauteils angeordnet werden, ist der bauphysikalische Grundsatz „innen dichter als außen“ zu bauen nicht mehr uneingeschränkt einzuhalten. Weiter kommt es als Folge der zusätzlichen Dämmschicht, die zur energetischen Ertüchtigung erforderlich ist, zur Verschiebung der Tauwasserebene. Werden Systeme verwendet, die eine Hinter- oder Belüftungsebene enthalten – beispielsweise modulare Systeme, die mit hinterlüfteten Bekleidungselementen kombiniert werden –, treten hygrothermisch nicht eindeutig zu definierende Bedingungen auf, die auch in den entsprechenden Normen z.T. nicht exakt behandelt werden. Die Sanierung mit Bauelementen des Stahlleichtbaus verändert das hygrothermische Verhalten durch die zusätzliche Dämm- bzw. Dichtebenen oft maßgeblich.

3.2 Thermische Qualität Thermal quality

3.2.1 Sanierung von Stahlleichtbaufassaden Refurbishment of lightweight steel façades

3.2.1.1 Kassettenelemente Liner tray elements

3.2.1.1.1 Sanierung mit Sandwichelementen Refurbishment with sandwich panels

Numerische Untersuchungen

Der Forschungsschwerpunkt des Vorhabens lag auf der energetischen Sanierung von Bestandskassettenfassaden mit Stahl-Sandwichelementen. Die Kombination aus diesen beiden Einzelbauteilen wird im weiteren Verlauf als „Hybridelement“ bezeichnet. (siehe Abbildung 3-2)

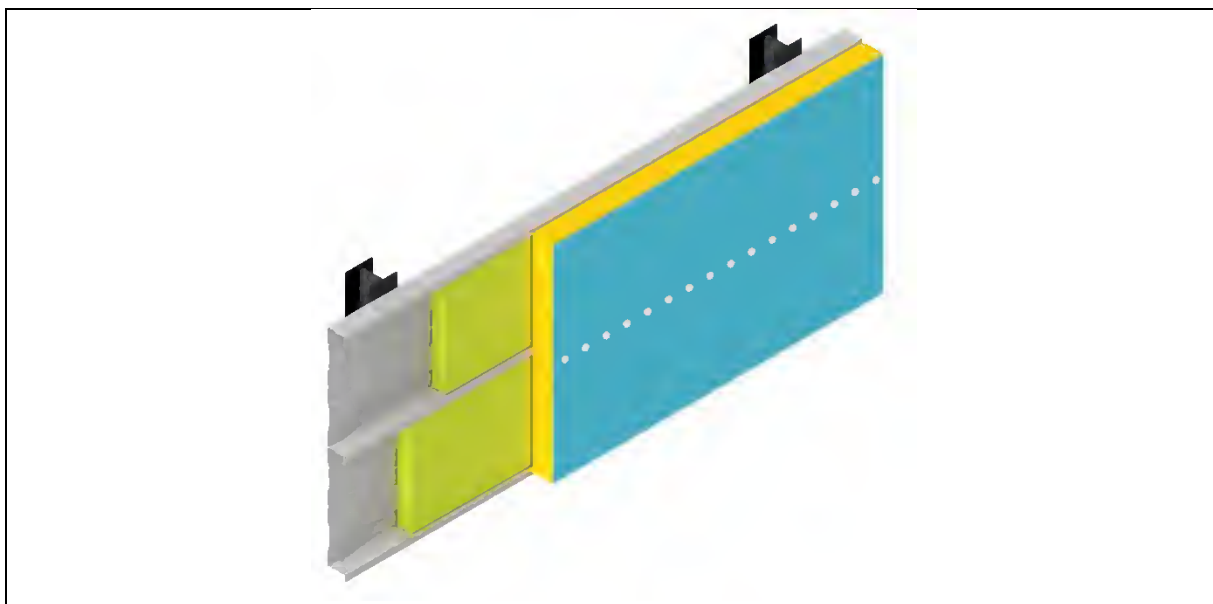


Abbildung 3-2: Hybridelement

Figure 3-2: Hybride element

Zur Bestimmung des Bemessungswertes des Wärmedurchgangskoeffizienten als Maß für die thermische Qualität wurde zunächst anhand numerischer Verfahren überprüft, ob die mit einer vereinfachten Handrechenmethode ermittelten Werte eine ausreichende Genauigkeit vorweisen. Für eine Kassettenwand mit der Dicke 90 mm und Dämmung der WLS 035 und ein Sandwichelement der Dicke 60 mm mit WLS 025 (Fugentyp I) wurde ein Finite-Elemente-Modell des Hybridelementes erstellt und anschließend der exakte Wärmedurchgangskoeffizient bestimmt (siehe Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4).

Der numerisch ermittelte Bemessungswärmedurchgangskoeffizient beträgt $U_{HYB,d} = 0,283 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Für Vergleich zwischen Handrechnung und FEM-Rechnung alle Stahlprofilblechdicken mit 0,75 mm angenommen.

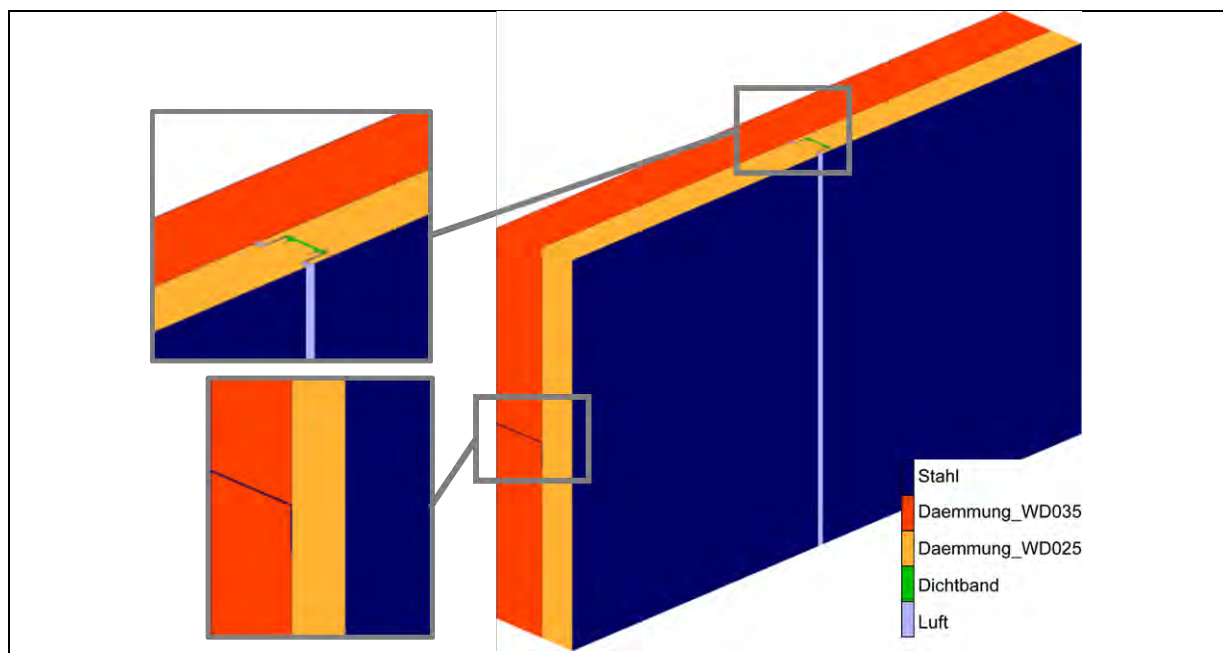


Abbildung 3-3: Thermisches FE-Modell des Hybridelements

Figure 3-3: Thermal FE model of hybrid element

Für die Bestandskassettenwand kann aus Abbildung 2-27 auf Grundlage der Trennstreifenvariante ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_{KAS,d} = 0,727 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ abgelesen werden. Daraus lässt sich ein Wärmedurchlasswiderstand der Kassettenwand von $R_{KAS} = 1,206 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ermitteln.

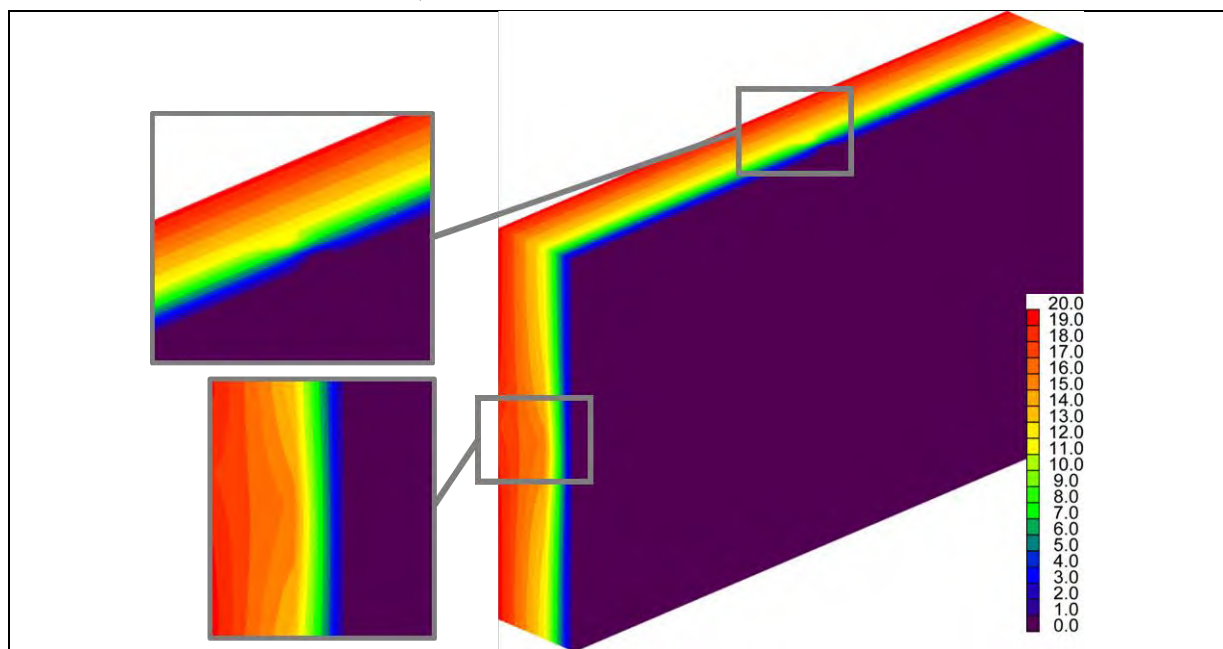


Abbildung 3-4: Temperaturverteilung des Hybridelements

Figure 3-4: Temperature distribution of hybrid element

Mit Hilfe von DIN EN 14509 kann für das Sandwichelement ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_{SE,d} = 0,431 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (bei Verwendung eines Fugenbeiwertes $f_{\text{joint}} = 0,083$) bestimmt werden. Das entspricht einem

Wärmedurchlasswiderstand des Sandwichelementes inkl. Fuge von $R_{SE} = 2,148 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

Auf Grundlage des thermischen Ansatzes der Reihenschaltung der Wärmedurchlasswiderstände ergibt sich mit dem Handrechenverfahren ein Wärmedurchlasswiderstand des Hybridelementes von $R_{HYB} = 3,354 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Daraus wiederum kann in Verbindung mit den Wärmeübergangswiderständen ein Bemessungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_{HYB,d} = 0,284 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ermittelt werden.

Der Vergleich des numerisch bestimmten mit dem vereinfacht berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten zeigt, dass nur sehr geringe Abweichungen auftreten. Daher wird im Folgenden das Handrechenverfahren verwendet, um die thermische Qualität anhand der erreichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten der verschiedenen Hybridelemente beurteilen zu können.

Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 beinhalten die auf dieser Grundlage ermittelten Werte für die beiden unterschiedlichen Kassettenprofilhöhen 0,75 bzw. 1,50 mm.

Tabelle 3-1: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Kassettenwänden ($t_{N,KAS} = 0,75 \text{ mm}$)

Table 3-1: Thermal transmittance for liner tray elements refurbished with sandwich panels ($t_{N,CAS} = 0,75 \text{ mm}$)

		Wärmedurchgangskoeffizient $U \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$									
		Kassettenprofilhöhe $d_{KAS} \text{ [mm]}$									
		90	100	120	130	145	160	180	200	220	240
Sandwichdicke $d_{SE} \text{ [mm]}$	60	0,284	0,277	0,266	0,261	0,253	0,247	0,238	0,231	0,224	0,217
	80	0,230	0,225	0,218	0,214	0,209	0,205	0,199	0,194	0,189	0,184
	100	0,194	0,191	0,185	0,183	0,179	0,176	0,171	0,168	0,164	0,160
	120	0,168	0,165	0,161	0,159	0,157	0,154	0,151	0,148	0,145	0,142
Bestand:		$t_{N,KAS} = 0,75 \text{ mm}; d_{KAS} = 90 \dots 240 \text{ mm}; \lambda_{WD,KAS} = 0,035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$									
Sanierung:		$t_{N,SE} = 0,75 \text{ mm}; d_{SE} = 60 \dots 120 \text{ mm}; \lambda_{WD,SE} = 0,025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}); \text{Fugentyp I}$									

Tabelle 3-2: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Kassettenwänden ($t_{N,KAS} = 1,50$ mm)

Table 3-2: Thermal transmittance for liner tray elements refurbished with sandwich panels ($t_{N,CAS} = 1,50$ mm)

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]									
		Kassettenprofilhöhe d _{KAS} [mm]									
		90	100	120	130	145	160	180	200	220	240
Sandwichdicke d _{SE} [mm]	60	0,300	0,295	0,286	0,282	0,277	0,272	0,266	0,260	0,255	0,250
	80	0,240	0,237	0,231	0,229	0,225	0,222	0,218	0,214	0,210	0,207
	100	0,201	0,199	0,195	0,193	0,191	0,188	0,185	0,182	0,180	0,177
	120	0,173	0,172	0,169	0,167	0,165	0,164	0,161	0,159	0,157	0,155
Bestand:		$t_{N,KAS} = 1,50$ mm; $d_{KAS} = 90 \dots 240$ mm; $\lambda_{WD,KAS} = 0,035$ W/(m·K)									
Sanierung:		$t_{N,SE} = 0,75$ mm; $d_{SE} = 60 \dots 120$ mm; $\lambda_{WD,SE} = 0,025$ W/(m·K); Fugentyp I									

Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 zeigen die ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit der eingesetzten Dämmstoffdicke, die sich aus der Summe der Kassettdämmung und der Sandwichdämmung ergibt. Durch den Vergleich mit Abbildung 2-26 und Abbildung 2-27 ist zu erkennen, dass die thermische Qualität der konventionellen Variante der Kassettenwand mit 3 mm Trennstreifen bereits durch die Sanierung mit einem 60 mm Sandwichelement stark verbessert werden kann. Je nach konkret betrachteter Kombination lassen sich die unterschiedlichen Anforderungsniveaus erreichen.

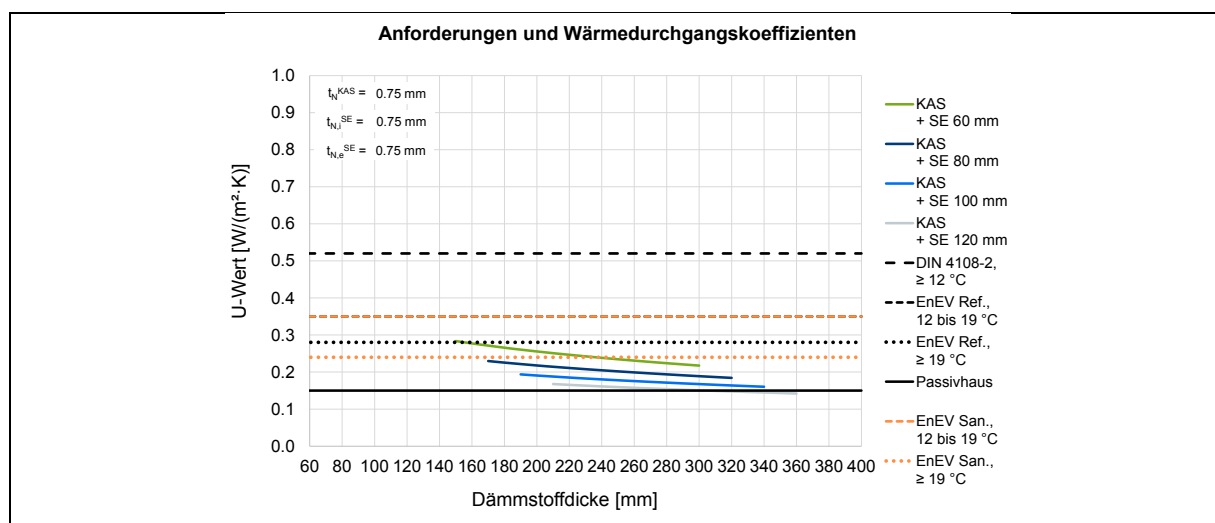


Abbildung 3-5: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Kassettenwänden ($t_{n,KAS} = 0,75 \text{ mm}$)
Figure 3-5: Thermal quality of liner tray elements refurbished with sandwich panels ($t_{n,CAS} = 0,75 \text{ mm}$)

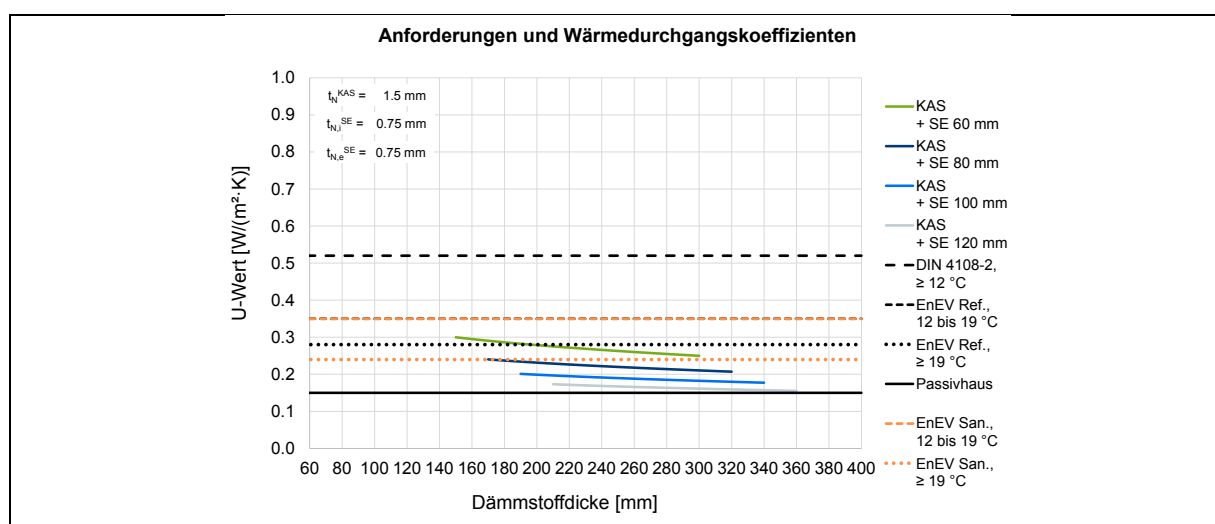


Abbildung 3-6: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Kassettenwänden ($t_{n,KAS} = 1,50 \text{ mm}$)
Figure 3-6: Thermal quality of liner tray elements refurbished with sandwich panels ($t_{n,CAS} = 0,75 \text{ mm}$)

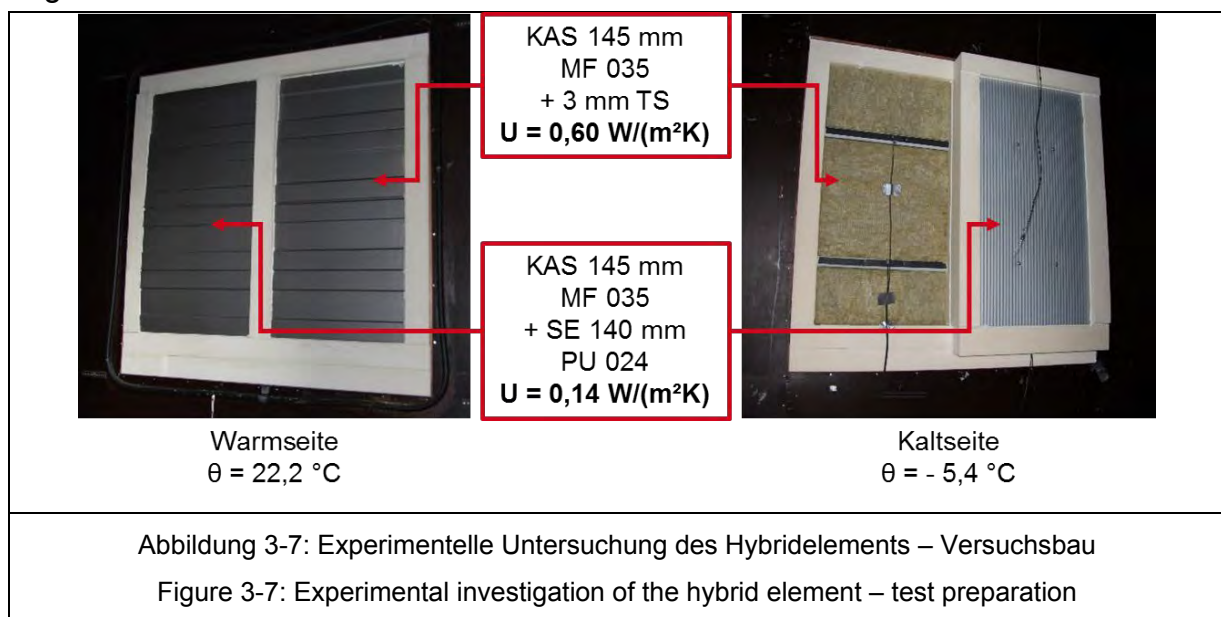
Experimentelle Untersuchungen

Um die vorhandenen Energieeinsparpotentiale, die durch die Sanierung von Kassettenfassaden mit Hilfe von Sandwichelementen erreichbar sind nicht nur rechnerisch-numerisch aufzeigen zu können, wurden auch begleitend Versuche durchgeführt.

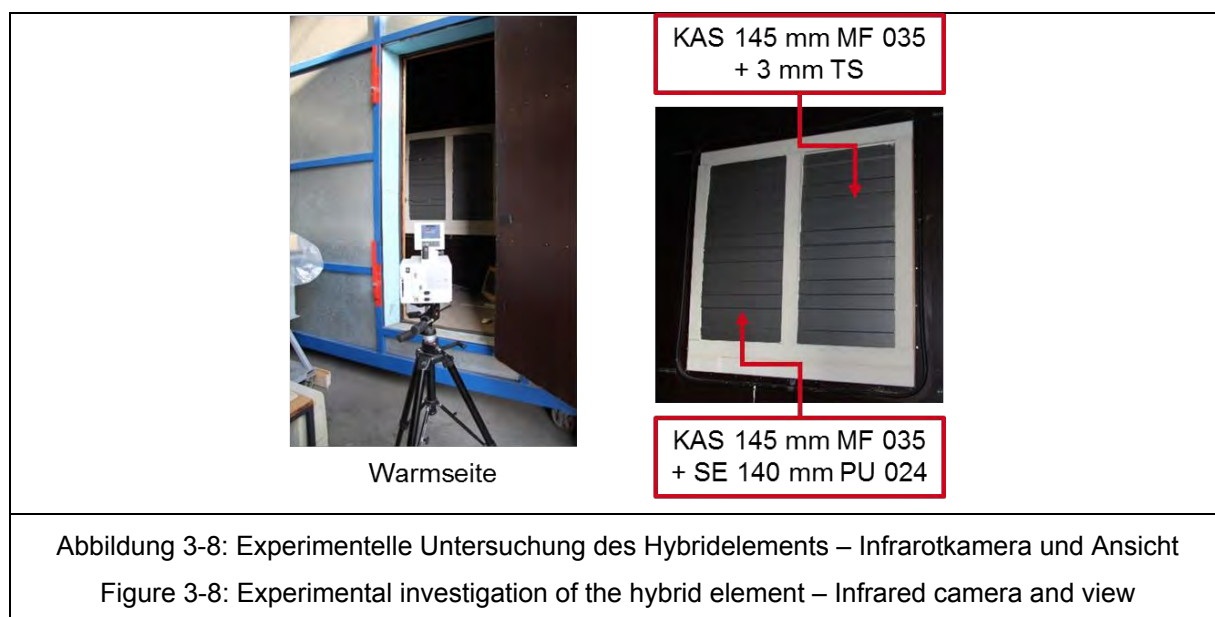
Dazu ist in experimentellen Untersuchungen eine Bestandskassettenfassade mit einer Kassettenprofilhöhe von 145 mm mit einer Hybridfassade aus einem 145 mm Kassettenprofil und einem 140 mm Sandwichelement verglichen worden. Als Dämmstoff in der Kasette wurde Mineralwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(m·K) verwendet; das Sandwichelement besaß einen PUR-Dämmkern mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,024 W/(m·K).

Wie den Ausführungen, Tabellen und Abbildungen in Abschnitt 2.2.1.3 entnommen werden kann, ergibt sich für die Bestandsvariante mit einem konventionellen 3 mm Trennstreifen ein Bemessungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Die Sanierungsvariante mit einem 140 mm Sandwichelement ist in Tabelle 3-1 bzw. Tabelle 3-2 nicht explizit enthalten; allerdings lässt sich auf Grundlage der Inhalte von ein Wärmedurchgangskoeffizient nach der Sanierung von $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bestimmen. Das entspricht einer Reduktion von ca. 75 %.

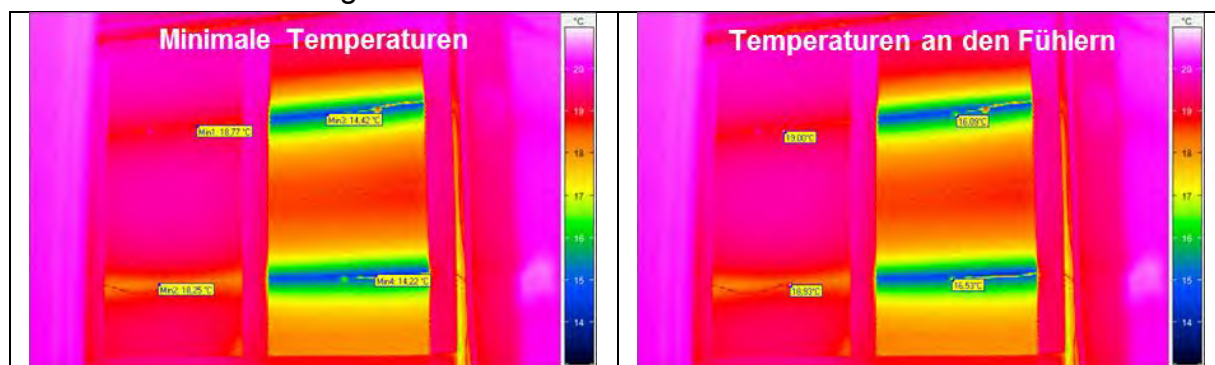
Um die Temperaturen, die sich an den Bauteiloberflächen einstellen und als Maß für die thermische Qualität des Bauteils herangezogen werden können, zu ermitteln, wurden beide Probekörper in die HotBox eingebaut und einer entsprechenden Temperaturdifferenz ausgesetzt. Das Kassettenprofil befand sich dabei der Warmseite des Messstandes zugewandt, die jeweilige andere Bauteiloberfläche der Kaltseite. Als Temperaturen wurden Werte von 20 °C bzw. -5 °C vorgegeben, die mit einer geringen Abweichung auch messtechnisch nachgewiesen werden konnten. In Abbildung 3-7 ist auf der linken Seite die Ansicht der beiden Probekörper von der Warmseite zu sehen, rechts dargestellt sind die Oberflächen auf der Kaltseite. Beide Probekörper wurden zum einen vom Versuchsstand und zum anderen auch voneinander thermischen entkoppelt. An den Bauteiloberflächen wurden entsprechende Temperaturmessfühler angeordnet.



Zur visuellen Verdeutlichung wurden außerdem Infrarotaufnahmen erstellt, die den Einfluss der Sanierungsmaßnahme weiter hervorheben sollen. Abbildung 3-8 zeigt den Aufbau zur Aufnahme der Infrarotbilder sowie die Ansicht des betrachteten Ausschnittes. Die Infrarotbilder sind in Abbildung 3-9 dargestellt.



Beide Infrarotaufnahmen zeigen denselben Ausschnitt, allerdings unterscheiden sie sich hinsichtlich der konkreten, punktuell ausgegebenen Temperaturwerte. Links sind die jeweils minimalen Oberflächentemperaturen im Bereich der Kassettenstege dargestellt, rechts demgegenüber die Werte, die sich an den mit Messfühlern versehenen Punkten ergeben.



Wie die beiden Aufnahmen zeigen, treten die niedrigsten Oberflächentemperaturen im thermischen Einflussbereich der Kassettenstege auf. Als Folge dieser Wärmebrücken sinken die Temperaturen auf der Innenoberfläche ab – für die Bestandsvariante (jeweils die rechte Bildhälfte) besonders deutlich, für die Sanierungsvariante (jeweils die linke Bildhälfte) weniger stark ausgeprägt, aber dennoch erkennbar.

An der Oberteiloberfläche auf der Kaltseite ergeben sich entsprechend umgekehrte Verhältnisse. Bei der Bestandsvariante ist die Temperatur im Kassettenstegbereich bedingt durch die Wärme, die über die Wärmebrücke Kassettensteg nahezu ungehindert von der Warmseite nachströmen kann, höher als in den umliegenden Dämmbereichen. Für die Sanierungsvariante ergibt sich derselbe Effekt, allerdings nur mit geringer Ausprägung, da das zusätzlich angebrachte Sandwichelement den

Wärmebrückeneinfluss des Steges stark verringert. Auf eine explizite Darstellung dieser Infrarotaufnahmen wird an dieser Stelle verzichtet.

In der folgenden Tabelle 3-3 sind die minimalen Temperaturen auf der Bauteiloberfläche auf der Warmseite zusammengefasst. Unterschieden wird dabei zunächst zwischen der Bestands- und der Sanierungsvariante. Außerdem werden für beide Varianten jeweils der Bereich des oberen und der des unteren Kassettensteges getrennt betrachtet.

Dabei sind zum einen die minimalen mittels Infrarot-Messung bestimmten Temperaturen aufgeführt (vgl. Abbildung 3-9, links); zum anderen sind die ebenfalls mittels Infrarotthermografie ermittelten Temperaturen an den mit Messfühlern versehenen Punkten zu finden (vgl. Abbildung 3-9, rechts). Darüber hinaus sind die mit den Temperaturfühlern gemessenen Werte angegeben.

Tabelle 3-3: Experimentelle Untersuchung des Hybridelements – Temperaturergebnisse

Table 3-3: Experimental investigation of the hybrid element – temperature results

		Minimale Oberflächentemperatur auf der Warmseite		Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ [K]
		$\theta_{si,min}$ [°C]		
		145 mm KAS + 3 mm TS	145 mm KAS + 140 mm SE	
IR-Messung (minimale Werte)	oben	14,42	18,77	4,35
	unten	14,22	18,25	4,03
IR-Messung (Werte an den Fühlern)	oben	16,09	19,00	2,91
	unten	16,53	18,93	2,40
Temperaturfühler	oben	17,33	20,84	3,97
	unten	16,93	20,96	3,91

Zwischen den beiden Kassettenstegen – oben bzw. unten – besteht nur eine geringe Abweichung, die im Bereich der Messgenauigkeit liegt. Der Vergleich der mit den Messfühlern gemessenen und der anhand der Infrarotthermografie bestimmten Temperaturen beträgt nicht mehr als 2 K bzw. 10 %; auch dabei kann von einer guten Übereinstimmung ausgegangen werden. Die mittels Infrarotaufnahme ermittelten minimalen Werte sind allerdings nochmals geringer als die im Bereich der Fühler bestimmten. Diese Abweichung lässt sich vermutlich einerseits auf punktuelle, lokal auftretende Effekte zurückführen, und andererseits auf eine nicht optimale Platzierung der Temperaturfühler.

Trotz dieser Abweichungsquellen zeigt der Vergleich der beiden grundsätzlichen Varianten, dass durch die Sanierungsmaßnahme die minimalen Oberflächentemperaturen um ca. 3 bis 4 K angehoben werden können. Insbesondere

da im lokalen Umfeld metallener Wärmebrücken das Risiko der Kondensatbildung an der Bauteiloberfläche zu beachten ist, kann durch eine Erhöhung der Oberflächentemperatur dieser Problematik begegnet werden. Außerdem kann so auch selbstverständlich das ursprüngliche Ziel der Energie- und Wärmeeinsparung erreicht werden.

Um die im Rahmen der Versuche gewonnenen Erkenntnisse auch numerisch zu überprüfen wurden entsprechende Vergleichsrechnungen mittels der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-4 zu finden und bestätigen grundsätzlich die Aussagen, die sich auf Basis der experimentellen Untersuchungen ergeben.

Die geringfügigen Abweichungen zwischen Experiment und Numerik lassen sich u.a. auch auf die z.T. nicht in allen Details bekannten klimatischen Randbedingungen bzw. die real vorhandenen Übergangsbedingungen zurückführen.

Tabelle 3-4: Experimentelle Untersuchung des Hybridelements – numerische Vergleichsergebnisse

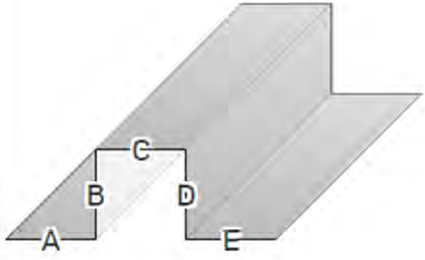
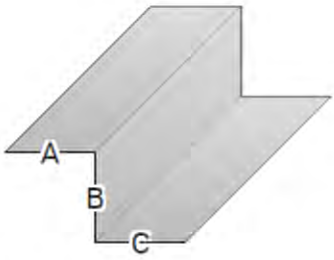
Table 3-4: Experimental investigation of the hybrid element – numerical comparison results

	Minimale Oberflächentemperatur auf der Warmseite $\theta_{si,min}$ [°C]		Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ [K]
	145 mm KAS + 3 mm TS	145 mm KAS + 140 mm SE	
FEM-Berechnung	16,55	20,96	4,41

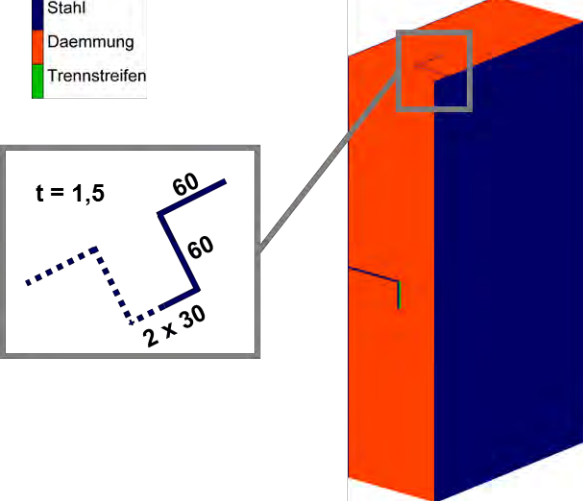
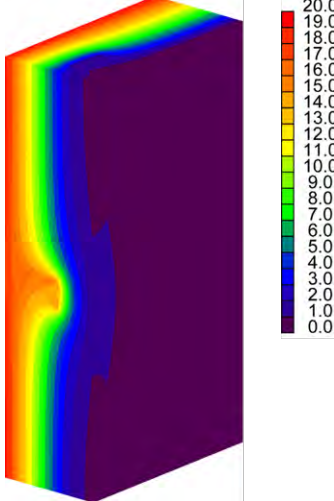
3.2.1.1.2 Sanierung mit modularen Stahlkonstruktionen Refurbishment with build-up systems

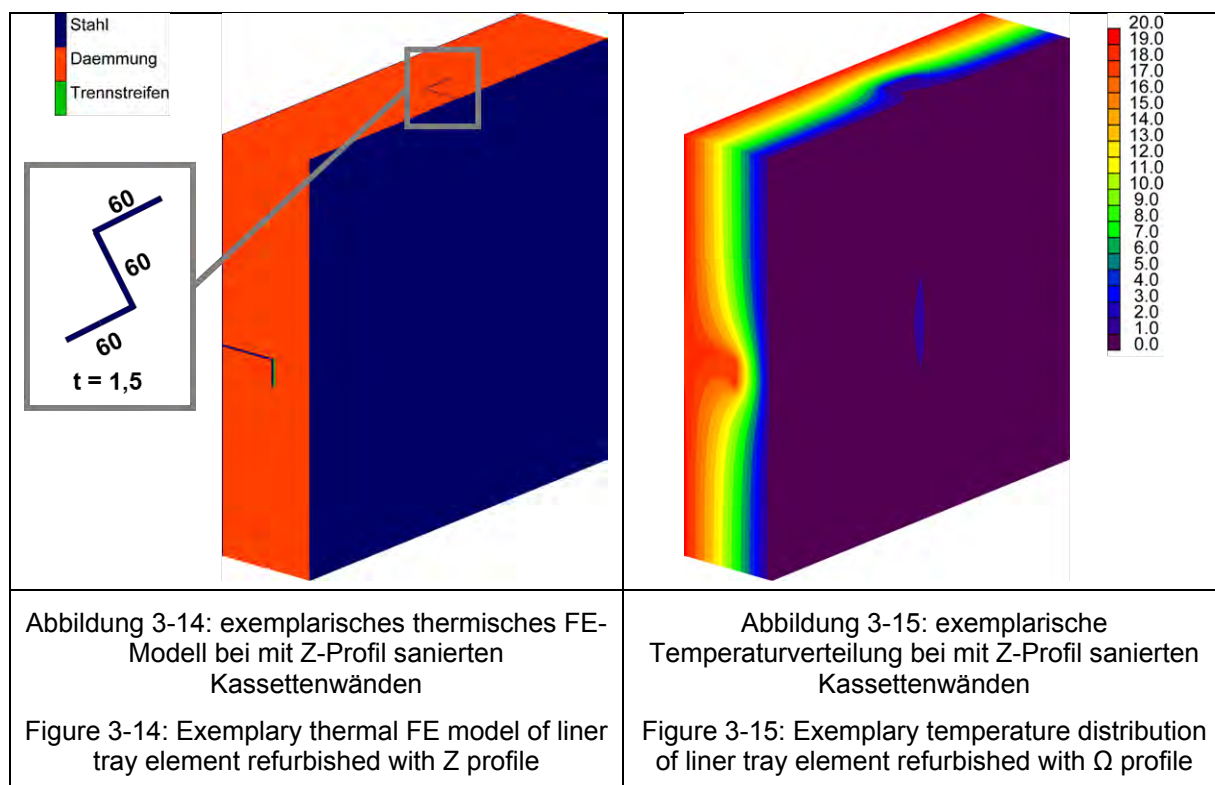
Als weitere Möglichkeit, um Kassettenfassaden energetisch zu sanieren, wurde die Verwendung modularer Stahlkonstruktionen untersucht. Der gesamte Aufbau besteht dann aus der Bestandskassettenwand, bei der orthogonal zu den Kassettenstegen außenseitig Ω - oder Z-Profile angebracht wurden. An die Obergurte dieser Profile wiederum kann der äußere Witterungsschutz befestigt werden. Der entstandene Hohlraum wird entsprechend ausgedämmt.

In Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 sind die beiden Profile mit den zugehörigen Abmessungen zu finden. Auf Grundlage der im Rahmen des Forschungsvorhabens betrachteten Profilhöhe von 60 mm ergibt sich auch die zusätzliche Dämmstoffdicke zu 60 mm. Sowohl die Kassettendämmung als auch die Zusatzdämmung wird dabei zu WLS 035 gewählt.

 <p>Ω-Profil</p> <p>A = 60 mm B = 60 mm C = 60 mm D = 60 mm E = 60 mm</p> <p>t = 1,5 mm</p>	 <p>Z-Profil</p> <p>A = 60 mm B = 60 mm C = 60 mm</p> <p>t = 1,5 mm</p>
<p>Abbildung 3-10: Darstellung und Abmessungen Ω-Profil</p> <p>Figure 3-10: Visualisation and dimensions of Ω profile</p>	<p>Abbildung 3-11: Darstellung und Abmessungen Z-Profil</p> <p>Figure 3-11: Visualisation and dimensions of Z profile</p>

Um diese Sanierungsmethoden beurteilen zu können, wurden numerische Modelle erstellt und entsprechende Berechnungen durchgeführt. Exemplarisch sind in Abbildung 3-12 bis Abbildung 3-15 jeweils ein FE-Modell und die ermittelte Temperaturverteilung dargestellt.

	
<p>Abbildung 3-12: exemplarisches thermisches FE-Modell bei mit Ω-Profil sanierten Kassettenwänden (Symmetrie)</p> <p>Figure 3-12: Exemplary thermal FE model of liner tray element refurbished with Ω profile (symmetry)</p>	<p>Abbildung 3-13: exemplarische Temperaturverteilung bei mit Ω-Profil sanierten Kassettenwänden (Symmetrie)</p> <p>Figure 3-13: Exemplary temperature distribution of liner tray element refurbished with Ω profile (symmetry)</p>



Auf der sicheren Seite wurde bei der Sanierung mit modularen Stahlkonstruktionen für die Kassettenprofile eine Dicke von 1,50 mm angesetzt. Für die für die Sanierung notwendigen Profile wurden Achsabstände von 300, 621 und 1000 mm betrachtet.

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen sind in Tabelle 3-5 und Tabelle 3-6 zusammengefasst.

Tabelle 3-5: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Ω -Profil sanierten Kassettenwänden

Table 3-5: Thermal transmittance for liner tray elements refurbished with Ω profile

		Wärmedurchgangskoeffizient U [$W/(m^2 \cdot K)$]									
		Kassettenprofilhöhe d_{KAS} [mm]									
		90	100	120	130	145	160	180	200	220	240
Abstand Ω -Profil e_{MOD} [mm]	300	0,608	0,590	0,554	0,537	0,510	0,496	0,477	0,458	0,439	0,420
	621	0,445	0,433	0,410	0,398	0,380	0,370	0,358	0,346	0,333	0,321
	1000	0,381	0,371	0,351	0,341	0,326	0,318	0,308	0,298	0,287	0,277
Bestand:		$t_{N,KAS} = 1,50$ mm; $d_{KAS} = 90 \dots 240$ mm; $\lambda_{WD,KAS} = 0,035$ W/(m·K)									
Sanierung:		$t_{N,MOD} = 1,50$ mm; $d_{MOD} = 60$ mm; $\lambda_{WD,MOD} = 0,035$ W/(m·K)									

Tabelle 3-6: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Z-Profil sanierten Kassettenwänden

Table 3-6: Thermal transmittance for liner tray elements refurbished with Z profile

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]									
		Kassettenprofilhöhe d _{KAS} [mm]									
		90	100	120	130	145	160	180	200	220	240
Abstand Z-Profil e _{MOD} [mm]	300	0,436	0,451	0,426	0,413	0,394	0,384	0,371	0,358	0,345	0,332
	621	0,368	0,358	0,339	0,330	0,315	0,308	0,298	0,288	0,279	0,269
	1000	0,333	0,324	0,306	0,298	0,285	0,278	0,270	0,261	0,252	0,244
Bestand:		t _{N,KAS} = 1,50 mm; d _{KAS} = 90 ... 240 mm; λ _{WD,KAS} = 0,035 W/(m·K)									
Sanierung:		t _{N,MOD} = 1,50 mm; d _{MOD} = 60 mm; λ _{WD,MOD} = 0,035 W/(m·K)									

In Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 sind die ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten der sanierten Bauteile visualisiert.

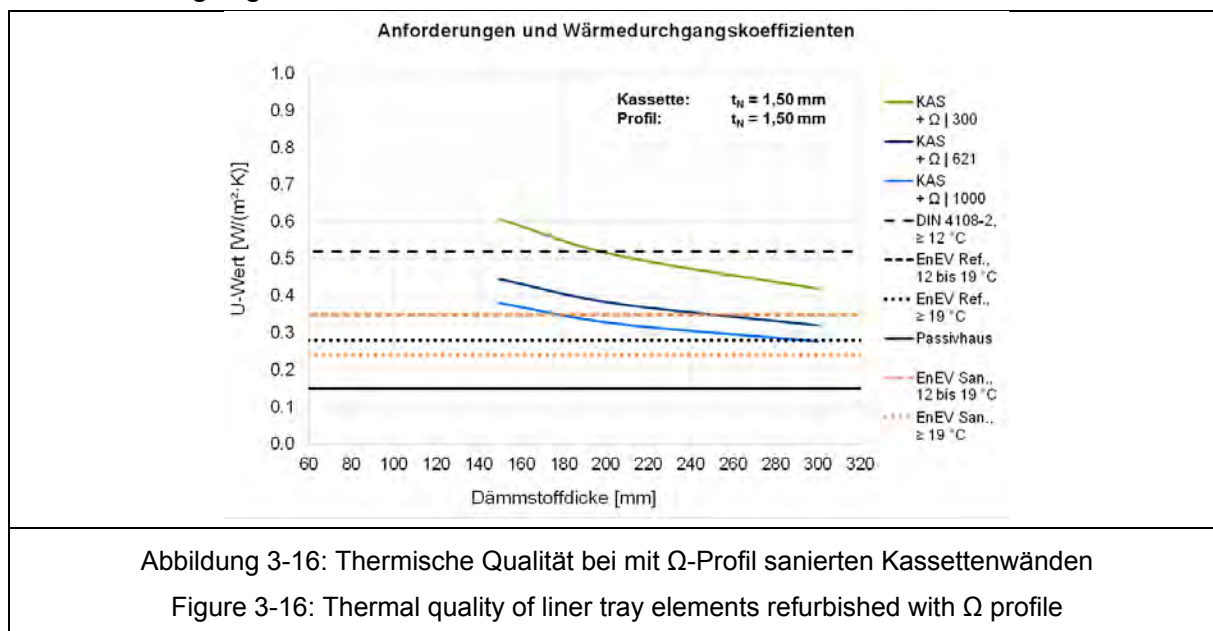


Abbildung 3-16: Thermische Qualität bei mit Ω-Profil sanierten Kassettenwänden

Figure 3-16: Thermal quality of liner tray elements refurbished with Ω profile

Aufgrund der größeren Profilquerschnittsfläche des Ω-Profiles (A = 450 mm²) gegenüber der des Z-Profiles (A = 270 mm²) sind die Auswirkungen der durch die Profile entstehenden Wärmebrücken unterschiedlich. Das Ω-Profil führt daher grundsätzlich zu höheren Wärmedurchgangskoeffizienten. Außerdem ist anhand der Ergebnisse zu erkennen, dass der Wärmebrückeneinfluss abnimmt, je höher die Profilabstand ist.

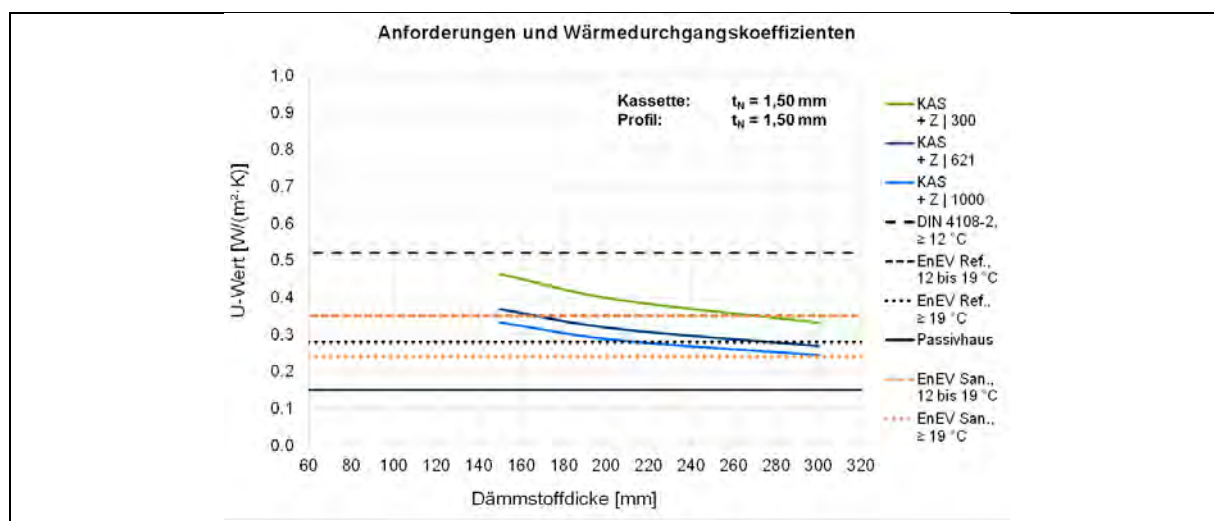


Abbildung 3-17: Thermische Qualität bei mit Z-Profil sanierten Kassettenwänden
 Figure 3-17: Thermal quality of liner tray elements refurbished with Z profile

Die energetische Qualität der Ausgangsvariante kann durch die betrachteten Sanierungsmöglichkeiten mit modularen Stahlkonstruktionen zwar verbesserte werden, allerdings lassen sich mit den ausgewählten Varianten die Anforderungen nicht vollständig erfüllen.

Dazu ist nachfolgend ein Vergleich der Ausgangsvariante – Kassette mit 3 mm Trennstreifen – mit der Variante mit 40 mm Zusatzdämmung – allerdings ohne zusätzliches Profil – und der Sanierungsvariante mit Z-Profil inkl. 60 mm Zusatzdämmung dargestellt. (vgl. Abbildung 3-18)

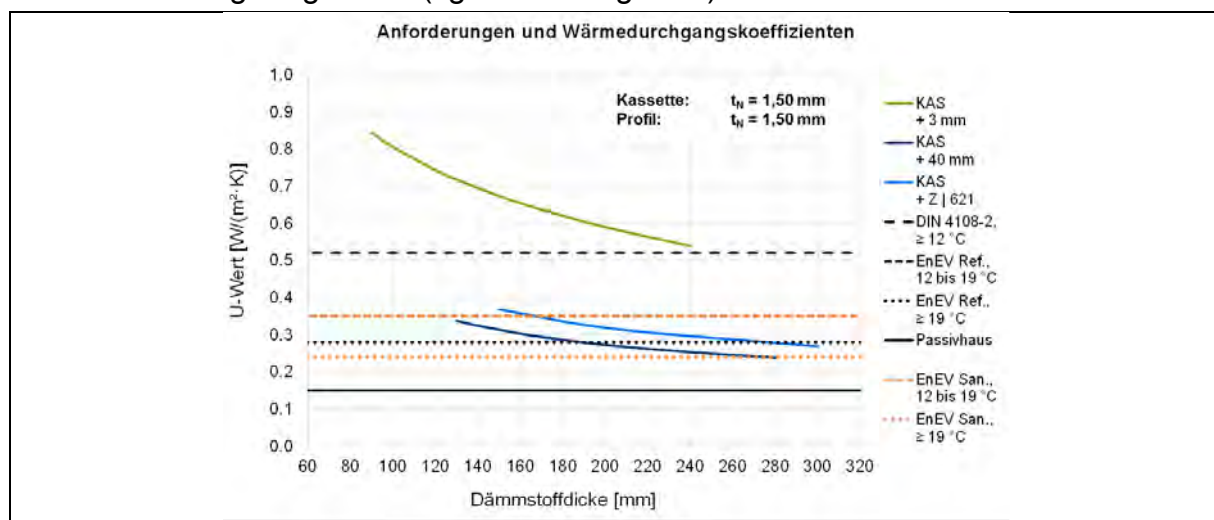


Abbildung 3-18: Thermische Qualität bei sanierten Kassettenwänden (Vergleich)
 Figure 3-18: Thermal quality of refurbished liner tray elements (comparison)

Anhand der Darstellung ist zu erkennen, dass bei Verwendung eines 90 mm Kassettenprofils ausgehend von einem Wärmedurchgangskoeffizient von $U_d = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ durch eine (ungestörte) 40 mm Zusatzdämmung ein Wert von $U_d = 0,34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreicht werden kann. Die Erhöhung der Dämmstärke um 44 % führt dabei zu einer Verringerung des U-Wertes um 60 %.

Wird stattdessen die Sanierungsvariante mit 60 mm Z-Profil betrachtet, ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_d = 0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Der Dämmstoffdickenerhöhung um 67 % steht dann eine U-Wert-Reduktion um 56 % entgegen.

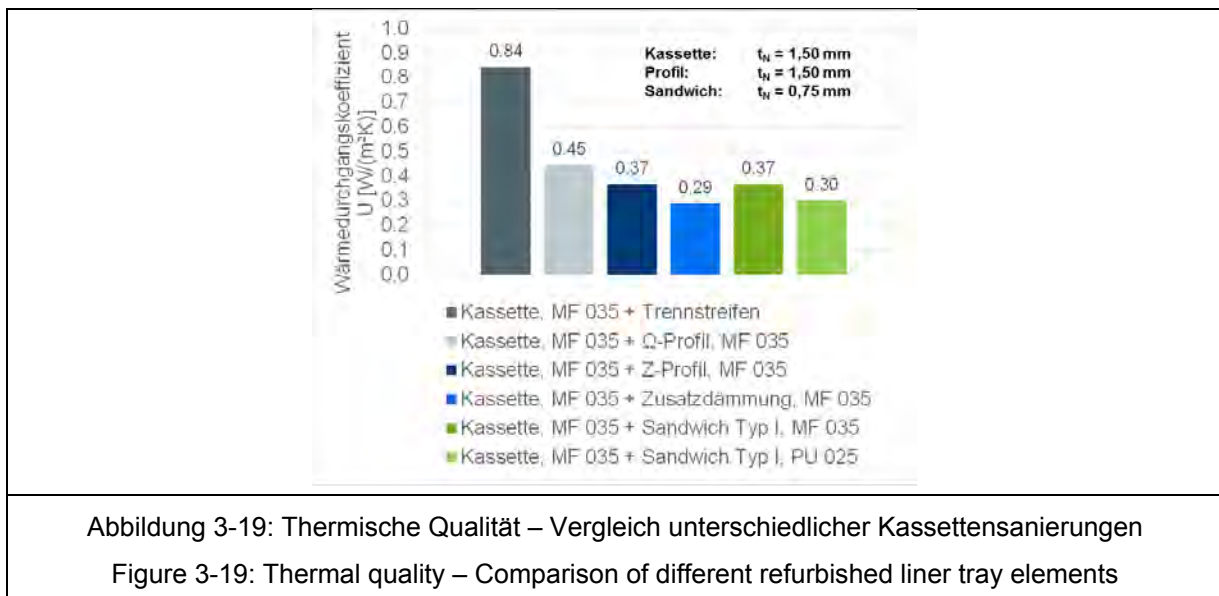
Allerdings kann die Verwendung eines zusätzlichen Profils in der Dämmstoffebene auch aus statische Sicht sinnvoll werden, um beispielsweise veränderte oder zusätzlich auftretende Lasten aufnehmen zu können.

3.2.1.1.3 Vergleich der Sanierungsvarianten

Comparison of the refurbishment variations

Für ein 90 mm Kassettenprofil werden die Bestandsvariante sowie die vorgestellten Sanierungsmaßnahmen ebenfalls gegenübergestellt. Die Bestandsvariante besitzt dabei wiederum einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_d = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; durch eine Sanierung mit einer modularen Stahlkonstruktion ergeben sich U-Werte von $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei Verwendung eines Ω -Profils bzw. $0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bei einem Z-Profil. Wird eine entsprechende ungestörte Dämmstoffschicht mit betrachtet, kann ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_d = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ erreicht werden.

Werden als Sanierungsmöglichkeiten auch zwei verschiedene Hybridkonstruktionen betrachtet, kann durch ein Mineralwoll-Sandwichelement der Dicke 60 mm ein U-Wert von $0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ermittelt werden; für ein Polyurethan-Sandwichelement derselben Dicke ergibt sich $U_d = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Dieser Wert entspricht dabei in etwa dem, der durch eine ungestörte Dämmstoffschicht aus Mineralwolle erreicht werden kann. In Abbildung 3-19 sind die Ergebnisse dargestellt.



3.2.1.2 Sandwichelemente Sandwich panels

Entsprechend der Ausführungen wurde für die Sanierung von Stahl-Sandwichelementen, die eine ungenügende thermisch-energetische Qualität ausweisen, die Verwendung eines zusätzlichen Sandwichelementes untersucht.

Als Bestandsvarianten wurden dabei Sandwichelemente mit Mineralwolldämmung zum einen und mit Polyurethandämmung zum anderen betrachtet. Die Bestandsqualität ist u.a. Gegenstand von Abschnitt 2.2.1.3.

Um diese Elemente energetisch zu verbessern, wurde ein PU-Sandwichelement (Fugentyp III) mit Dicken von 60 bis 120 mm für die Untersuchungen ausgewählt.

Tabelle 3-7: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Sandwichwänden (MF-Bestand)

Table 3-7: Thermal transmittance for sandwich wall panels refurbished with sandwich panels (MF stock)

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]						
		Sandwichdicke MF, Typ I d _{SE} ^A [mm]						
		40	60	80	100	120	160	200
Sandwichdicke PU, Typ III d _{SE} ^B [mm]	60	0,364	0,309	0,270	0,240	0,216	0,181	0,155
	80	0,268	0,238	0,214	0,194	0,179	0,154	0,135
	100	0,219	0,198	0,181	0,167	0,155	0,136	0,121
	120	0,186	0,171	0,158	0,147	0,138	0,123	0,110
Bestand:		t _{N,SE} ^A = 0,75 mm; d _{SE} ^A = 40 ... 200 mm; λ _{WD,SE} ^A = 0,044 W/(m·K); Fugentyp I						
Sanierung:		t _{N,SE} ^B = 0,75 mm; d _{SE} ^B = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE} ^B = 0,025 W/(m·K); Fugentyp III						

Auf Grundlage der Bemessungswärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN 14509 wurden die entsprechenden Wärmedurchlasswiderstände bestimmt. Gemäß der Reihenschaltung der Wärmedurchlasswiderstände wurden daraus dann wiederum die Wärmedurchgangskoeffizienten der „Doppelsandwichelemente“ ermittelt. Die Zahlenwerte sind nachfolgend in Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 zusammengestellt.

Tabelle 3-8: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Sandwichwänden (PU-Bestand)

Table 3-8: Thermal transmittance for sandwich wall panels refurbished with sandwich panels (PU stock)

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]						
		Sandwichdicke PU, Typ III d _{SE} ^A [mm]						
		40	60	80	100	120	160	200
Sandwichdicke PU, Typ III d _{SE} ^B [mm]	60	0,317	0,254	0,202	0,171	0,150	0,120	0,100
	80	0,242	0,203	0,168	0,147	0,131	0,107	0,091
	100	0,201	0,174	0,148	0,131	0,118	0,098	0,084
	120	0,173	0,152	0,132	0,118	0,107	0,091	0,079
Bestand:		t _{N,SE} ^A = 0,75 mm; d _{SE} ^A = 40 ... 200 mm; λ _{WD,SE} ^A = 0,024 W/(m·K); Fugentyp I						
Sanierung:		t _{N,SE} ^B = 0,75 mm; d _{SE} ^B = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE} ^B = 0,025 W/(m·K); Fugentyp III						

In Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 sind die zugehörigen Diagramme dargestellt. Es ist zu erkennen, die jeweiligen Anforderungswerte durch die Sanierungsmaßnahme entsprechend erfüllt werden können.

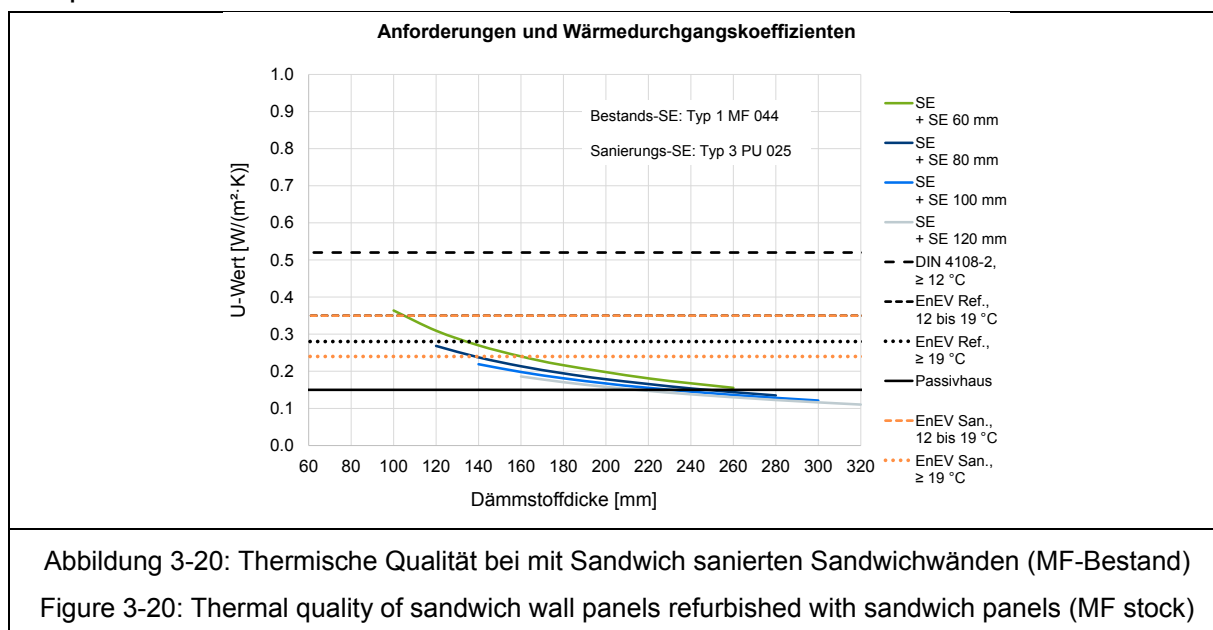
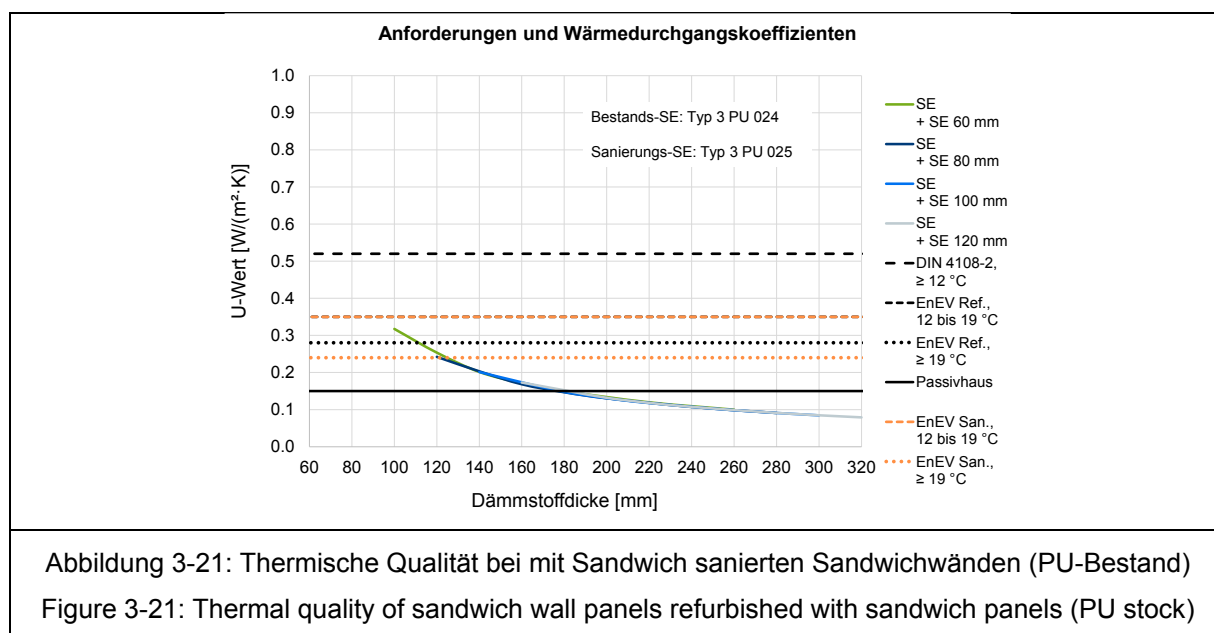


Abbildung 3-20: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Sandwichwänden (MF-Bestand)

Figure 3-20: Thermal quality of sandwich wall panels refurbished with sandwich panels (MF stock)



Aus baukonstruktiver Sicht kann es erforderlich werden, sowohl bei Hybrid- als auch bei der Doppelsandwichsanierung zwischen Bestand und Sanierungsmaßnahme eine zusätzliche Dämmlage zu verwenden. Dadurch lassen sich beispielsweise ggf. auftretende Unebenheiten ausgleichen. Die thermische Qualität wird durch diese zusätzliche Schicht nicht verschlechtert, so dass die ermittelten Wert für die Wärmedurchgangskoeffizienten auch für diese Varianten auf der sicheren Seite liegen und Gültigkeit besitzen.

3.2.2 Sanierung von massiven Fassadenkonstruktionen Refurbishment of massive façade constructions

3.2.2.1 Sanierung mit Sandwichelementen Refurbishment with sandwich panels

Wie in Abschnitt 2.2.1.2 aufgezeigt, können auch Fassaden bzw. Außenwände, die in massiver Bauweise – d.h. aus Beton, Porenbeton oder Mauerwerk – ggf. nicht den energetischen Anforderungen genügen. Als Sanierungsmaßnahmen wurden im Forschungsvorhaben wiederum die Applikation von Sandwichelement oder modularen Stahlkonstruktionen betrachtet. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf der Verwendung von Sandwichelementen, da auf Grundlage der Ergebnisse der Berechnungen an den sanierten Stahlleichtbaukonstruktionen (vgl. Abschnitt 3.2.1) zeigen, dass aus thermischer Sicht die modulare Sanierung ungünstiger ist.

Die Ergebnisse der Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten bei der Sanierung von massiven Außenwandkonstruktionen mit Sandwichelementen sind in Tabelle 3-9, Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11 zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Betonwänden

Table 3-9: Thermal transmittance for concrete walls refurbished with sandwich panels

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]								
		Betondicke d _{BETON} [mm]								
		100	120	140	150	160	180	200	220	240
Sandwichdicke d _{SE} [mm]	60	0,424	0,423	0,421	0,420	0,420	0,418	0,417	0,416	0,414
	80	0,314	0,313	0,312	0,312	0,311	0,311	0,310	0,309	0,308
	100	0,250	0,250	0,249	0,249	0,249	0,248	0,248	0,247	0,247
	120	0,209	0,208	0,208	0,208	0,208	0,207	0,207	0,206	0,206
Bestand:		d _{BETON} = 100 ... 240 mm; λ _{BETON} = 2,5 W/(m·K)								
Sanierung:		t _{N,SE} = 0,75 mm; d _{SE} = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE} = 0,025 W/(m·K); Fugentyp I								

Tabelle 3-10: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Porenbetonwänden

Table 3-10: Thermal transmittance for gas concrete walls refurbished with sandwich panels

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]								
		Porenbetondicke d _{P-BETON} [mm]								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
Sandwichdicke d _{SE} [mm]	60	0,301	0,262	0,232	0,208	0,188	0,172	0,158	0,147	0,137
	80	0,241	0,215	0,194	0,177	0,163	0,150	0,140	0,131	0,123
	100	0,202	0,183	0,168	0,155	0,144	0,134	0,126	0,118	0,112
	120	0,174	0,160	0,148	0,138	0,129	0,121	0,114	0,108	0,103
Bestand:		d _{P-BETON} = 100 ... 500 mm; λ _{P-BETON} = 0,1 W/(m·K)								
Sanierung:		t _{N,SE} = 0,75 mm; d _{SE} = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE} = 0,025 W/(m·K); Fugentyp I								

Tabelle 3-11: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Mauerwerkswänden
 Table 3-11: Thermal transmittance for masonry walls refurbished with sandwich panels

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]									
		Mauerwerksdicke d _{MAUERWERK} [mm]									
		100	115	150	175	200	240	300	375	425	490
Sandwichdicke d _{SE} [mm]	60	0,414	0,411	0,405	0,401	0,397	0,391	0,382	0,371	0,365	0,356
	80	0,308	0,307	0,303	0,301	0,299	0,295	0,290	0,284	0,280	0,275
	100	0,247	0,246	0,244	0,242	0,241	0,238	0,235	0,231	0,228	0,225
	120	0,206	0,205	0,204	0,203	0,202	0,200	0,198	0,195	0,193	0,191
Bestand:		d _{MAUERWERK} = 100 ... 490 mm; λ _{MAUERWERK} = 1,0 W/(m·K)									
Sanierung:		t _{N,SE} = 0,75 mm; d _{SE} = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE} = 0,025 W/(m·K); Fugentyp I									

Die visuelle Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten ist nachfolgend in Abbildung 3-22, Abbildung 3-23 und Abbildung 3-24 zu finden.

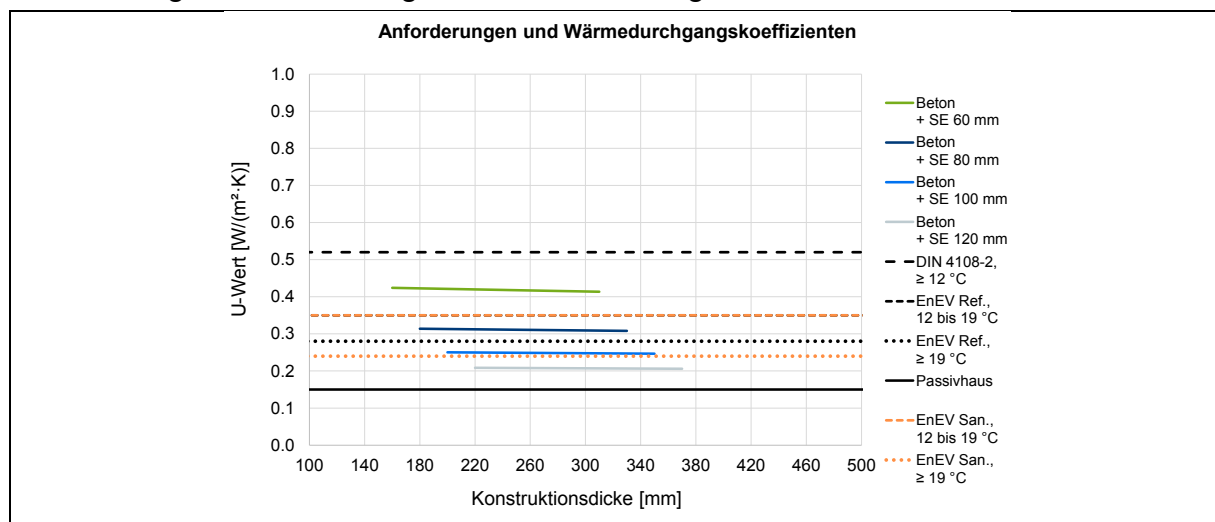


Abbildung 3-22: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Betonwänden

Figure 3-22: Thermal quality of concrete walls refurbished with sandwich panels

Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, lassen sich die verschiedenen Anforderungswerte mit den entsprechenden Kombinationen aus massiver Bestandswand und Sanierungssandwechelement einhalten. Wie zu erwarten war, lässt sich für die Fälle mit einer Bestandswand aus Porenbeton die beste thermisch-energetische Qualität ermitteln. Mit einer massiven Betonwand als Bestand zeigt sich,

dass der U-Wert nahezu komplett durch das Sanierungssandwich bestimmt wird. Die jeweilige Dicke der Betonkonstruktion trägt nur in vernachlässigbarer Größe dazu bei.

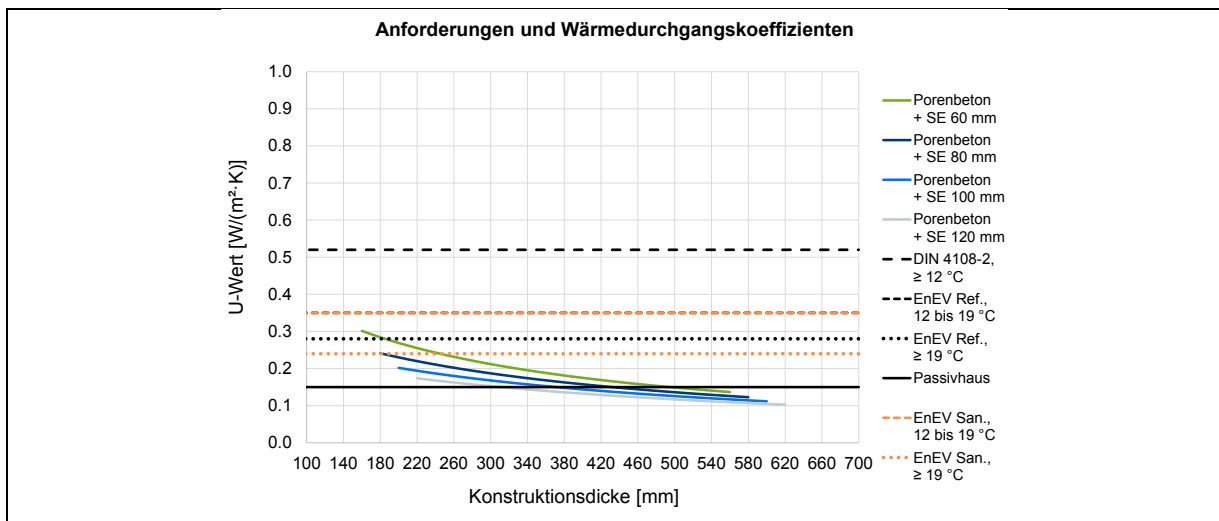


Abbildung 3-23: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Porenbetonwänden
Figure 3-23: Thermal quality of gas concrete walls refurbished with sandwich panels

Demgegenüber ist bei der Porenbeton- und der Mauerwerksbestandswand der Einfluss der Dicke der massiven Konstruktion sehr gut zu erkennen.

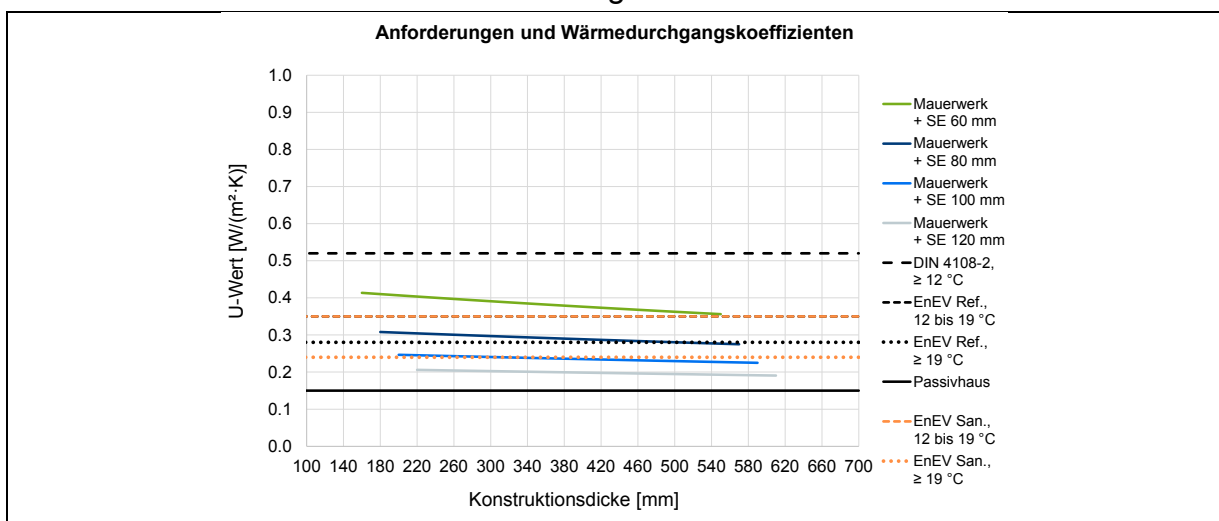


Abbildung 3-24: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Mauerwerkswänden
Figure 3-24: Thermal quality of masonry walls refurbished with sandwich panels

3.2.2.2 Sanierung mit modularen Stahlkonstruktionen Refurbishment with build-up systems

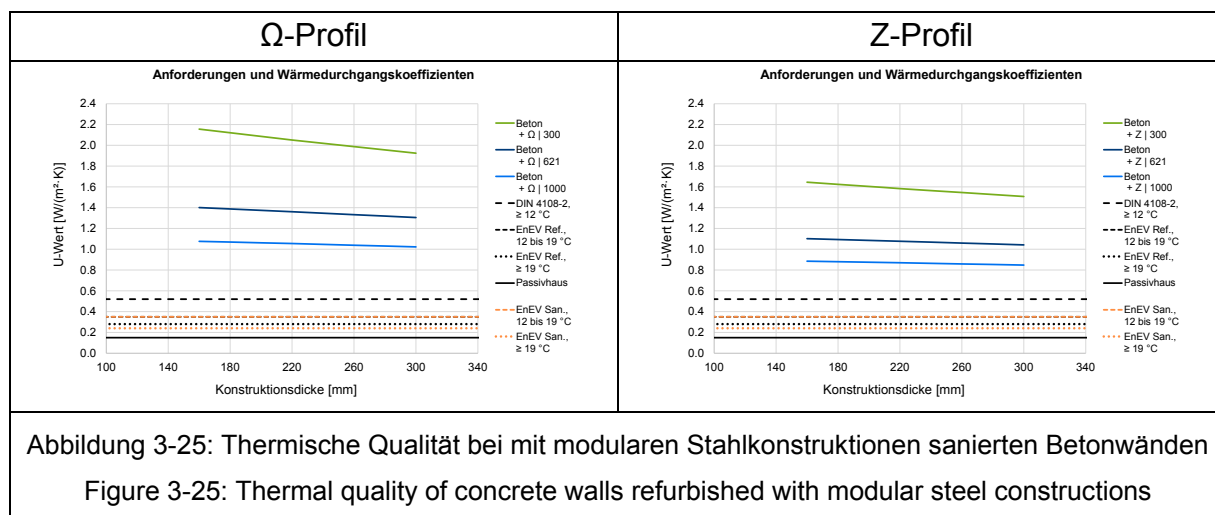
Als zweite generelle Sanierungsoption wurden ebenfalls wieder modulare Stahlkonstruktionen betrachtet. Die gewählten Stahlprofile und deren Abstände entsprechen denen aus Abschnitt 3.2.1; die Profile sind dort in Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 dargestellt.

Tabelle 3-12, Tabelle 3-13 und Tabelle 3-14 zeigen die Ergebniswerte der numerischen Untersuchungen.

Tabelle 3-12: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit modularen Stahlkonstruktionen sanierten Betonwänden

Table 3-12: Thermal transmittance for concrete walls refurbished with modular steel constructions

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]								
		Betondicke d _{BETON} [mm]								
		100	120	140	150	160	180	200	220	240
Abstand Ω-Profil e _{MOD} [mm]	300	2,156	2,121	2,086	0,068	2,051	2,019	1,987	1,956	1,924
	621	1,401	1,387	1,374	1,367	1,361	1,347	1,333	1,319	1,305
	1000	1,076	1,069	1,062	1,058	1,055	1,047	1,039	1,031	1,023
Abstand Z-Profil e _{MOD} [mm]	300	1,645	1,625	1,604	1,594	1,584	1,565	1,546	1,527	1,507
	621	1,102	1,094	1,086	1,081	1,077	1,068	1,060	1,051	1,042
	1000	0,885	0,880	0,875	0,873	0,870	0,864	0,859	0,853	0,848
Bestand:		d _{BETON} = 100 ... 240 mm; λ _{BETON} = 2,5 W/(m·K)								
Sanierung:		t _{N,MOD} = 1,50 mm; d _{MOD} = 60 mm; λ _{WD,MOD} = 0,035 W/(m·K)								



In Abbildung 3-25, Abbildung 3-26 und Abbildung 3-27 sind die Zahlenwerte in Diagrammform dargestellt. Die Auswirkungen der beiden unterschiedlichen Profilquerschnitte sind durch den jeweiligen Vergleich der beiden nebeneinanderstehenden Diagramme zu erkennen. Für die sanierten Betonwände führt die Verwendung von einer zusätzlichen Dämmschicht von 60 mm zwar zu einer

Verbesserung der thermischen Qualität; allerdings ist diese Verbesserung nicht ausreichend, um die Anforderungswerte einhalten zu können.

Tabelle 3-13: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit modularen Stahlkonstruktionen sanierten Porenbetonwänden

Table 3-13: Thermal transmittance for gas concrete walls refurbished with modular steel constructions

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]								
		Porenbetondicke d _{P-BETON} [mm]								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
Abstand Ω-Profil e _{MOD} [mm]	300	0,645	0,538	0,445	0,360	0,282	0,252	0,226	0,202	0,180
	621	0,497	0,419	0,354	0,298	0,248	0,223	0,202	0,183	0,166
	1000	0,440	0,372	0,318	0,272	0,232	0,209	0,190	0,173	0,158
Abstand Z-Profil e _{MOD} [mm]	300	0,527	0,444	0,373	0,312	0,256	0,230	0,208	0,188	0,169
	621	0,435	0,369	0,315	0,271	0,232	0,209	0,190	0,173	0,158
	1000	0,402	0,341	0,294	0,255	0,222	0,201	0,183	0,167	0,154
Bestand:		d _{P-BETON} = 100 ... 500 mm; λ _{P-BETON} = 0,1 W/(m·K)								
Sanierung:		t _{N,MOD} = 1,50 mm; d _{MOD} = 60 mm; λ _{WD,MOD} = 0,035 W/(m·K)								

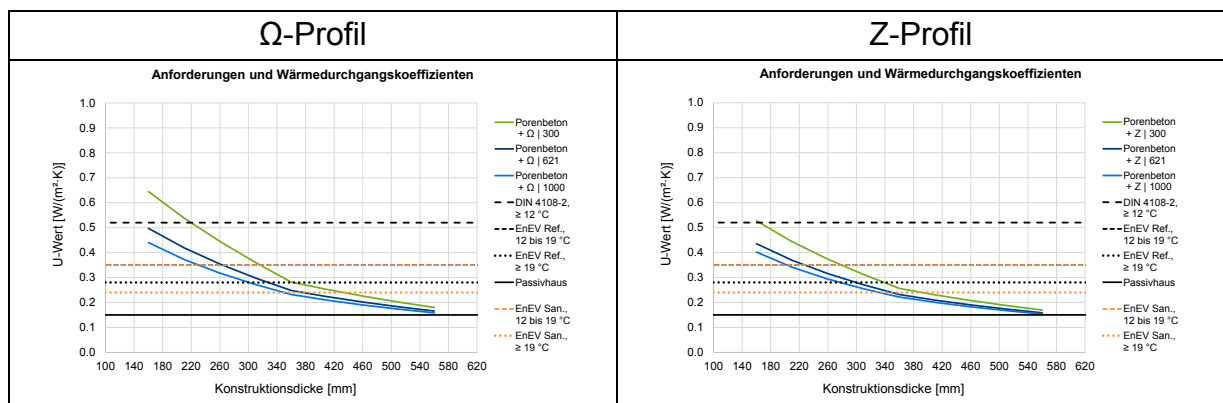


Abbildung 3-26: Thermische Qualität bei mit modularen Stahlkonstruktionen sanierten Porenbetonwänden

Figure 3-26: Thermal quality of gas concrete walls refurbished with modular steel constructions

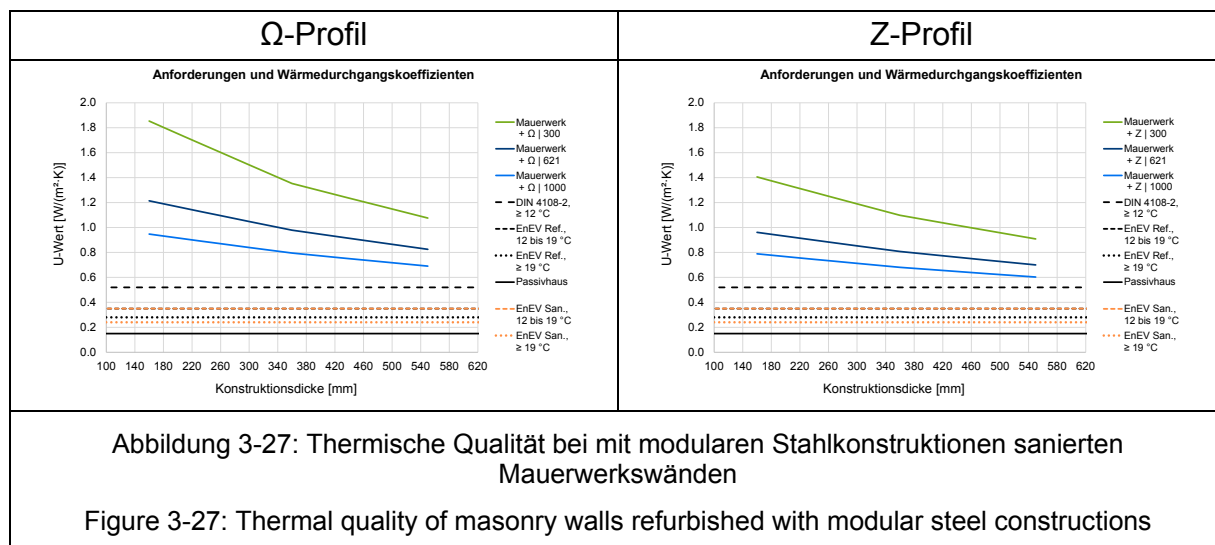
Bei Porenbetonbestandswänden kann durch die Sanierung mittels der modularen Stahlkonstruktion ebenfalls eine Reduktion des Wärmedurchgangskoeffizienten erzielt

werden. Da bereits die ungedämmte Porenbetonwand gute wärmeschutztechnische Eigenschaften aufweist, können mit der zusätzlich gedämmten Variante die Anforderungswerte zumindest teilweise erfüllt werden.

Tabelle 3-14: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit modularen Stahlkonstruktionen sanierten Mauerwerkswänden

Table 3-14: Thermal transmittance for masonry walls refurbished with modular steel constructions

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]									
		Mauerwerksdicke d _{MAUERWERK} [mm]									
		100	115	150	175	200	240	300	375	425	490
Abstand Ω-Profil e _{MOD} [mm]	300	1,853	1,815	1,727	1,664	1,602	1,502	1,353	1,243	1,170	1,076
	621	1,214	1,196	1,154	1,125	1,095	1,048	0,979	0,917	0,877	0,825
	1000	0,948	0,936	0,909	0,889	0,870	0,840	0,795	0,753	0,726	0,691
Abstand Z-Profil e _{MOD} [mm]	300	1,406	1,382	1,328	1,289	1,251	1,189	1,098	1,023	0,973	0,909
	621	0,962	0,950	0,922	0,903	0,884	0,853	0,808	0,765	0,736	0,700
	1000	0,789	0,781	0,761	0,748	0,734	0,713	0,681	0,650	0,629	0,603
Bestand:		d _{MAUERWERK} = 100 ... 490 mm; λ _{MAUERWERK} = 1,0 W/(m·K)									
Sanierung:		t _{N,MOD} = 1,50 mm; d _{MOD} = 60 mm; λ _{WD,MOD} = 0,035 W/(m·K)									



Die Sanierung von Massivwänden aus Mauerwerk mit den hier betrachteten modularen Stahlkonstruktionen führt zwar zu reduzierten Wärme- bzw. Energieverlusten, aber sind diese Verringerungen nicht ausreichend, um die betrachteten Anforderungsgrenzwerte einhalten zu können.

3.2.2.3 Vergleich der Sanierungsvarianten *Comparison of the refurbishment variations*

Stellt man die Ergebnisse der Sanierung mit Sandwichelemente und der mit modularen Stahlkonstruktionen gegenüber, zeigt sich, dass Varianten mit den zusätzlichen Sandwichelementen zu niedrigeren U-Werten führen. Dies liegt zum einen an der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Sandwichdämmung im Vergleich zu der bei der modularen Konstruktion verwendeten; zum anderen ist aber auch der Einfluss der Wärmebrücken, die durch die Stahlprofile entstehen, von nicht zu vernachlässigender Bedeutung. Bei den Sandwichelementen treten im Rahmen der hier betrachteten Fälle nur geringfügige Wärmebrückeneffekte im Bereich der Längsfugen auf.

Auf Grund von unterschiedlichen Maßtoleranzen, die bei Sandwichelementen bzw. bei der massiven Bestandswand gefordert oder realisierbar sind, erscheint es u.U. erforderlich, zwischen Bestands- und Sanierungsbauteil eine Ausgleichsschicht vorzusehen. Dabei kann beispielsweise eine zusätzliche, wenige Zentimeter starke Dämmlage die auftretenden Unebenheiten der massiven Oberfläche ausgleichen, sodass das Sandwichelement auch konstruktionsgerecht installiert werden kann. Durch den thermischen Einfluss dieser weiteren Dämmlage wird die thermische Qualität ebenfalls gesteigert. Die Ergebnisse, die ohne Berücksichtigung dieser Schicht ermittelt wurden, können aber dennoch verwendet werden, da sie auf der sicheren Seite liegen.

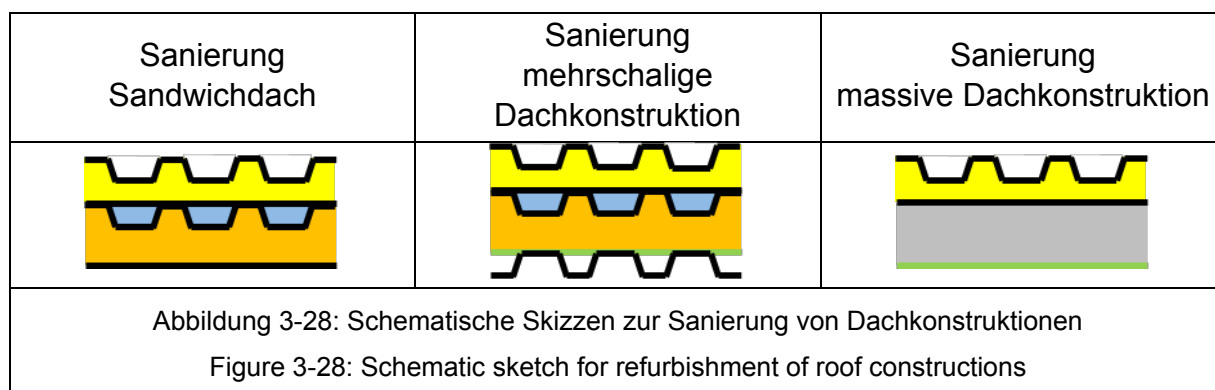
3.2.3 Sanierung von Dächern Refurbishment of roofs

3.2.3.1 Sanierung mit Sandwichelementen *Refurbishment with sandwich panels*

Hinsichtlich der Bestandskonstruktionen im Dachbereich wird als Standardfall von Sandwichdächern mit PU- oder MW-Dämmung ausgegangen. Als Sanierungsmaßnahme soll dabei das Ausdämmen der Sicken mit anschließender Überkleidung mit einem weiteren Sandwichelement bzw. mit einer Falzprofilkonstruktion berücksichtigt werden.

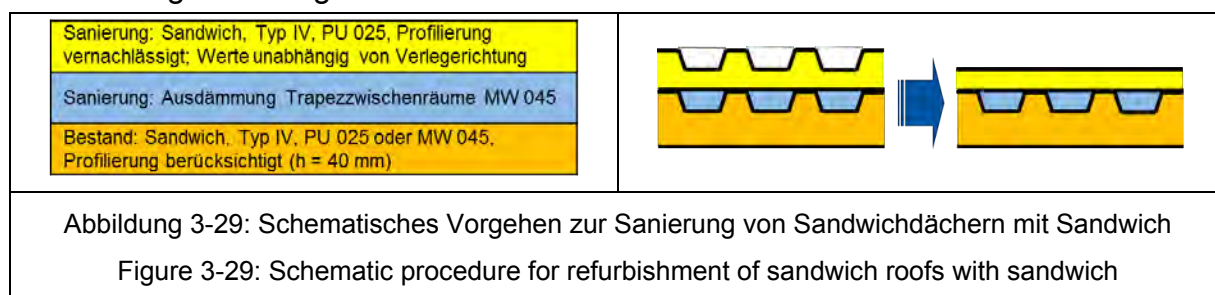
Anhand von Diskussionen wurde während des Forschungsvorhabens gemeinsam mit dem PbA in diesem Zusammenhang gelegt, dass die Untersuchung der Sanierungsmöglichkeiten von mehrschaligen oder auch massiven Dachkonstruktionen zugunsten der Stahlleichtbaukonstruktionen reduziert wird. Zum einen erscheint die Sanierung durch Rückbau und Einbau einer entsprechend neuen Dämmlage als baupraktisch bereits Stand der Technik, zum anderen wurde auf die Nischenstellung derartiger Konstruktionen verwiesen.

Schematisch sind in Abbildung 3-28 die diskutierten Sanierungsmöglichkeiten dargestellt.



Für die weiter betrachtet Kombination aus Bestandssandwichdach und Sanierungssandwichelement wurden entsprechende numerische Untersuchung durchgeführt. Neben der Variante es PU-Bestandssandwichelementes wurden auch Elemente mit MW-Dämmkern berücksichtigt. Die Ausgangswärmedurchgangskoeffizienten für diese Fälle sind in Abschnitt 2.2.1.3 in Abbildung 2-32 zu finden.

Bei den FE-Berechnungen wurde das Bestandssandwichelement inkl. der Trapezprofilierung (Sicken) modelliert. Für die Zwischenräume der Sicken wurde angenommen, dass diese mit Mineralwolle WLS 045 passgenau ausgedämmt wurden. Dadurch wird eine ebene Bauteiloberfläche auf der Außenseite erreicht. Um hinsichtlich der Verlegerichtung der Sanierungssandwichelemente unabhängige Ergebnisse zu erzielen, wurde für diese Elemente darauf verzichtet, die Trapezprofilierung mit zu modellieren. Angesetzt wurden ebene PU-Sandwichelemente, deren Dicke der minimalen durchgehenden Elementdicke im Sinn von DIN EN 14059 entspricht. Die an diesem Aufbau ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten sind dadurch höher als die in der Realität zu erwartenden. Entsprechendes gilt bei der Verwendung einer hochwertigeren Sickendämmung (mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit). Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 3-29 dargestellt.



In Tabelle 3-15 und Tabelle 3-16 sind die Zahlenwerte der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengestellt.

Tabelle 3-15: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Sandwichdächern (PU-Bestand)

Table 3-15: Thermal transmittance for sandwich roof panels refurbished with sandwich panels (PU stock)

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]						
		Sandwichdicke PU, Typ IV d _{SE^A} [mm]						
		40	60	80	100	120	160	200
Sandwichdicke PU, Typ IV d _{SE^B} [mm]	60	0,227	0,200	0,174	0,147	0,136	0,115	0,093
	80	0,192	0,172	0,152	0,132	0,123	0,104	0,086
	100	0,166	0,151	0,135	0,119	0,111	0,096	0,081
	120	0,147	0,134	0,121	0,109	0,102	0,089	0,076
Bestand:		t _{N,SE^A} = 0,75 mm; d _{SE^A} = 40 ... 200 mm; λ _{WD,SE^A} = 0,025 W/(m·K); Fugentyp IV						
Sanierung:		t _{N,SE^B} = 0,75 mm; d _{SE^B} = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE^B} = 0,025 W/(m·K); Fugentyp IV						

Die graphischen Darstellungen der Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 3-30 und Abbildung 3-31 zu finden.

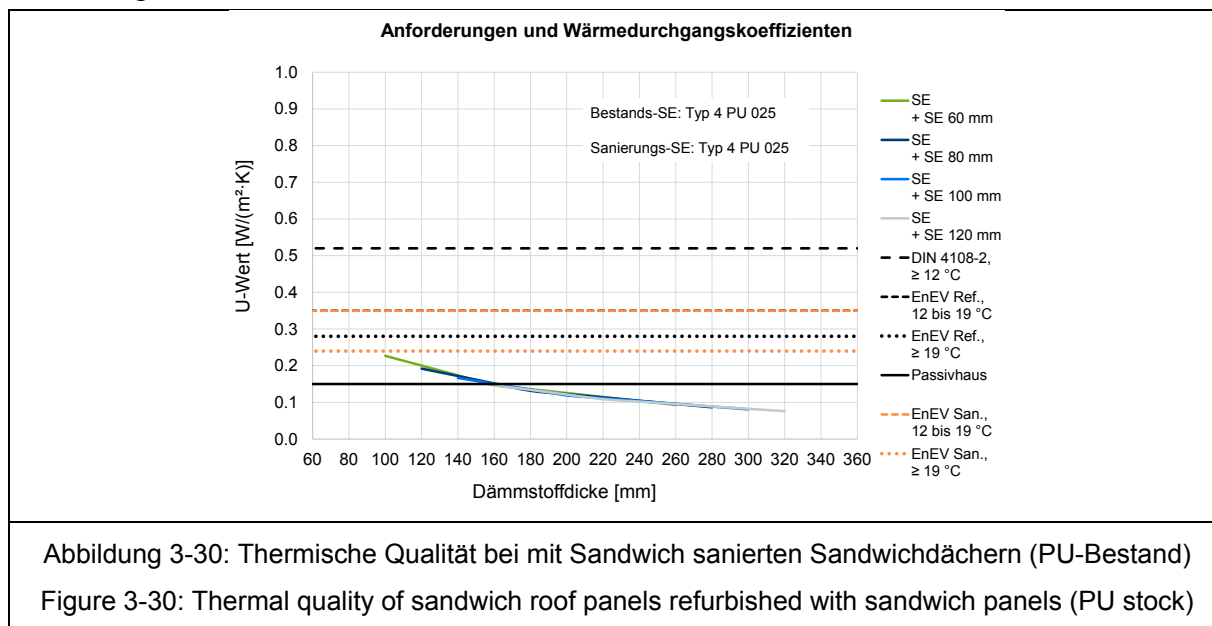


Tabelle 3-16: Wärmedurchgangskoeffizienten bei mit Sandwich sanierten Sandwichdächern (MW-Bestand)

Table 3-16: Thermal transmittance for sandwich roof panels refurbished with sandwich panels (MW stock)

		Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² ·K)]						
		Sandwichdicke MW, Typ IV d _{SE} ^A [mm]						
		40	60	80	100	120	160	200
Sandwichdicke PU, Typ IV d _{SE} ^B [mm]	60	0,271	0,247	0,223	0,199	0,187	0,163	0,138
	80	0,223	0,206	0,189	0,172	0,162	0,143	0,125
	100	0,189	0,176	0,164	0,151	0,143	0,123	0,113
	120	0,164	0,154	0,145	0,135	0,129	0,116	0,104
Bestand:		t _{N,SE} ^A = 0,75 mm; d _{SE} ^A = 40 ... 200 mm; λ _{WD,SE} ^A = 0,045 W/(m·K); Fugentyp IV						
Sanierung:		t _{N,SE} ^B = 0,75 mm; d _{SE} ^B = 60 ... 120 mm; λ _{WD,SE} ^B = 0,025 W/(m·K); Fugentyp IV						

Wie die Abbildungen zeigen, können mit den entsprechenden Kombinationen von Bestands- und Sanierungssandwichelement die Anforderungswerte eingehalten werden.

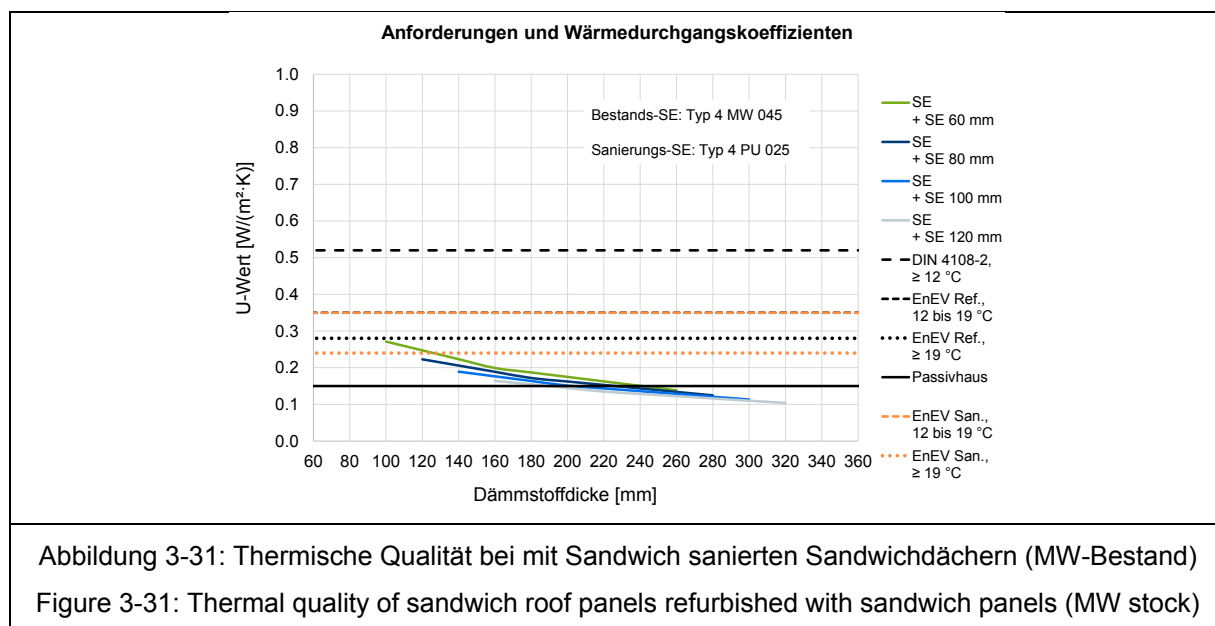


Abbildung 3-31: Thermische Qualität bei mit Sandwich sanierten Sandwichdächern (MW-Bestand)

Figure 3-31: Thermal quality of sandwich roof panels refurbished with sandwich panels (MW stock)

3.2.3.2 Sanierung mit Falzprofilkonstruktionen Refurbishment with standing seam profile constructions

Als weitere Sanierungsvariante wurde die zusätzliche Applikation von Falzprofilkonstruktionen betrachtet. In diesem Kontext wird zunächst kurz auf die spezifischen Besonderheiten und Kennzeichen dieser Systeme eingegangen. Abbildung 3-32 zeigt eine beispielhaften Aufbau eines Falzprofildaches.

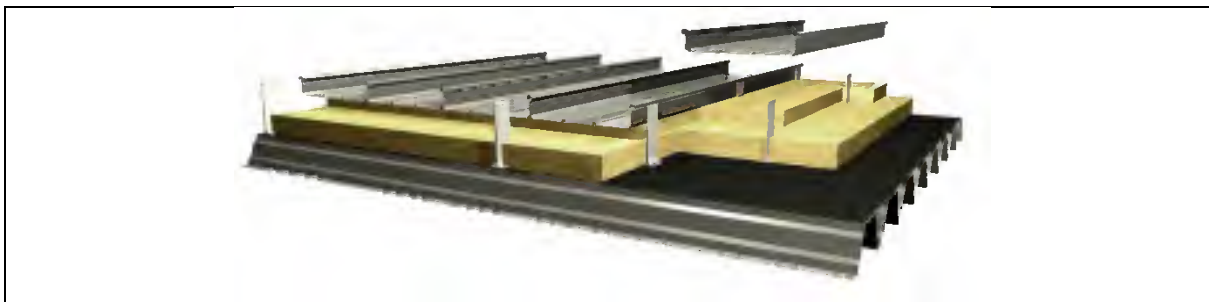


Abbildung 3-32: Exemplarische Darstellung Falzprofildach
Figure 3-32: Exemplary visualisation of standing seam profile roof

Merkmal dieser Konstruktionen sind die wiederkehrenden Falzprofilhalter bzw. „Klipps“, die zur Erzeugung der Dämmebene zwischen Unterkonstruktion und außenseitiger Falzprofiltafel erforderlich sind.

Diese Klipps besitzen herstellerspezifische Abmessungen und Materialeigenschaften. Um nachfolgend Untersuchungsergebnisse zu erhalten, die eine größtmögliche Unabhängigkeit von konkreten Herstellern ermöglicht, wurde ein typisierter Aluminiumklipp verwendet.

In Abbildung 3-33 ist exemplarisch eine Gegenüberstellung der punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Klipps dargestellt.

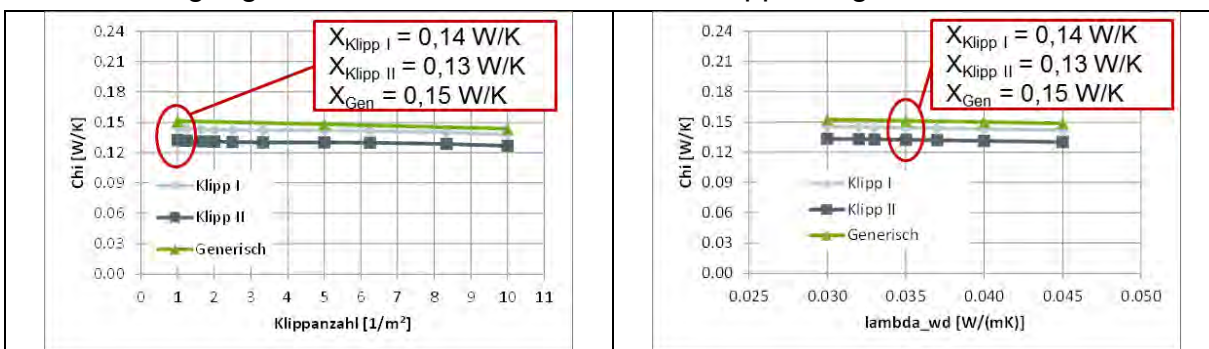


Abbildung 3-33: Exemplarischer Vergleich der thermischen Qualität unterschiedlicher Klipps
Figure 3-33: Exemplary comparison of the thermal quality of different clips

Die dargestellten Ergebnisse der thermischen Untersuchungen an Falzprofilklipps zeigen, dass für die hier berücksichtigten Varianten zum einen die Anzahl der Klipps je m² nur einen geringen Einfluss besitzt. Außerdem hat die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung auf den punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ebenfalls nur einen marginalen Einfluss.

Für die weiteren Untersuchungen hinsichtlich der Sanierung mit Falzprofilkonstruktionen wurde daher auf dieser Grundlage die thermische Qualität mit Hilfe des nachfolgend in Abbildung 3-34 dargestellten Diagramms angesetzt.

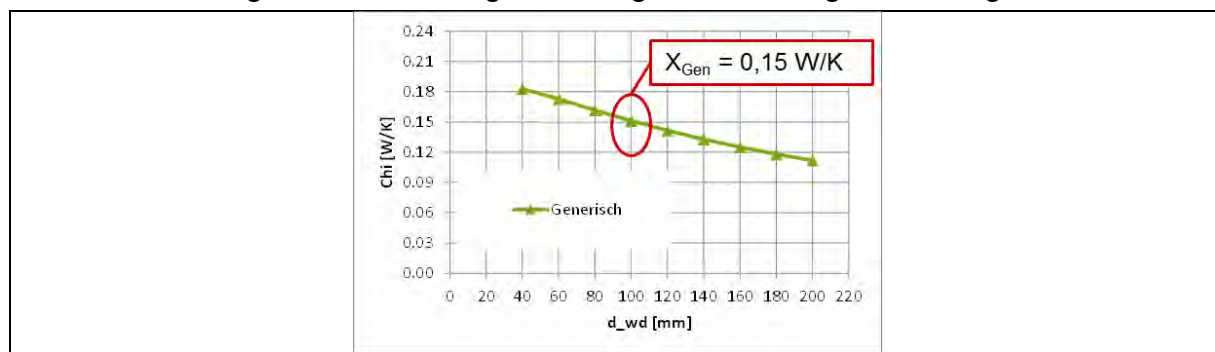


Abbildung 3-34: Thermischen Qualität des typisierten Klipps

Figure 3-34: Thermal quality of typed clip

Abbildung 3-35 verdeutlicht das im weiteren Verlauf angewandte Vorgehen, das auch bereits in Abschnitt 3.2.3.1 beschrieben und verwendet wurde.

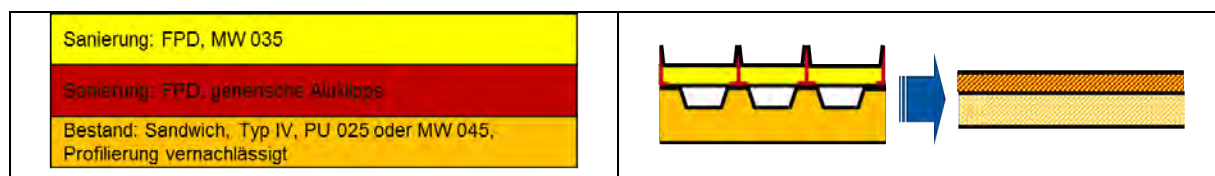


Abbildung 3-35: Schematisches Vorgehen zur Sanierung von Sandwichdächern mit Falzprofilkonstruktion

Figure 3-35: Schematic procedure for refurbishment of sandwich roofs with standing seam profile construction

Die Ergebnisse sind nachfolgend in den Diagrammen der Abbildung 3-36 und Abbildung 3-37 dargestellt. Betrachtet wurde dabei jeweils eine Sanierung mit einer Falzprofilkonstruktion der Dämmstoffdicke 60, 80, 100 und 120 mm.

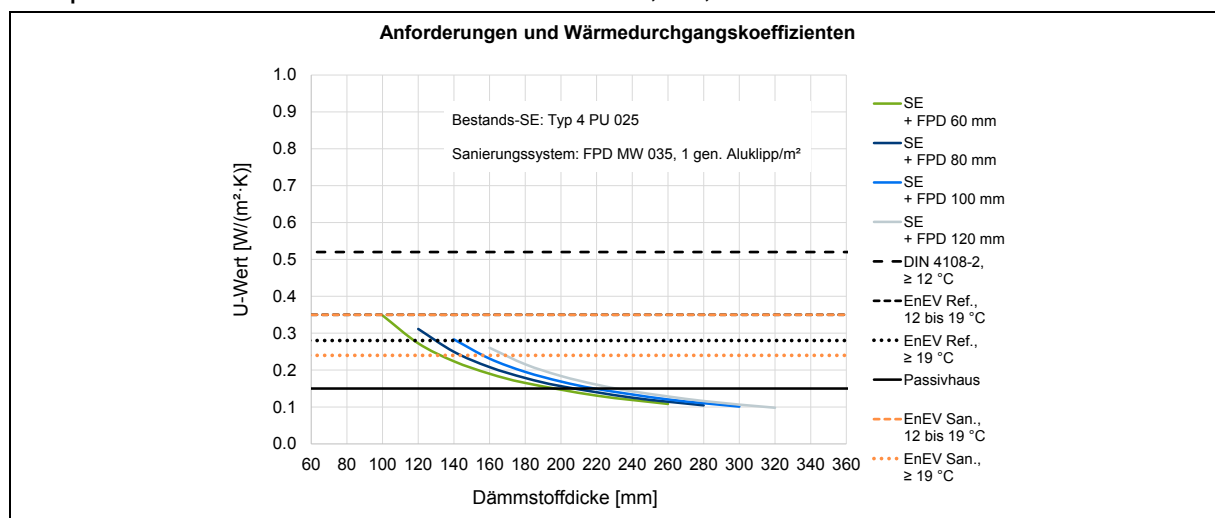
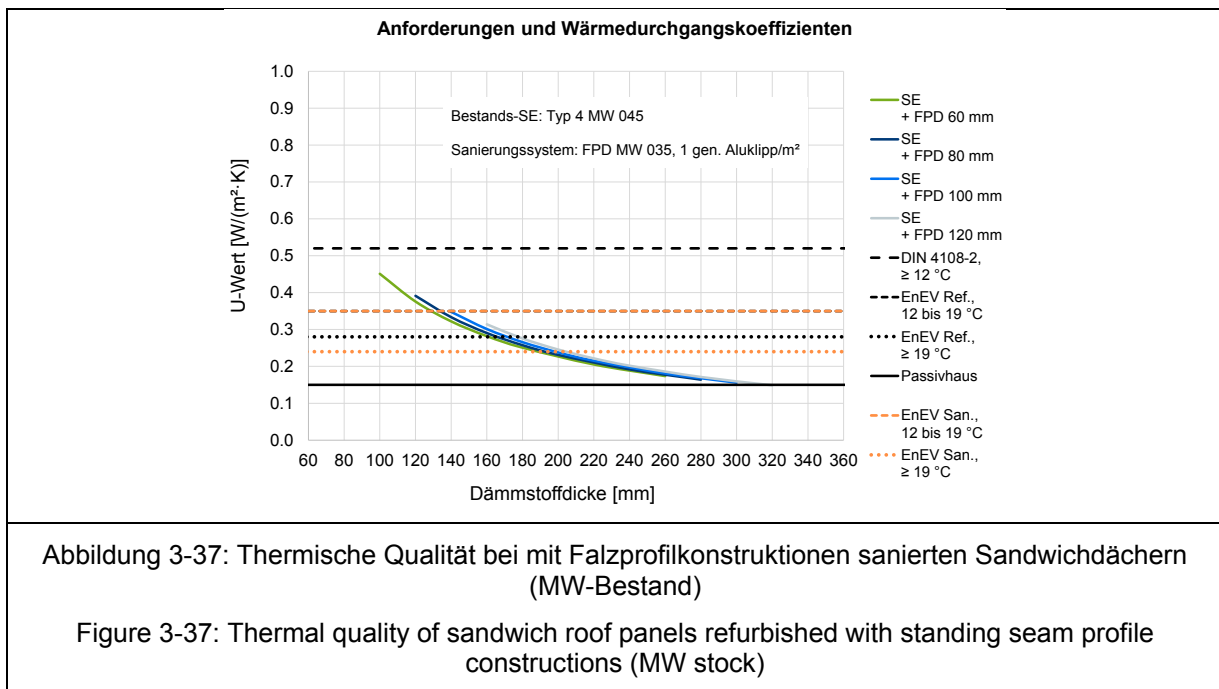


Abbildung 3-36: Thermische Qualität bei mit Falzprofilkonstruktionen sanierten Sandwichdächern (PU-Bestand)

Figure 3-36: Thermal quality of sandwich roof panels refurbished with standing seam profile constructions (PU stock)

Wie die Abbildungen zeigen, können mit den entsprechenden Kombinationen die Anforderungswerte eingehalten werden.



3.3 Hygrische Qualität Hygric quality

3.3.1 Sanierung von Stahlleichtbaufassaden Refurbishment of lightweight steel façades

3.3.1.1 Kassettenelemente Liner tray elements

3.3.1.1.1 Bewertung nach DIN 4108-3 Evaluation according to DIN 4108-3

Zur Bewertung der hygrischen Qualität von Kassettenelementen, die mit Sandwichelementen energetisch saniert wurden, wurde zunächst eine Kassettenwand mit einer Dicke von 145 mm betrachtet, die mit zwei Sandwichelementen unterschiedlicher Dicke saniert wurde. Im ersten Fall beträgt die Elementdicke 60 mm, im zweiten Fall 80 mm. Es handelt sich jeweils um ein PU-Element. Die nach der Sanierung erreichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten betragen nach Tabelle 3-1 0,253 bzw. 0,209 W/(m²·K).

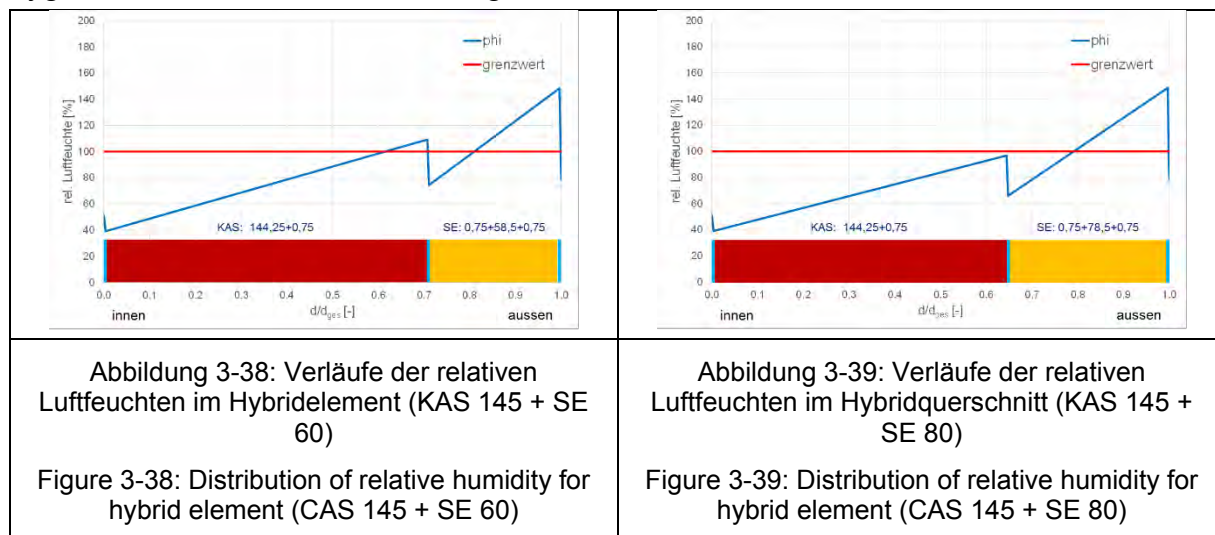
Die hygrische Untersuchung erfolgt in Anlehnung an das Verfahren nach DIN 4108-3. Die dabei verwendeten Materialeigenschaften sind in Tabelle 3-17 aufgelistet. Als zusammenfassende Ergebnisdarstellung wird nachfolgend jeweils der ermittelte Verlauf der relativen Luftfeuchte im Querschnitt wiedergegeben. Abbildung 3-38 und Abbildung 3-39 zeigen die zugehörigen Verläufe.

Tabelle 3-17: Hygrothermische Materialeigenschaften bei Hybridelementen

Table 3-17: Hygrothermal material properties for hybrid elements

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Stahl	50	100.000
Mineralwolle	0,035	1
Polyurethan	0,025	200

Im ersten Fall (Kassette 145 mm + Sandwich 60 mm) zeigt sich, dass die relative Luftfeuchte sowohl im Bereich des Kassettenquerschnitts als auch im Sandwichquerschnitt jeweils den Grenzwert von 100 % überschreitet. Für die zweite Variante (Kassette 145 mm + Sandwich 80 mm) wird der Grenzwert nur im Bereich des Sandwichquerschnitts nicht eingehalten. Verantwortlich dafür sind die konkreten Materialeigenschaften, die geometrischen Randbedingungen, sowie die hygrothermischen Zusammenhänge von Wärme und Feuchte.

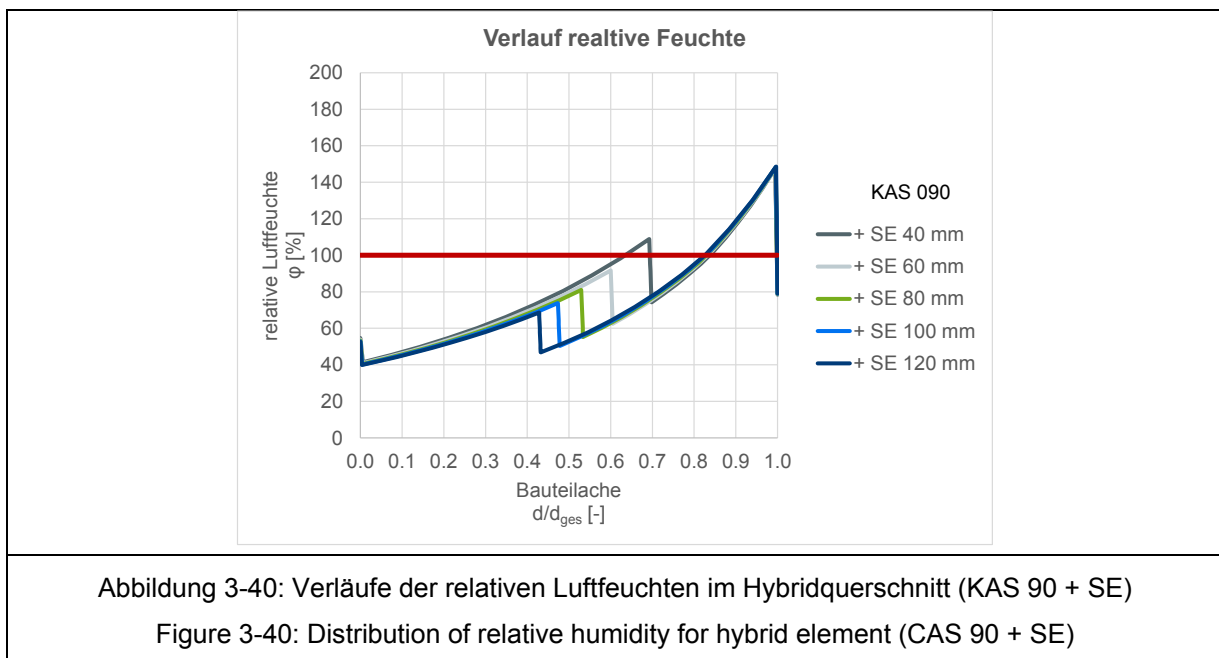


Wie in Abschnitt 2.2.2.3 erläutert, bewegen sich Konstruktionen mit mehreren hintereinander liegenden Stahlschichten – allgemein Schichten mit nahezu unendlicher Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl – an der Grenze des Anwendungsbereiches der Verfahren; im Regelbereich von derartigen Bauteilkonstruktionen erscheint es praktisch ausgeschlossen, dass Feuchtigkeit in den Querschnitt gelangen kann. Allerdings ist für die betrachteten Hybridkonstruktionen durchaus vorstellbar, dass im Stoßbereich der Kassettenelemente neben Luft- auch Wasserdampfdiffusionsundichtigkeiten auftreten können. Insbesondere da bei älteren Bestandskassettenelementen oftmals keine zuverlässige Aussage hinsichtlich des Vorhandenseins von Abdichtungen (Dichtbänder) möglich ist, kann es durch diese Fehlstellen ggf. zur Wasserdampfdiffusion in den Dämmquerschnitt kommen.

Demgegenüber kann im Lauf der Sanierungsmaßnahme bei entsprechender Planung und Durchführung die Wasserdampfdurchlässigkeit des Sandwichelementes bzw. der Längsfugen erreicht werden. Damit kann eine Dampfdiffusion in diesen Querschnittsteil sehr verlässlich reduziert werden.

Vor diesem Hintergrund werden die Ergebnisse der beiden Berechnungen beurteilt. Eine Überschreitung der relativen Luftfeuchte von 100 % im Kassettenquerschnitt sollte vermieden werden, während im Sandwichquerschnitt diese als unschädlich eingestuft wird. Im konkreten Fall sollte demnach die zweite Variante ausgeführt werden, da sie zum einen thermisch günstiger und zum anderen hygrisch sicherer ist.

Auf Basis dieser Ausführungen wurden für unterschiedliche Kombinationen von Kassetten- und Sandwichelementen Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der Fragestellung der Lage des Taupunktes beschäftigen. Gesucht war dabei die (mindestens) erforderliche Dicke des Sandwichelementes, um Tauwasserbildung zwischen Kassetten- und Sandwichelement (im Kassettenquerschnitt) verhindert wird. Die für die unterschiedlichen Kassettenprofilhöhen erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 3-40 bis Abbildung 3-44 dargestellt. Dabei ist jeweils ein Kassettenelement mit fünf unterschiedlichen Sandwichelementen betrachtet worden.



Bei einem 90 mm hohen Kassettenprofil ist mindestens ein 60 mm dickes Sandwichelement erforderlich, damit rechnerisch keine Tauwasserbildung im Kassettenquerschnitt auftritt.

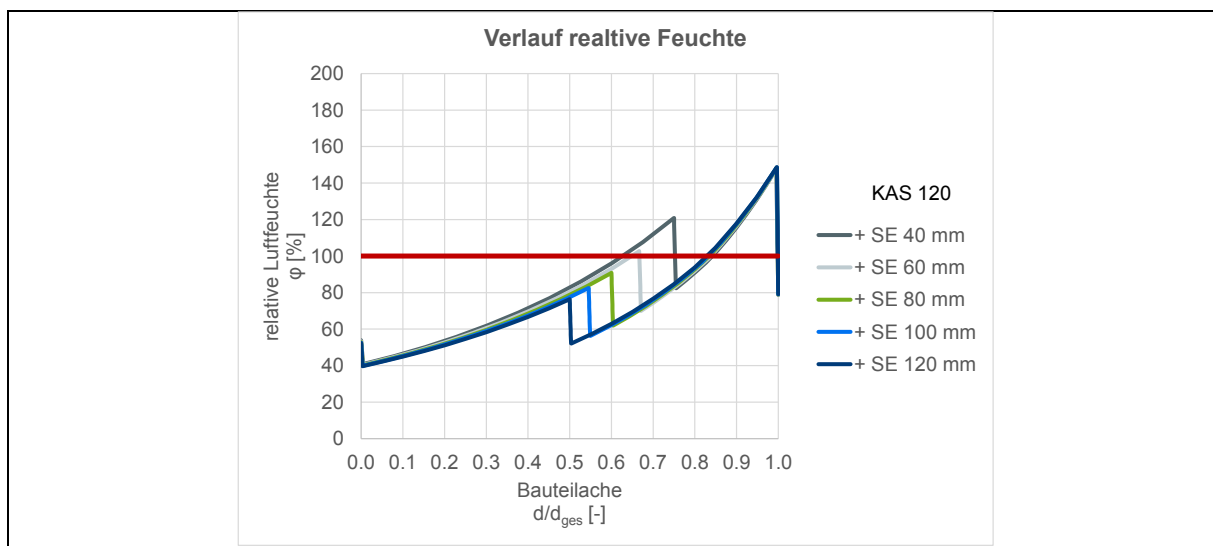


Abbildung 3-41: Verläufe der relativen Luftfeuchten im Hybridquerschnitt (KAS 120 + SE)

Figure 3-41: Distribution of relative humidity for hybrid element (CAS 120 + SE)

Für ein 120 mm hohes Kassettenprofil ergibt sich mindestens eine Sandwichelementdicke von 80 mm notwendig, damit rechnerisch im Kassettenquerschnitt die relative Luftfeuchte nicht über 100 % ansteigt.

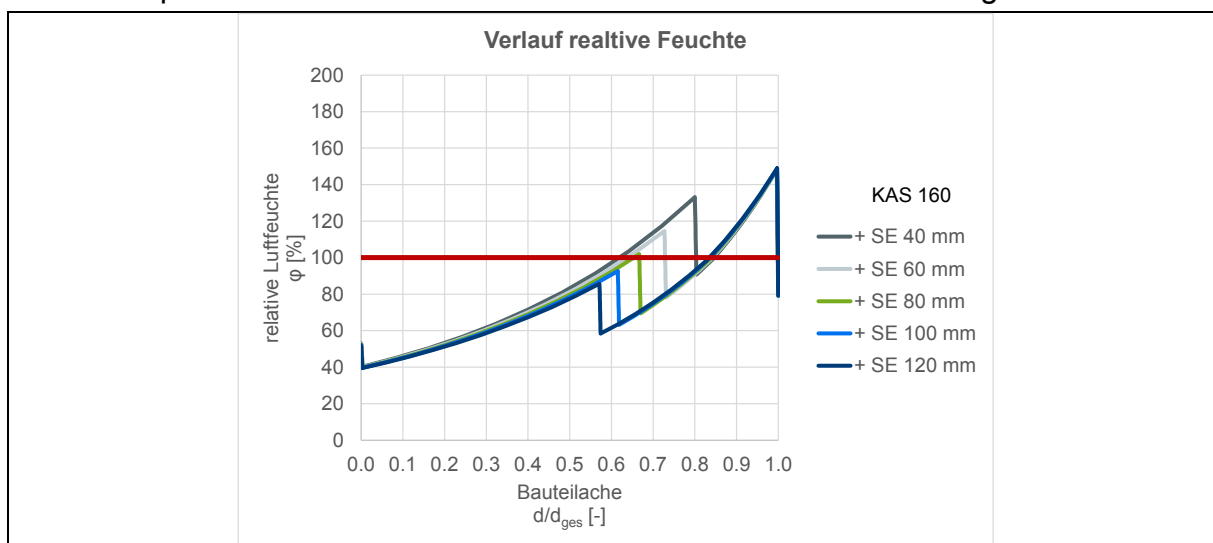


Abbildung 3-42: Verläufe der relativen Luftfeuchten im Hybridquerschnitt (KAS 160 + SE)

Figure 3-42: Distribution of relative humidity for hybrid element (CAS 160 + SE)

Ein Sandwichelement mit einer Dicke von mindestens 100 mm ist erforderlich, damit es in Kombination mit einem 160 mm hohen Kassettenprofil rechnerisch nicht zur Überschreitung einer relativen Luftfeuchte von 100 % im Kassettenquerschnitt kommt.

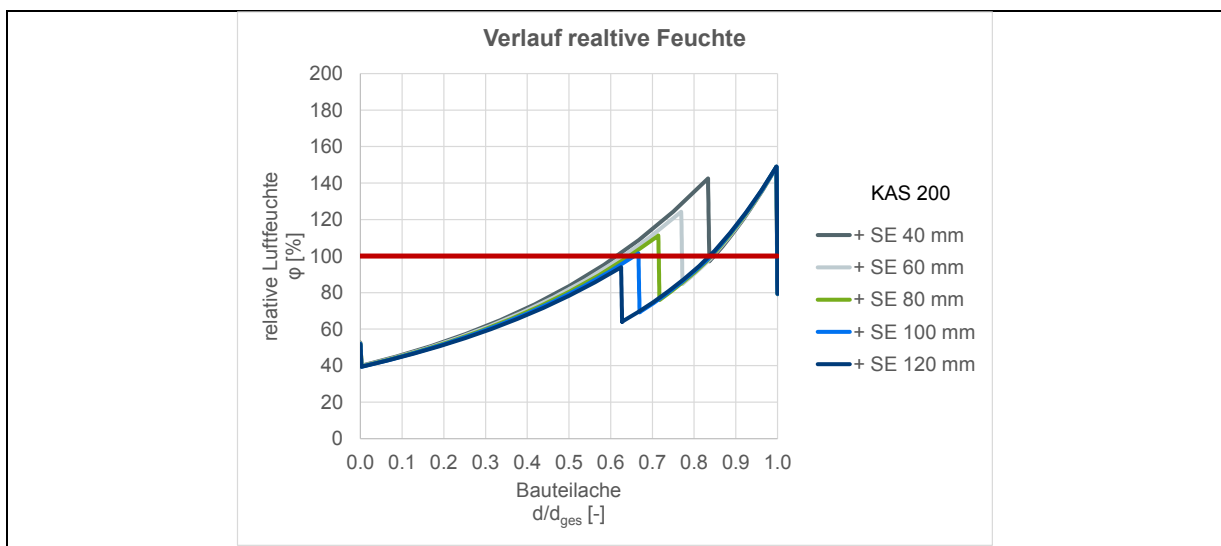


Abbildung 3-43: Verläufe der relativen Luftfeuchten im Hybridquerschnitt (KAS 200 + SE)

Figure 3-43: Distribution of relative humidity for hybrid element (CAS 200 + SE)

Bei Verwendung eines 200 mm hohen Kassettenprofils ist mindestens ein Sandwichelement der Dicke 120 mm notwendig, um die rechnerische Überschreitung des Taupunktes im Kassettenquerschnitt zu vermeiden

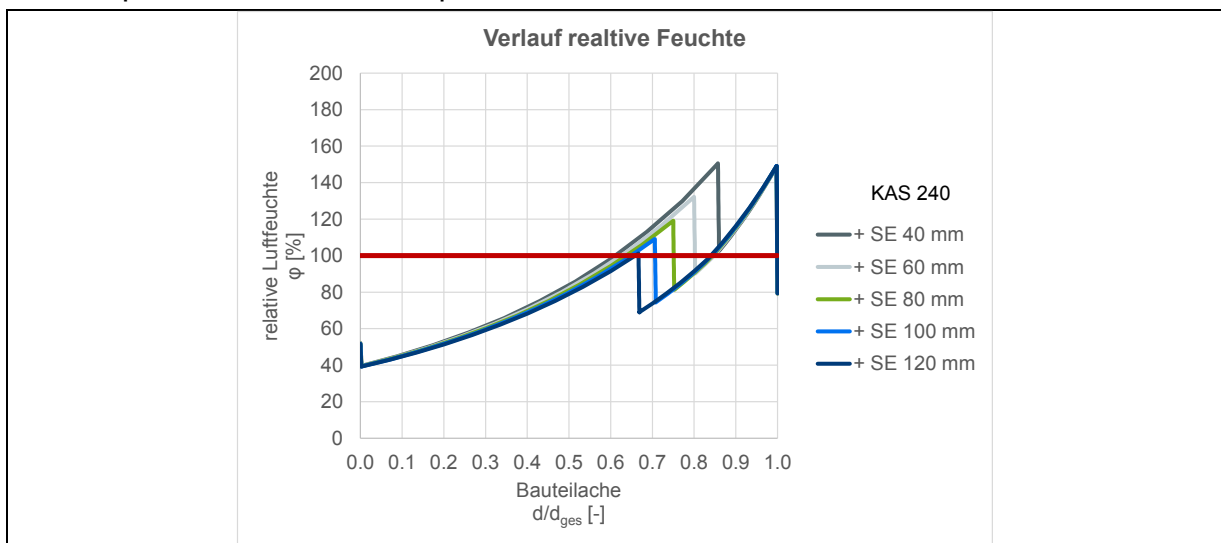


Abbildung 3-44: Verläufe der relativen Luftfeuchten im Hybridquerschnitt (KAS 240 + SE)

Figure 3-44: Distribution of relative humidity for hybrid element (CAS 240 + SE)

Für ein Kassettenprofil mit einer Höhe von 240 mm wird mindestens ebenfalls ein 120 mm dickes Sandwichelement benötigt, damit rechnerisch keine Tauwasserbildung innerhalb des Kassettenquerschnitts auftritt.

Die einzelnen Ergebnisse, die sich aus den durchgeführten Berechnungen ableiten lassen, sind nachfolgend in Abbildung 3-45 zusammengestellt.

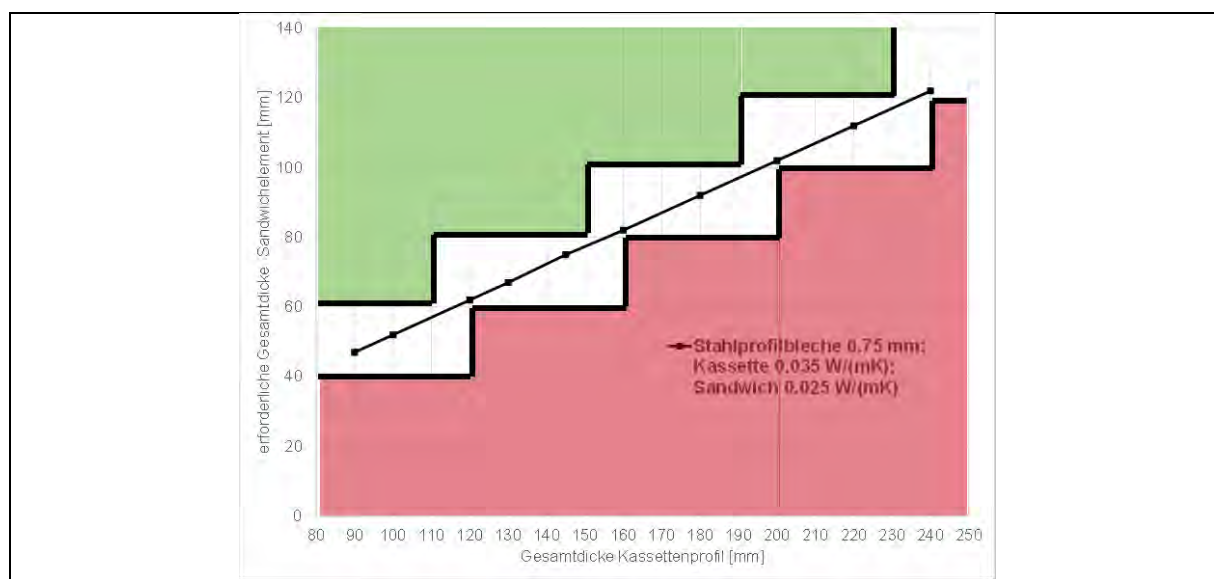


Abbildung 3-45: Hygrisch erforderliche Sandwichdicke beim Hybridelement

Figure 3-45: Hygric required sandwich thickness for hybrid element

Dargestellt ist die rechnerisch mindestens erforderliche Gesamtdicke des Sandwichelementes in Abhängigkeit von der Kassettenprofilhöhe bzw. Dicke des Kassettenelementes. Die Bereiche oberhalb der Gerade gelten dabei als zulässig. Auf Grundlage der marktüblichen Sandwichelementdicken kann daraus der grün hinterlegte Bereich abgeleitet werden.

Wie zu erkennen ist, erfüllt eine Sandwichelementdicke von 120 mm unabhängig von dem konkret vorliegenden Kassettenprofil die Vorgaben.

3.3.1.1.2 Bewertung nach DIN EN 15026

Evaluation according to DIN EN 15026

Zusätzlich zu den Untersuchungen nach DIN 4108-3 wurden auch numerischen Berechnungen nach DIN EN 15026 durchgeführt. Dazu wurden entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 2.2.2.1.3 und 2.2.2.3.2 die Materialparameter für das in Abbildung 3-46 dargestellte Hybridelement angesetzt.

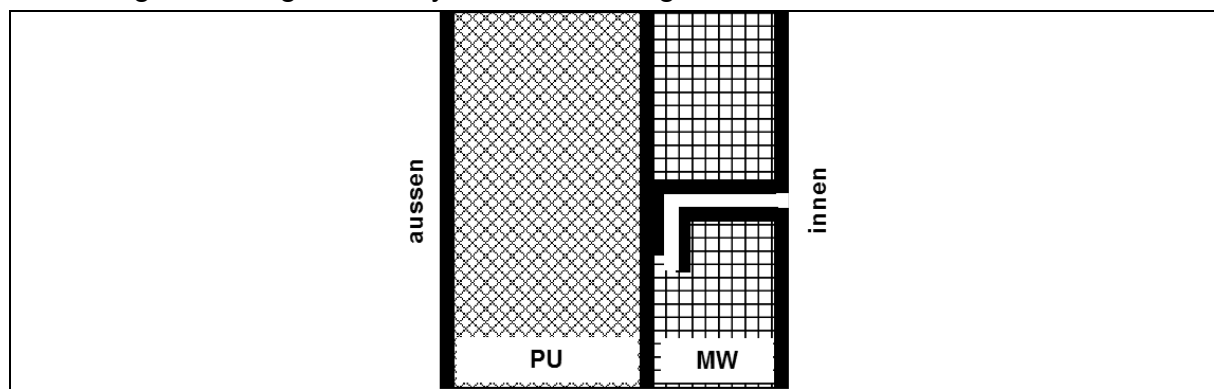


Abbildung 3-46: Querschnitt vom Hybridelement für Verfahren nach DIN EN 15026

Figure 3-46: Cross section of hybrid element for method according to DIN EN 15026

Geometrisch wurde das Modell unter Bezug auf die Aussagen und Ergebnisse zur hygrisch erforderlichen Sandwichdicke beim Hybridelement aus einem 100 mm

Kassettenprofil und einem 120 mm Sandwichelement erstellt. Die Fuge im Kassettensteg wurde bei der Untersuchung zwischen 0 und 9 mm variiert.

Die Klimarandbedingungen wurden in Anlehnung an DIN 4108-3 wie in Abbildung 3-47 visualisiert angesetzt. Als Betrachtungszeitraum wurde dabei eine 90 tägige Tauperiode gefolgt von einer 90 tägigen Verdunstungsperiode gewählt.

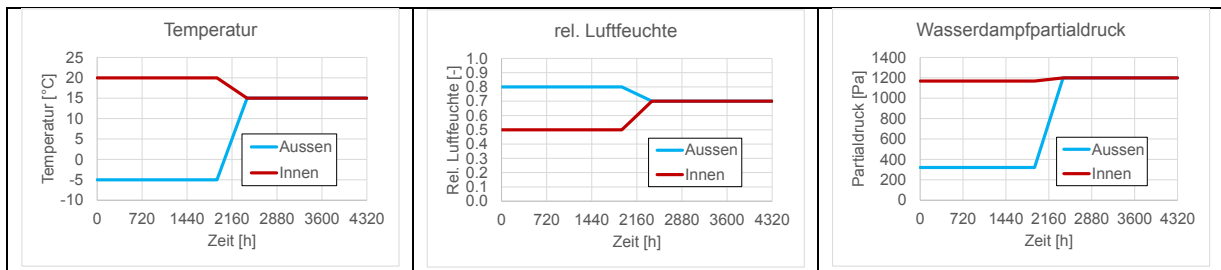


Abbildung 3-47: Klimarandbedingungen für Verfahren nach DIN EN 15026
Figure 3-47: Climatic boundary conditions for method according to DIN EN 15026

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen wurden wie bereits in Abschnitt 2.2.2.3.2 eingeführt in Form von Bandbreitenkorridoren, die sich aus den minimalen und maximalen Werten ergeben, ausgewertet.

In Abbildung 3-48 sind die Verläufe der relativen Luftfeuchte im Fugenschnitt des Hybridelementes exemplarisch für drei Fugenvarianten dargestellt; Abbildung 3-49 zeigt die entsprechenden Wassergehalte.

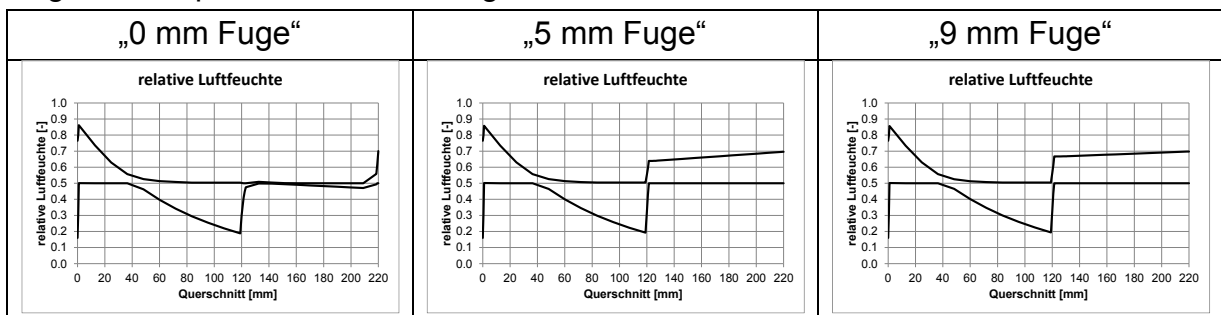


Abbildung 3-48: Ergebnisse „Hybridelement φ “ für Verfahren nach DIN EN 15026
Figure 3-48: Results “hybrid element φ ” for method according to DIN EN 15026

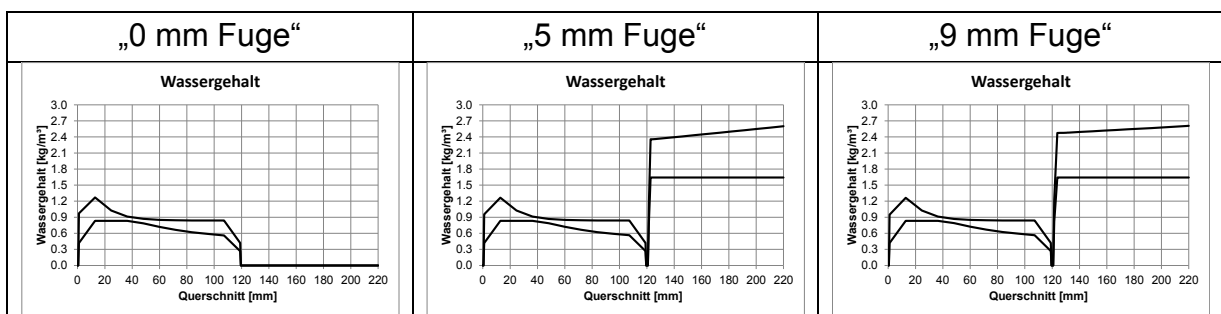
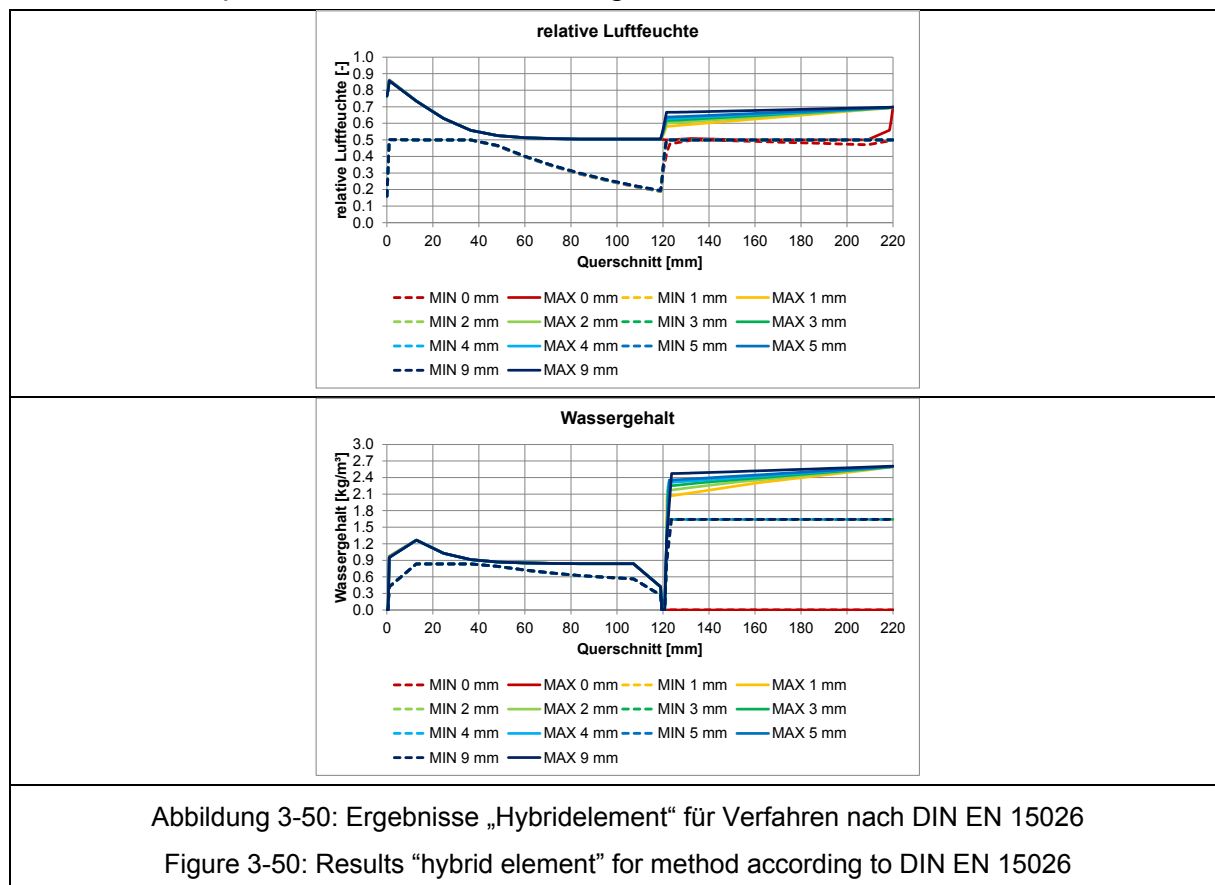


Abbildung 3-49: Ergebnisse „Hybridelement w “ für Verfahren nach DIN EN 15026
Figure 3-49: Results “hybrid element w ” for method according to DIN EN 15026

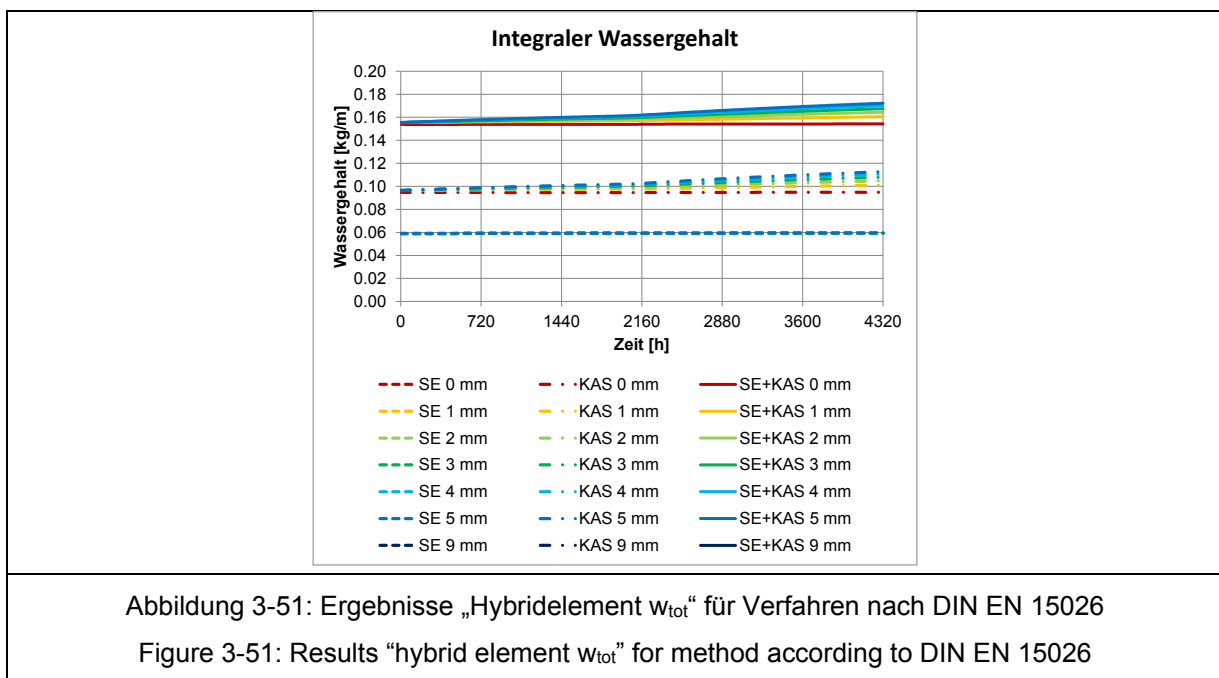
Für den Bereich des Sandwichquerschnittes, der auf der x-Achse von „0“ bis „120“ dargestellt ist, hat die Fugengröße des Kassettensteges, wie zu erwarten ist, keinen

Einfluss; das Sandwichdeckblech an der Grenzschicht zwischen den beiden Querschnittsteilen verhindert die Weiterleitung der Feuchtigkeit und das Aufweichen des Sandwichelementes.

In Abbildung 3-50 sind die Bandbreitenkorridore für alle betrachteten Fugenvarianten visualisiert. Dabei ist zu erkennen, dass der konkrete Fugenabstand auch im Bereich des Kassettenquerschnitts nur einen untergeordneten Einfluss besitzt.



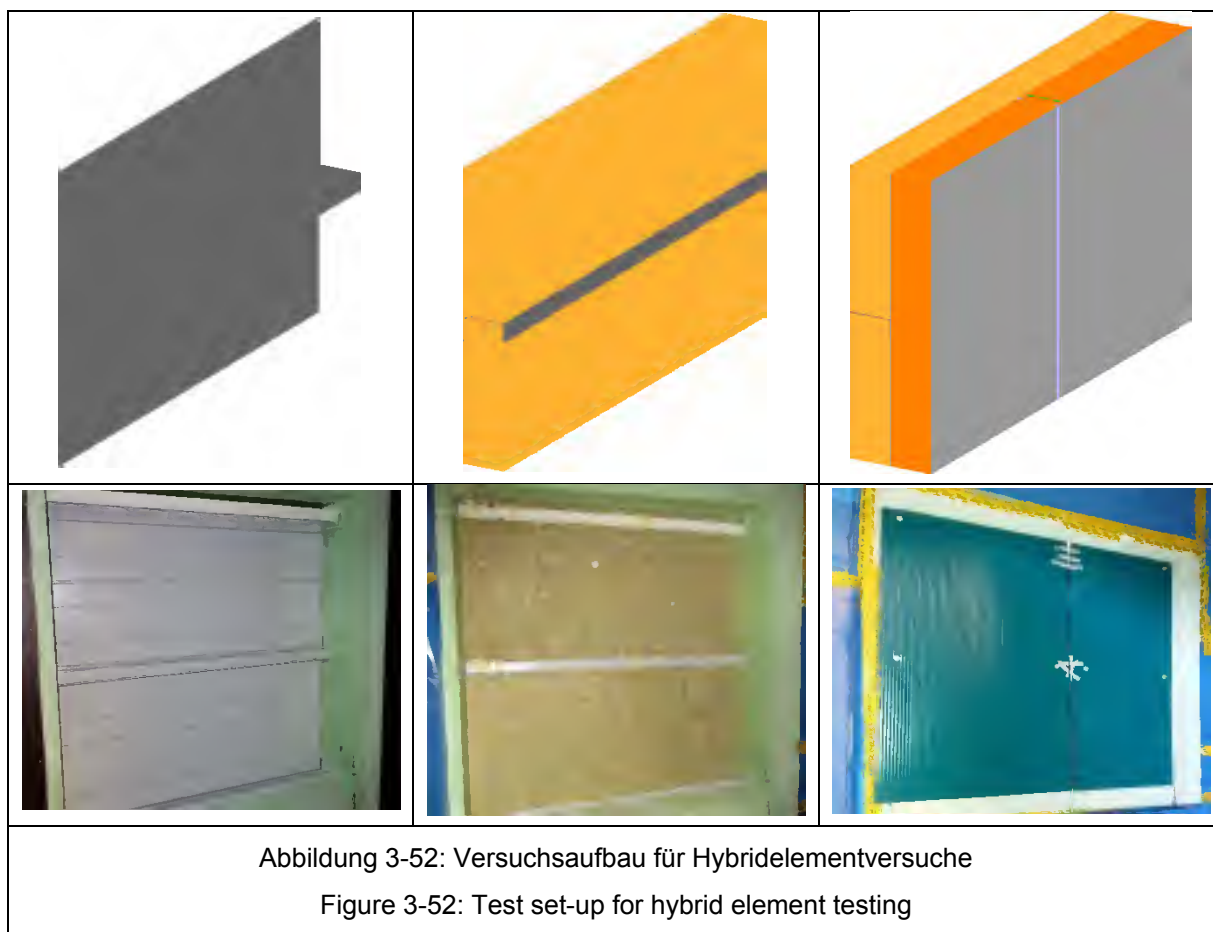
Wird der integrale Wassergehalt in den beiden Querschnittsteilen sowie im gesamten Hybridquerschnitt bestimmt, zeigt sich, dass tendenziell eine Zunahme mit steigendem Fugenabstand auftritt. Dabei ist allerdings keine exakte Unterscheidung zwischen Tau- und Verdunstungsperiode mehr festzustellen. Abbildung 3-51 enthält eine entsprechende zeitabhängige Auswertung.



3.3.1.1.3 Experimentelle Untersuchungen Experimental investigations

Zur praktischen Untersuchung von Hybridelementen wurden Versuche durchgeführt. Gewählt wurde dafür ein Element, das aus einem Kassettenelement mit einer Dicke von 100 mm und Wärmeleitfähigkeit von 0,045 W/(m·K) sowie einem Sandwichelement mit einer Dicke von 100 mm und Wärmeleitfähigkeit 0,025 W/(m·K) besteht.

Der Kassettenquerschnitt hat einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,85 W/(m²·K), der Sandwichquerschnitt 0,25 W/(m²·K). Für das Hybridelement ergibt sich daraus ein Bemessungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,20 W/(m²·K). Abbildung 3-52 zeigt den Versuchsaufbau.



Die Materialeigenschaften sind nachfolgend in Tabelle 3-18 aufgeführt.

Tabelle 3-18: Materialeigenschaften für Hybridelementversuche

Table 3-18: Material properties for hybrid element testing

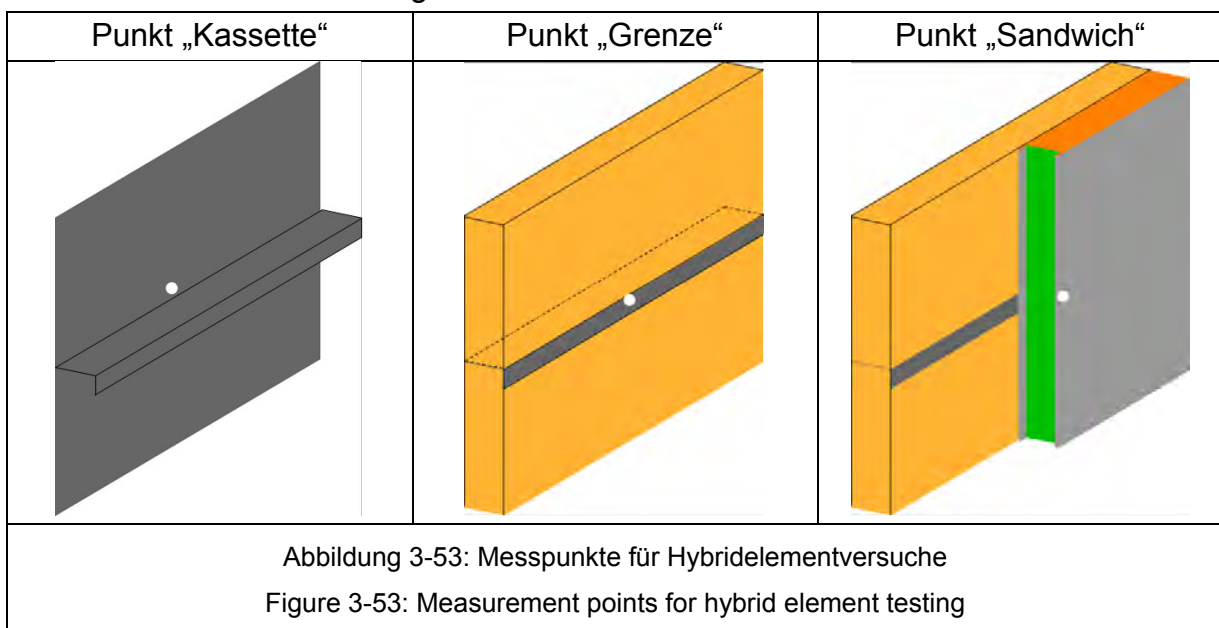
		Kassettenelement	Sandwichelement
Wärmedämmung	Typ	Mineralwolle	Polyurethan
	Dicke d [mm]	100	100
	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	0,045	0,025
	Wasserdampfdiffusions- -widerstandszahl μ [-] -leitfähigkeit δ [kg/(m·s·Pa)]	1 2 E-10	40 5 E-12
Stahlprofilblech	Dicke d [mm]	0,5	0,5
	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	50	50
	Wasserdampfdiffusions- -widerstandszahl μ [-] -leitfähigkeit δ [kg/(m·s·Pa)]	∞ (100.000) 2 E-15	∞ (100.000) 2 E-15

Für die Warmseite wurden eine Temperatur von 30 °C und eine relative Luftfeuchte von 30 % angesetzt; auf der Kaltseite wurde demgegenüber eine Temperatur von 5 °C bei einer relativen Luftfeuchte von knapp 100 % gewählt. Dadurch wurde sichergestellt,

dass ein Wasserdampfpartialdruckgradient von ca. 400 Pa von der Warm- zur Kaltseite auftritt.

Für die Versuchsdurchführung wurden verschiedene Konstellationen der Elementabdichtung betrachtet. Bei dem Kassettenelement wurde hinsichtlich des Kassettensieges zwischen den beiden Fällen „mit Dichtband“ und „ohne Dichtband“ unterschieden. Für die Sandwichlängsfuge wurden drei Varianten betrachtet: ohne Spalt („dicht“), mit kleinem Spalt (10 mm) und mit großem Spalt (20 mm). Die Versuchsdauer wurde zu jeweils 48 Stunden gewählt.

Zur Auswertung wurden die Temperaturen und die relativen Luftfeuchten an verschiedenen Messpunkten des Probekörpers ermittelt und aufgezeichnet. Die Lage dieser Punkte ist in Abbildung 3-53 visualisiert.



Auf Grundlage des Verfahrens nach DIN 4108-3 wurden vorab die zu erwartenden Ergebnisse ermittelt. Als Grenzbetrachtung wurden die Verläufe der Temperatur und der relativen Luftfeuchte für die beiden Bereiche „Kassette Dämmung / Sandwich“ und „Kassette Steg / Sandwich“ untersucht. Wie in Abbildung 3-54 zu sehen, entsprechen die Temperaturen an den beiden Messpunkten „Kassette“ bzw. „Sandwich“ für beide Bereiche den angesetzten Randbedingungen, während für den Messpunkt „Grenze“ je nach Bereich 21 bzw. 30 °C auftreten. Die relative Luftfeuchte an der Innenoberfläche (Punkt „Kassette“) stimmt mit der Randbedingung von 30 % überein. An der Grenzschicht ergeben sich Werte von 20 bzw. 45 % und auf der Kaltseite liegen die (theoretisch) berechneten Luftfeuchten zwischen 100 und 110 %.

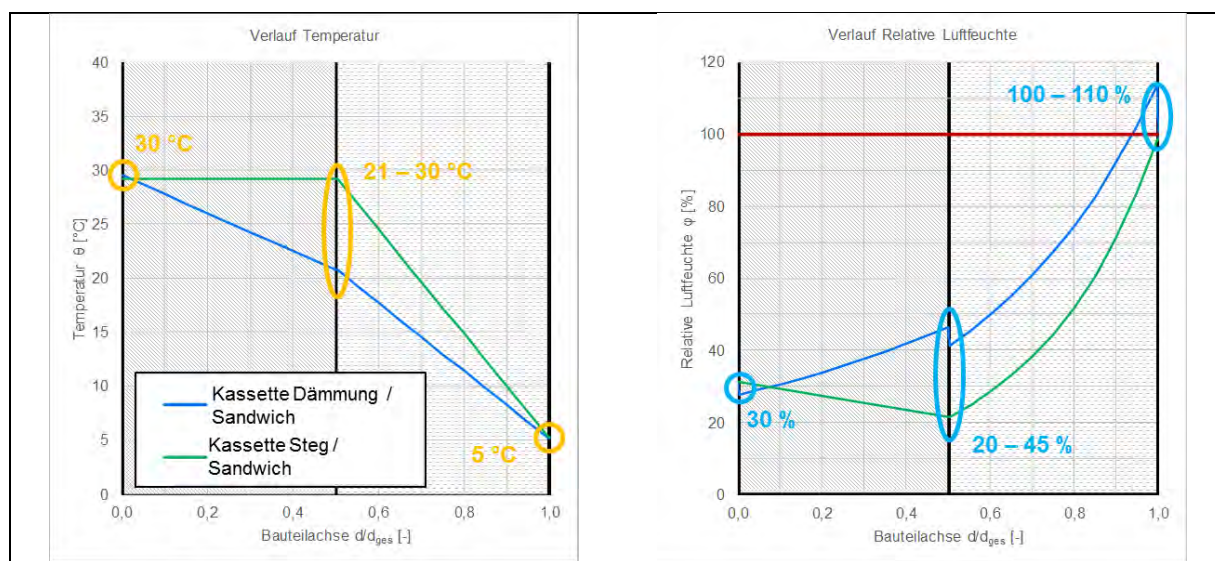


Abbildung 3-54: Ergebnisse Vorabuntersuchung für Hybridelementversuche

Figure 3-54: Results of pre-investigations for hybrid element testing

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung sind nachfolgend in Abhängigkeit von Messpunkt und Zeit dargestellt (siehe Abbildung 3-55, Abbildung 3-56 und Abbildung 3-57). Neben den sechs sich ergebenden Kombinationen der Elementabdichtung sind in den Diagrammen die jeweiligen Bandbreiten der Ergebnisse eingezeichnet.

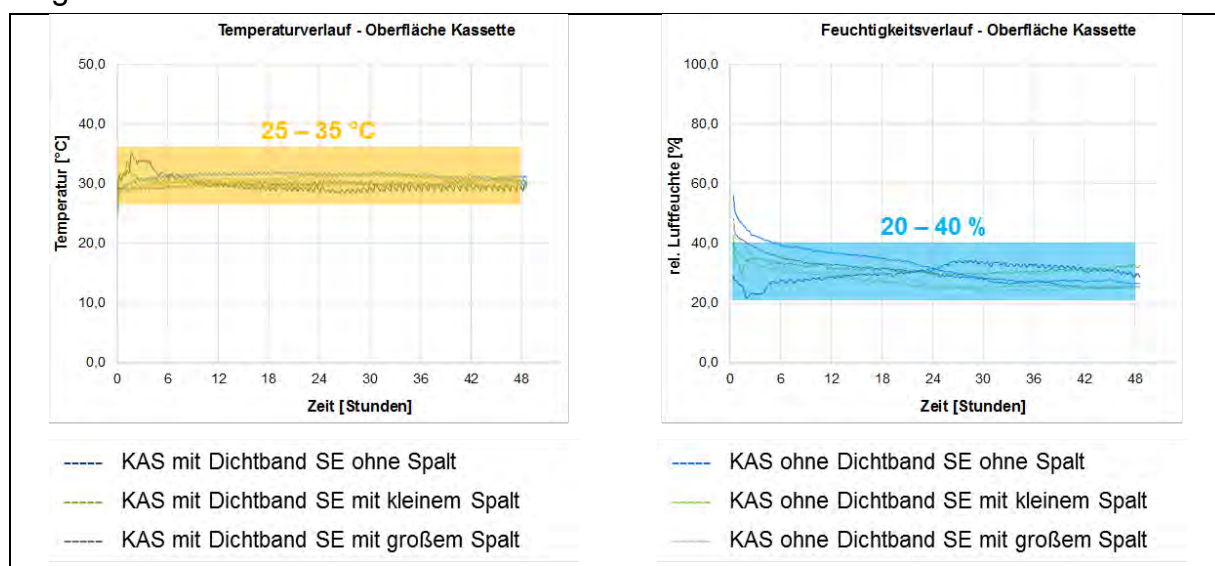


Abbildung 3-55: Ergebnisse Punkt „Kassette“ für Hybridelementversuche

Figure 3-55: Results point "liner tray" for hybrid element testing

Für den Messpunkt „Kassette“ (Abbildung 3-55) liegen die Temperaturen in einem Bereich von 25 bis 35 °C bzw. streuen im weiteren Verlauf der Versuche nur sehr gering um den angesetzten Temperaturwert von 30 °C. Die Verläufe der relativen Luftfeuchten streuen demgegenüber breiter, lassen sich aber in einem Bereich zwischen 20 und 40 % zusammenfassen; im Wesentlichen entsprechen sie somit den Randbedingung von 30 %.

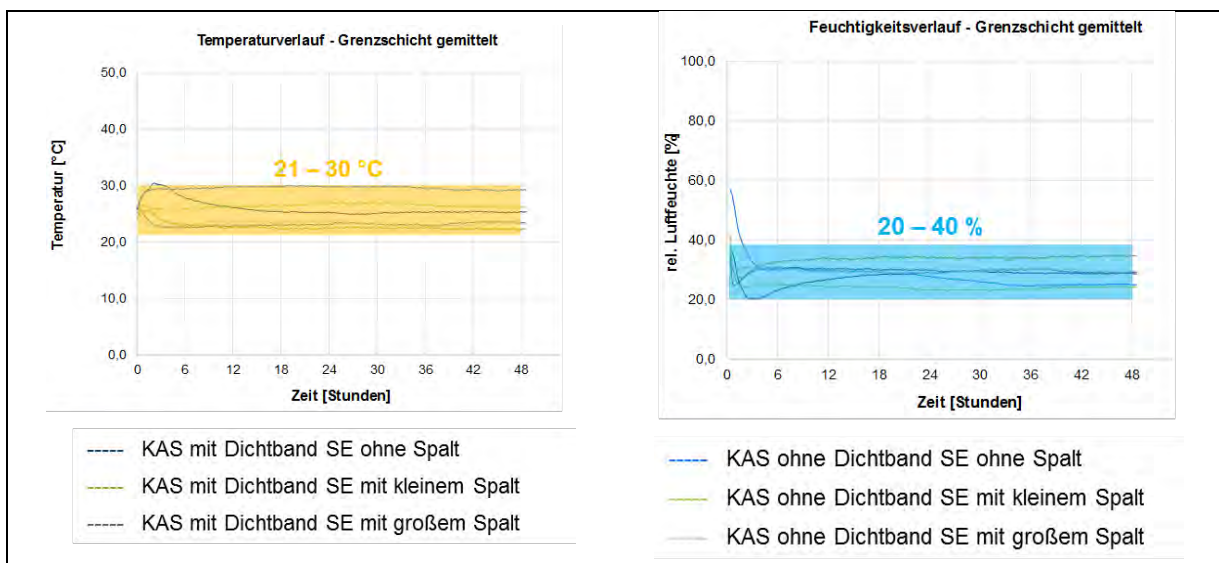


Abbildung 3-56: Ergebnisse Punkt „Grenze“ für Hybridelementversuche

Figure 3-56: Results point “edge” for hybrid element testing

An der Grenze zwischen Sandwich- und Kassettelement (Abbildung 3-56) treten Temperaturen auf, die nahezu konstant in dem Bereich zwischen 21 und 30 C liegen. Die relativen Luftfeuchten liegen an diesem Punkt für alle Varianten wiederum zwischen 20 und 40 %.

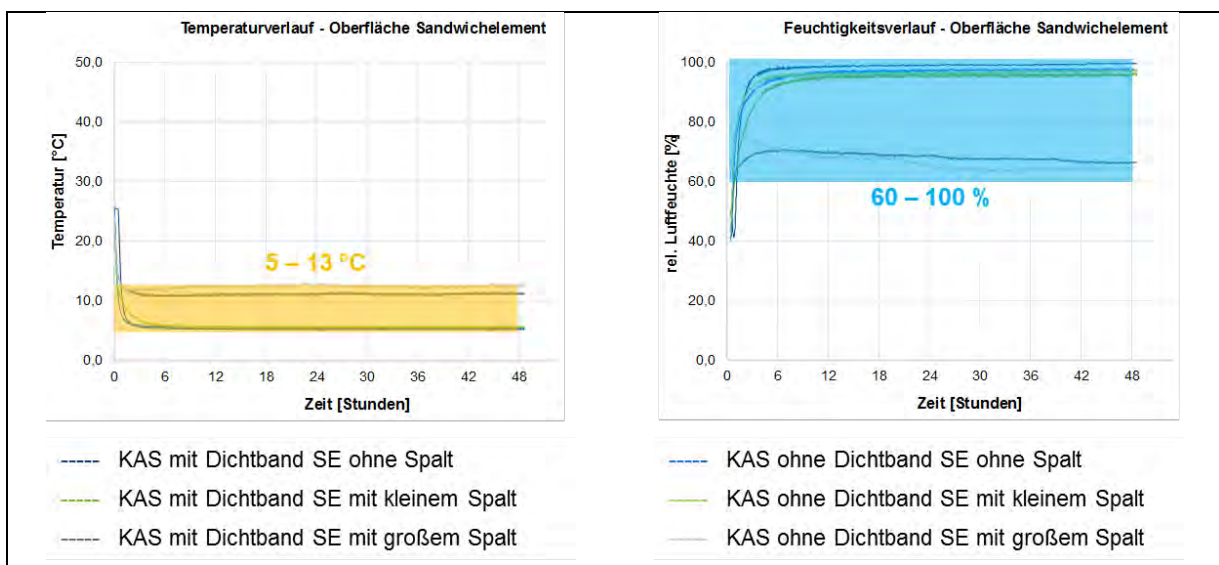


Abbildung 3-57: Ergebnisse Punkt „Sandwich“ für Hybridelementversuche

Figure 3-57: Results point “sandwich” for hybrid element testing

Signifikante Unterschiede zwischen den sechs Varianten treten dagegen am Messpunkt „Sandwich“ (Abbildung 3-57) auf. Die Temperaturen der beiden Varianten mit großer SE-Längsfuge liegen konstant bei etwa 12 bis 13 °C, wohingegen die übrigen Werte alle ca. 5 °C betragen. Entsprechend liegen die relativen Luftfeuchten der beiden abweichenden Varianten bei ca. 60 %, während die anderen Werte 95 bis 99 % betragen.

Höhere Oberflächentemperaturen, die im Bereich von Wärmebrücken an der kälteren Bauteiloberfläche auftreten, sind auf die entsprechenden zusätzlichen Wärmeverluste

zurückzuführen. Die Varianten mit großer Sandwichfuge stellen in diesem Zusammenhang die thermisch ungünstigsten Fälle da; das höhere Temperaturniveau lässt sich daher durch die Auswirkungen der Wärmebrücke „Kassettensteg“ in Verbindung mit der fehlenden Dämmwirkung der Sandwichfuge erklären. Bleibt die absolute Luftfeuchtigkeit gleich – wovon im Rahmen der Versuchsdurchführung ausgegangen werden kann – führen steigende Temperaturen und sinkenden relativen Luftfeuchten. Bei einer Temperatur von 5 °C und einer relativen Luftfeuchte von ca. 100 % liegt eine absolute Luftfeuchte von etwa 6,8 g/m³ vor; für 13 °C (Sättigungsfeuchte ca. 11,3 g/m³) entsprechen diese 6,8 g/m³ einer relativen Luftfeuchte von rund 60 %.

In Abbildung 3-58 ist der Vergleich zwischen der vorab durchgeführten Untersuchung nach DIN 4108-3 mit den im Versuch ermittelten Ergebnissen dargestellt. Die für die drei Messstellen bestimmten Werte sind als einzelne Punkte für die Sandwichvarianten „ohne Spalt“ und „mit kleinem Spalt“ in den Diagrammen eingetragen.

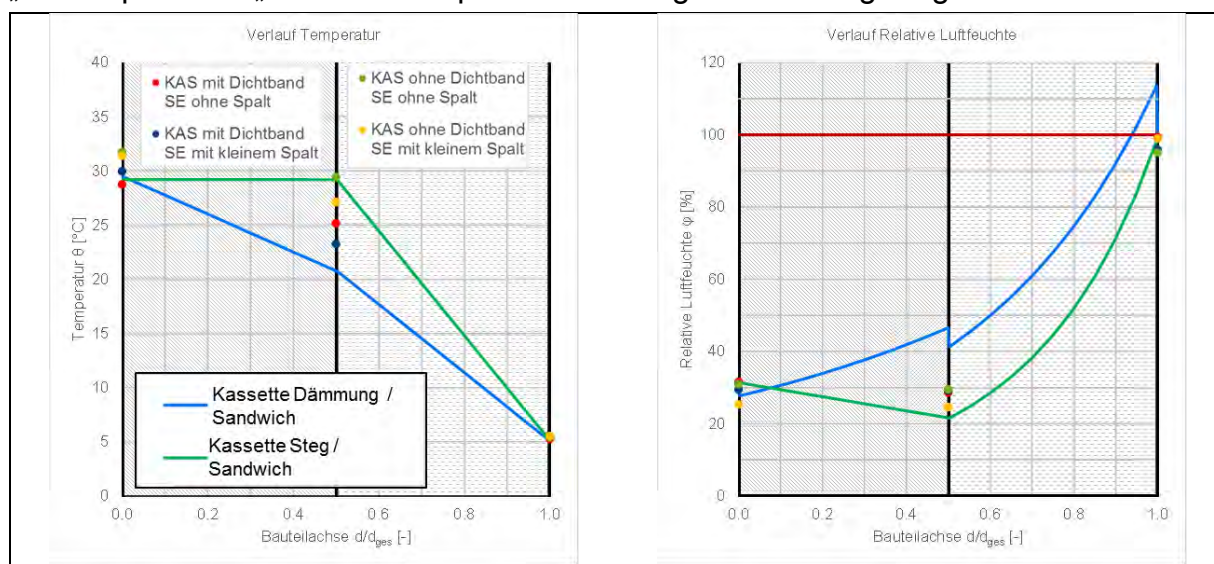


Abbildung 3-58: Vergleich Vorabuntersuchung und Versuch für Hybridelementversuche

Figure 3-58: Comparison of pre-investigations and test for hybrid element testing

Sowohl die Temperaturen als auch die relativen Luftfeuchten, die gemessen wurden, liegen alle im Bereich des vorab bestimmten Korridors. Da die Messwerte nur punktuell an der jeweiligen Stelle konkret ermittelt wurden, kann über den Verlauf zwischen den Punkten keine fundierte Aussage getroffen werden. Insbesondere da für die Stellen „Kassette“ und „Sandwich“ die Werte jeweils an der der Umgebung zugewandten Seite gemessen wurden, sind Aussagen für die entsprechend andere Seite der Stahlprofilbleche nur bedingt möglich. Zwar kann für die Temperaturen angenommen werden, dass diese durch das stark wärmeleitende Material Stahl nur unwesentlich beeinflusst werden, sodass auf beiden Seiten der Stahlprofilbleche nahezu identische thermische Bedingungen herrschen. Für die Wasserdampfpartialdrücke ist dieser Schluss allerdings nicht zulässig; vermutlich wird er durch die dampfdichten Stahlprofilbleche stark reduziert, wobei aber das Ausmaß der Verminderung nicht bekannt ist.

Um in dieser Hinsicht eine Aussage treffen zu können, wurde der Versuch im Anschluss mit Hilfe des Verfahrens nach DIN EN 15026 ebenfalls untersucht. Das verwendete Modell ist in Abbildung 3-59 zu finden.

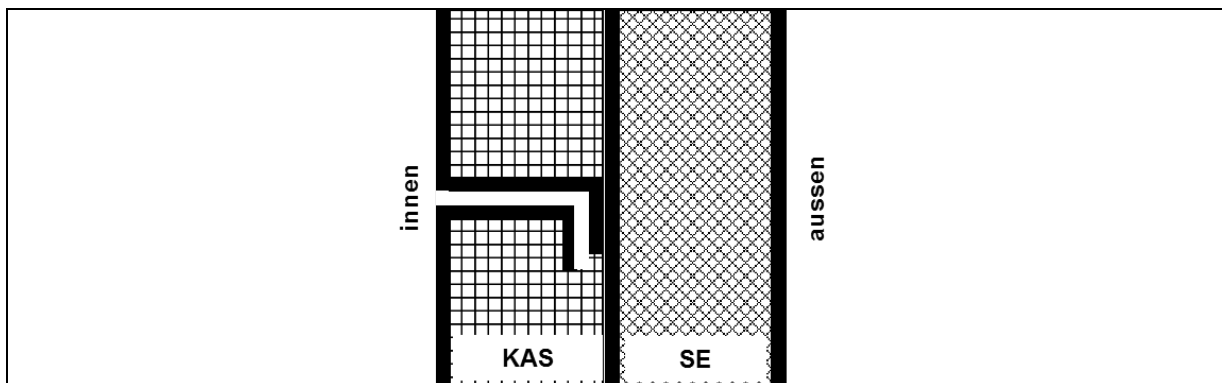


Abbildung 3-59: Modell für numerische Untersuchung der Hybridelementversuche

Figure 3-59: Model for numerical investigation of hybrid element testing

Die Ergebnisse der Berechnungen sind wiederum als minimale und maximale im Querschnitt in einem Simulationszeitraum von 48 Stunden auftretenden Werte in Abbildung 3-60 für die Temperatur und die relative Luftfeuchte sowie zusätzlich für den Wassergehalt dargestellt. Zur Verdeutlichung sind die beiden Querschnittsbereiche „Kassette“ und „Sandwich“ farblich gekennzeichnet.

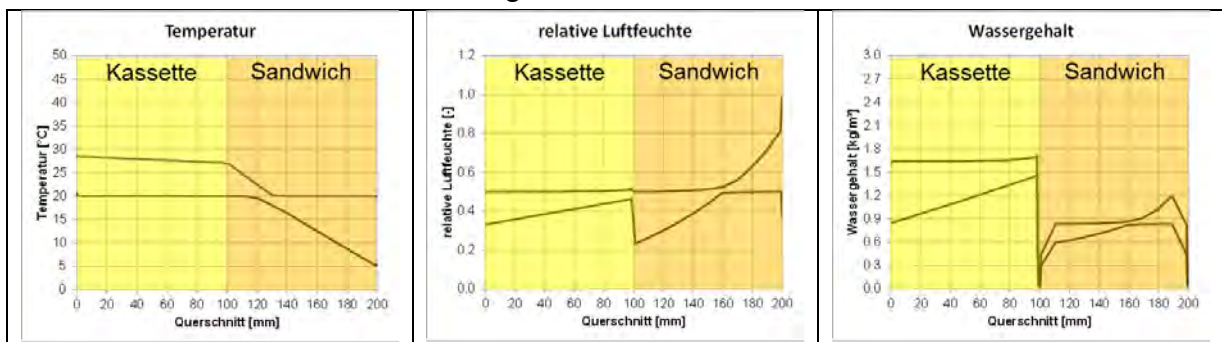


Abbildung 3-60: Ergebnisse 1 der numerischen Untersuchung der Hybridelementversuche

Figure 3-60: Results 1 of numerical investigation of hybrid element testing

Wählt man für einen Vergleich zwischen den nach DIN 4108-3 in der Vorabuntersuchung bestimmten Verläufen und den numerisch nach DIN EN 15026 ermittelten Ergebnissen das Ende des Simulationszeitraums (nach 48 Stunden) aus, ergeben sich die in Abbildung 3-61 visualisierten Diagramme. Die numerischen Werte sind in schwarz eingezeichnet.

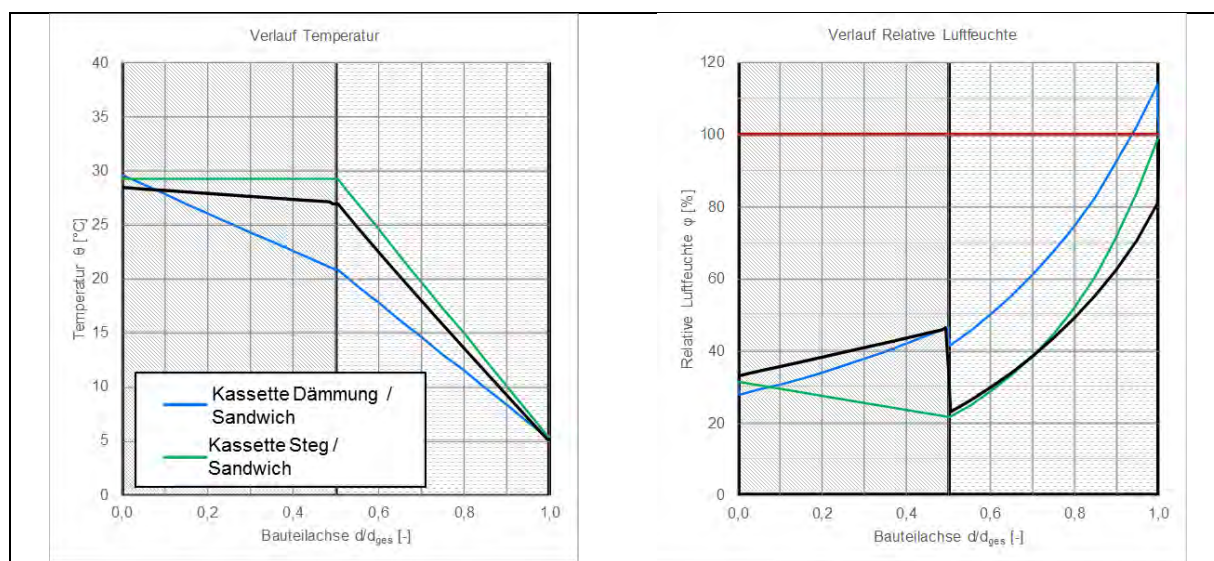


Abbildung 3-61: Vergleich Vorabuntersuchung und numerischer Untersuchung für Hybridelementversuche

Figure 3-61: Comparison of pre-investigations and numerical investigation for hybrid element testing

Es ist zu erkennen, dass der Temperaturverlauf eine gute Übereinstimmung aufweist. Abweichungen lassen sich auf die auftretenden mehrdimensionalen Wärmebrückeneffekte zurückführen, die bei den numerischen Berechnungen Berücksichtigung finden können. Der Verlauf der relativen Luftfeuchte kann im Wesentlichen ebenfalls in guter Näherung mit beiden Verfahren abgebildet werden. Neben den mehrdimensionalen thermischen und hygrischen Effekten ist auch zu beachten, dass die Ergebnisse der Vorabuntersuchung keine zeitliche Abhängigkeit vorweisen, wohingegen bei der Numerik der konkrete Betrachtungszeitpunkt von Bedeutung ist. Er nach ausreichender Simulationszeit stellt sich ein stabiler, mit den Umgebungsbedingungen im Gleichgewicht stehender Zustand ein. Die auftretenden Abweichungen weisen darauf hin, dass dieser Zustand nach 48 Stunden noch nicht endgültig erreicht ist.

Um diese These zu Verdeutlichung, wurde die numerische Untersuchung für die drei entsprechenden Messstellen hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt ausgewertet. Abbildung 3-62 zeigt die drei hygrothermischen Größen als Funktion der Simulationszeit.

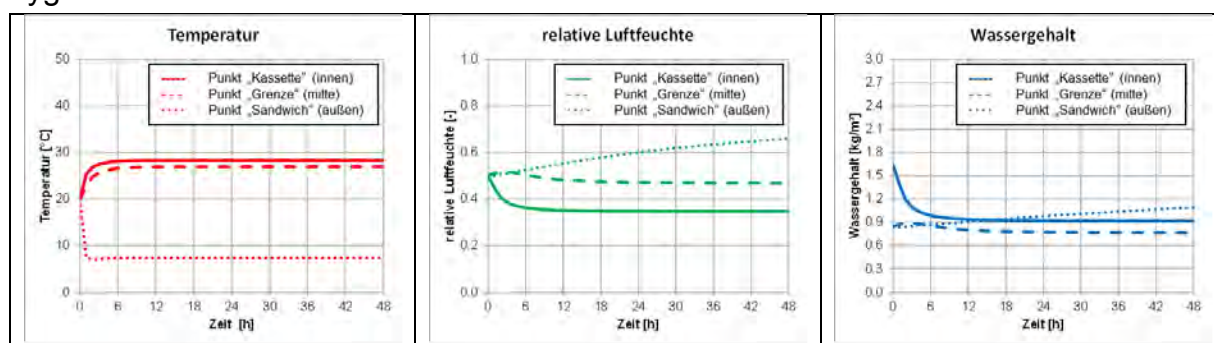


Abbildung 3-62: Ergebnisse 2 der numerischen Untersuchung der Hybridelementversuche

Figure 3-62: Results 2 of numerical investigation of hybrid element testing

Die Diagramme verdeutlichen, dass die Temperatur bereits nach etwa drei Stunden einen Gleichgewichtszustand mit der Umgebung erreicht hat. Beim Verlauf der relativen Luftfeuchte ist festzustellen, dass an dem Messpunkt „Sandwich“ auch nach 48 Stunden noch kein stabiler Endzustand vorliegt. Entsprechendes gilt für den Wassergehalt, der mit der relativen Luftfeuchte verknüpft ist.

Durch die Kombination der Versuchsergebnisse, die in Abbildung 3-55, Abbildung 3-56 und Abbildung 3-57 zu finden sind, mit den numerischen Ergebnissen nach Abbildung 3-62, ist der Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Untersuchung möglich. In Abbildung 3-63, Abbildung 3-64 und Abbildung 3-65 sind diese Gegenüberstellungen visualisiert.

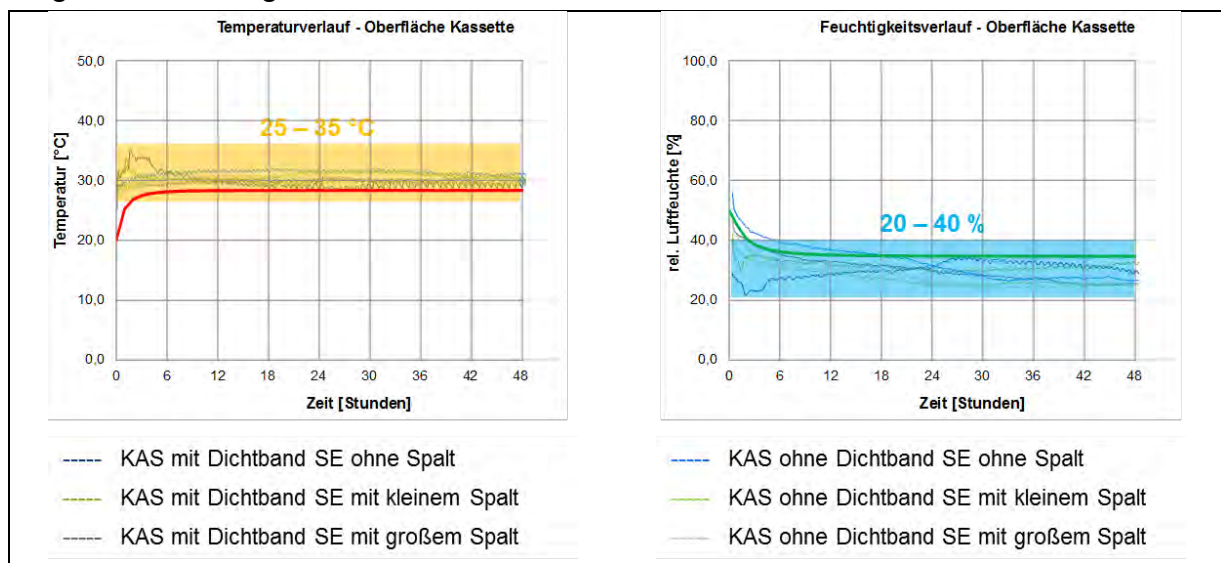


Abbildung 3-63: Vergleich Versuch und numerischer Untersuchung Punkt „Kassette“ für Hybridelementversuche

Figure 3-63: Comparison test and numerical investigation point “liner tray“ for hybrid element testing

Am Punkt „Kassette“ liegt abgesehen von einer unvermeidlichen messtechnisch bedingten Schwankung der Werte eine gute Übereinstimmung zwischen Numerik und Versuch vor. Abbildung 3-63 zeigt sowohl für Temperatur, als auch für relative Luftfeuchte, nur geringe Unterschiede.

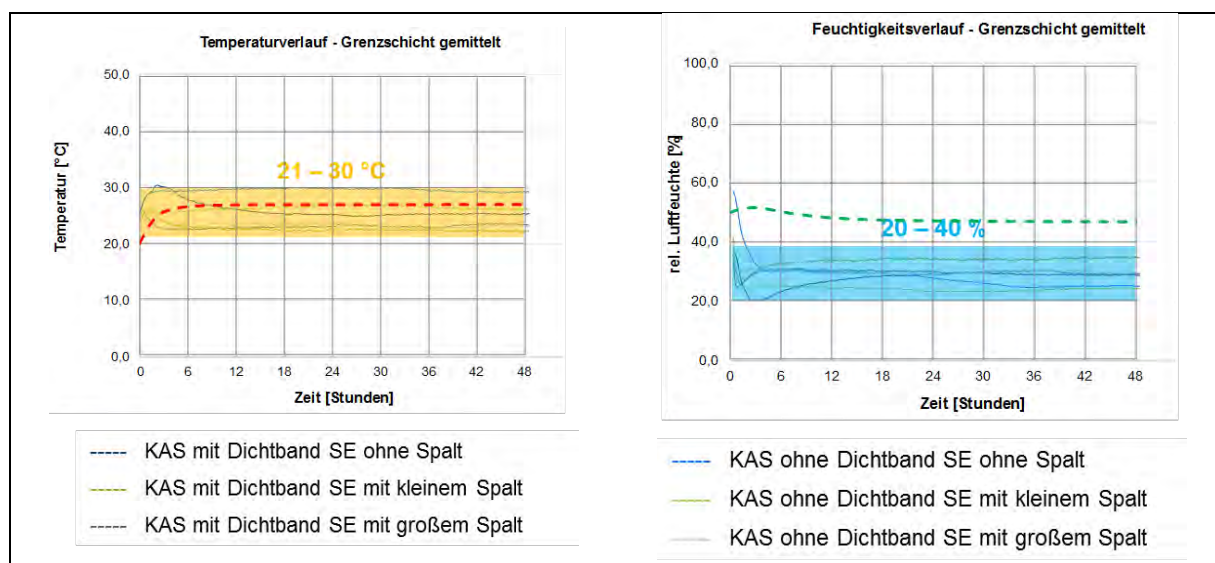


Abbildung 3-64: Vergleich Versuch und numerischer Untersuchung Punkt „Grenze“ für Hybridelementversuche

Figure 3-64: Comparison test and numerical investigation point “edge” for hybrid element testing

Der Temperaturverlauf an der Messstelle „Grenze“ zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Allerdings kommt es für die relative Luftfeuchte zu Abweichungen zwischen den Versuchsergebnissen und der numerisch bestimmten Ergebnissen.

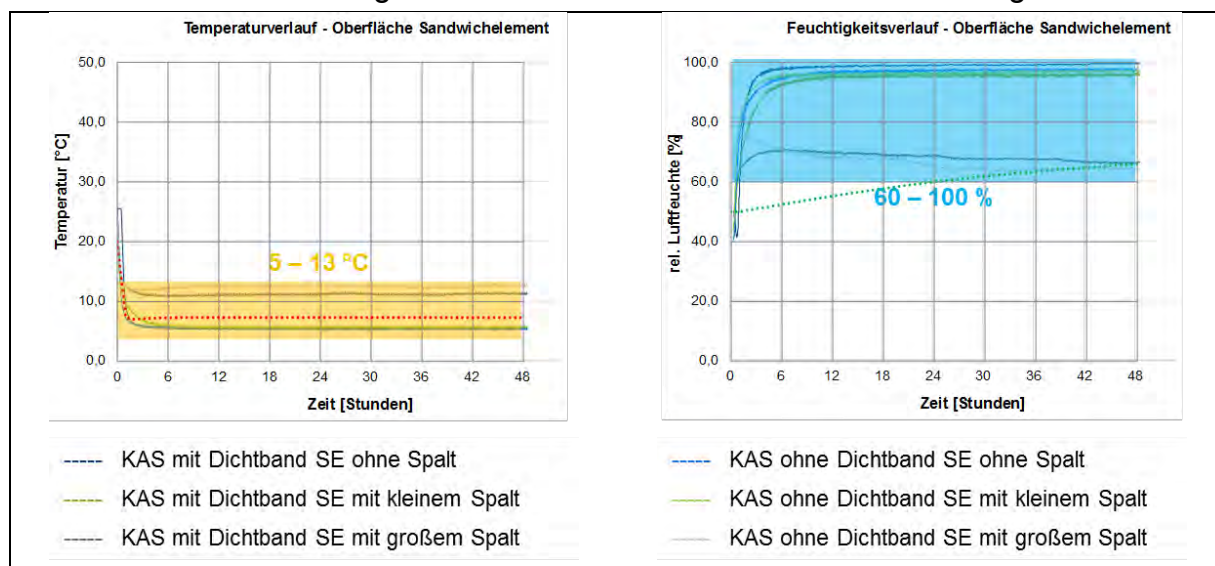


Abbildung 3-65: Vergleich Versuch und numerischer Untersuchung Punkt „Sandwich“ für Hybridelementversuche

Figure 3-65: Comparison test and numerical investigation point “sandwich” for hybrid element testing

Für den Messpunkt „Sandwich“ ist wiederum bei der Temperatur von einer guten Übereinstimmung auszugehen. Wie bereits erwähnt, zeigt sich für die relative Luftfeuchte an dieser Stelle in der numerischen Untersuchung, dass im Betrachtungszeitraum kein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Daher treten auch entsprechende Abweichungen zwischen den Ergebnissen auf.

3.3.1.2 Sandwichelemente Sandwich panels

Für sanierungsbedürftige Sandwichelemente kann auf Grundlage der vorhergehenden Ausführungen ebenfalls bestimmt werden, wie groß die hygriisch erforderliche Dicke des Sanierungssandwiches in Abhängigkeit von der Bestandsandwichdicke seine muss. Dabei wird ebenfalls angenommen, dass die Längsfuge des Bestandssandwichs u.U. nicht wasserdampfdicht ist und Feuchtigkeit durch diese Fuge ggf. in den Bauteilquerschnitt eindiffundierten kann. Die für die Untersuchungen verwendeten Materialeigenschaften sind in Tabelle 3-19 zusammengefasst.

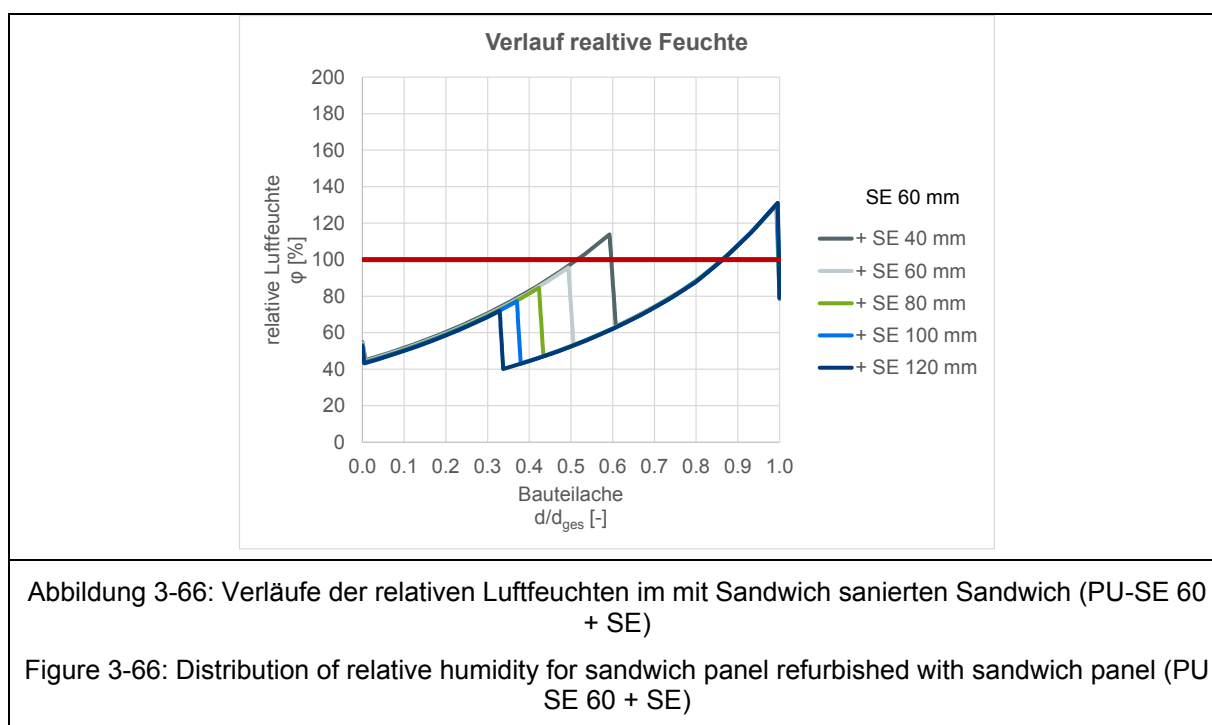
Tabelle 3-19: Hygrothermische Materialeigenschaften bei Sanierung von Sandwichwand mit Sandwichelement

Table 3-19: Hydrothermal material properties for refurbishment of sandwich wall panels with sandwich panels

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]
Stahl	50	100.000
Polyurethan	0,025	200
Mineralwolle	0,045	1

In Anlehnung an das Verfahren nach DIN 4108-3 wird ebenfalls wiederum der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Bauteilquerschnitt bestimmt. Dazu wurden für jede Bestandssandwichdicke jeweils die unterschiedlichen Sanierungssandwichelemente betrachtet.

In Abbildung 3-66 bis Abbildung 3-70 sind die ermittelten Verläufe für Bestandselement aus PU-Sandwich zu finden.



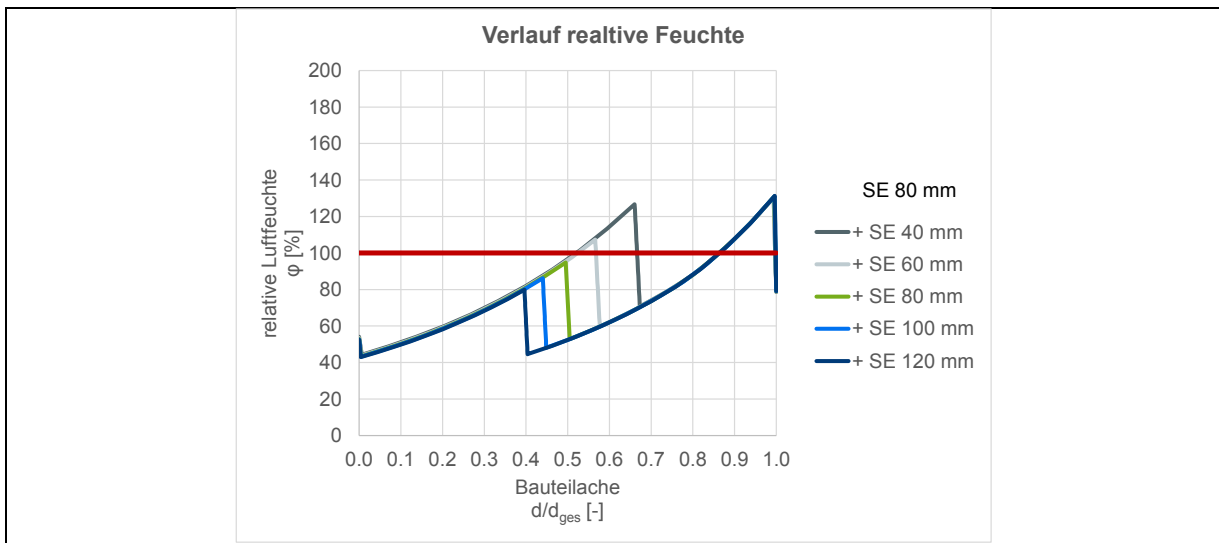


Abbildung 3-67: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (PU-SE 80 + SE)

Figure 3-67: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (PU SE 80 + SE)

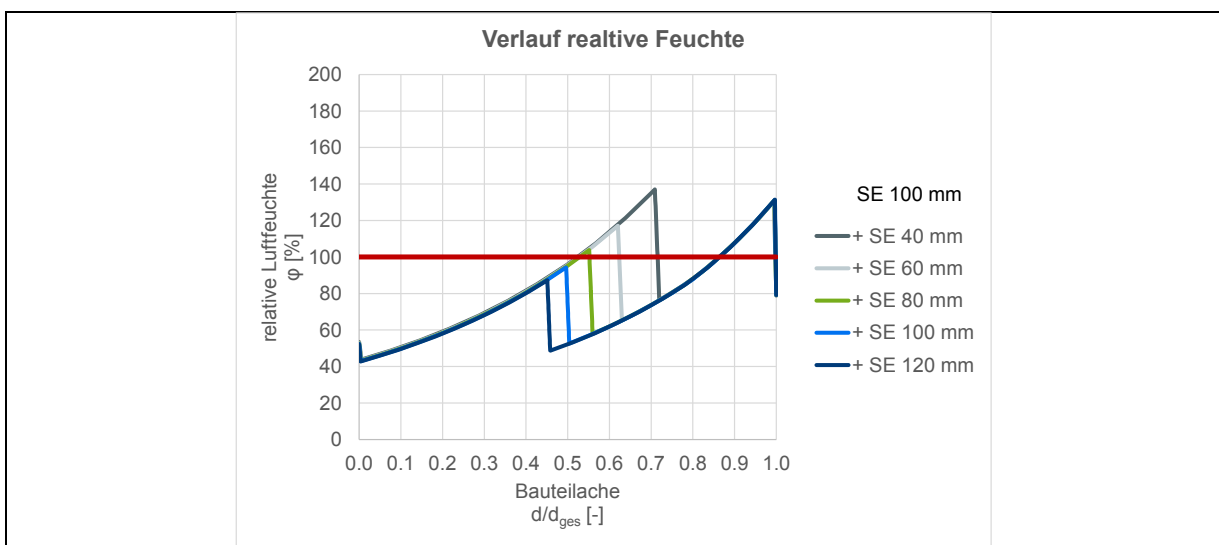


Abbildung 3-68: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (PU-SE 100 + SE)

Figure 3-68: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (PU SE 100 + SE)

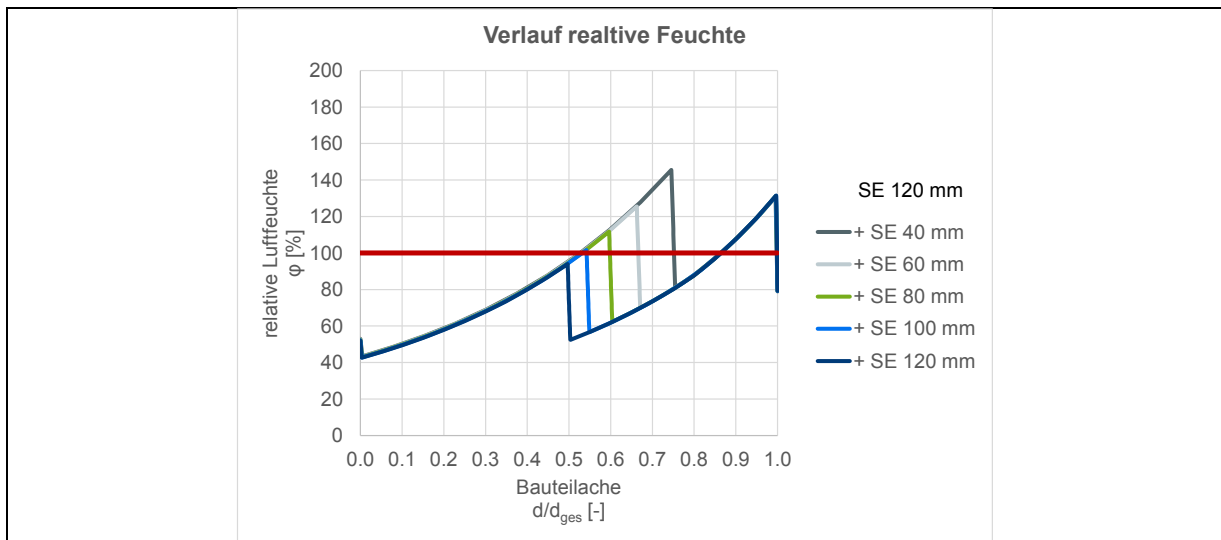


Abbildung 3-69: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (PU-SE 120 + SE)

Figure 3-69: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (PU SE 120 + SE)

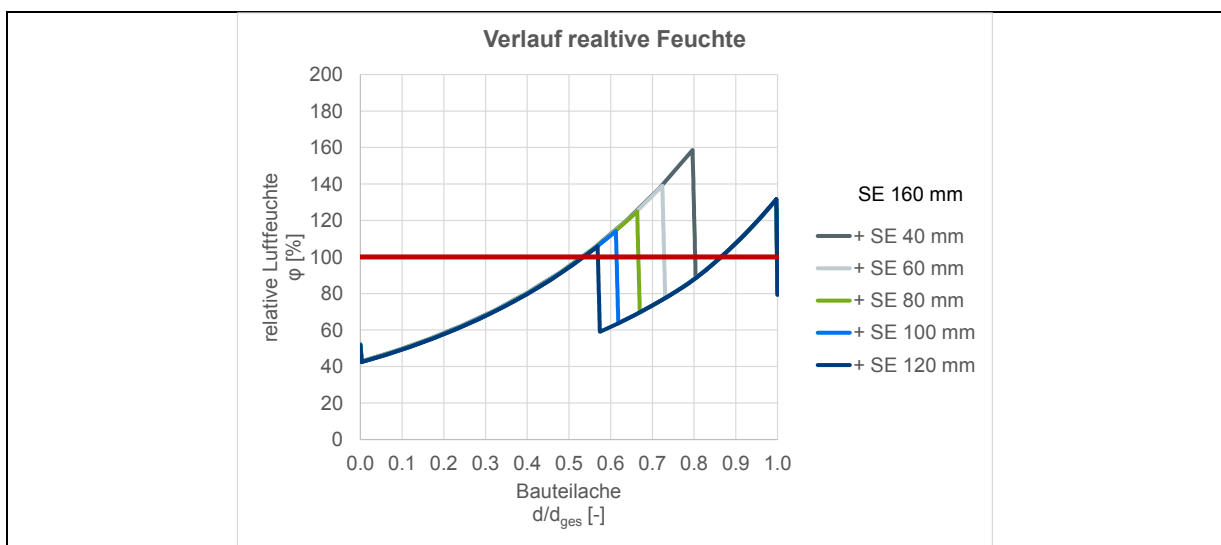


Abbildung 3-70: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (PU-SE 160 + SE)

Figure 3-70: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (PU SE 160 + SE)

Abbildung 3-71 bis Abbildung 3-75 zeigen die Verläufe der relativen Luftfeuchte für MW-Sandwiche als Bestandselement.

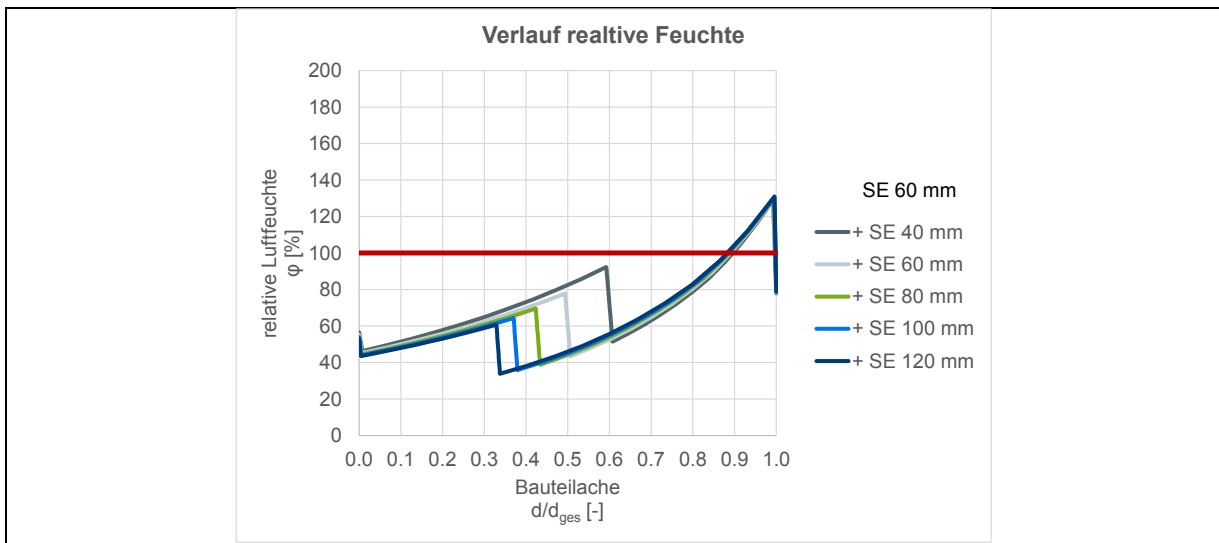


Abbildung 3-71: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (MW-SE 60 + SE)

Figure 3-71: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (MW SE 60 + SE)

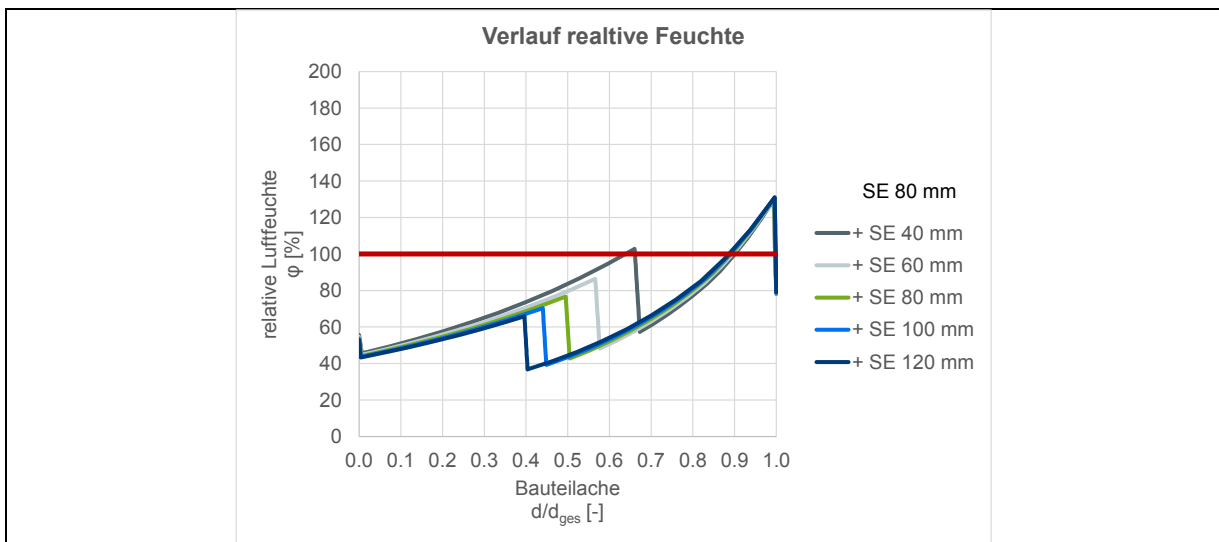


Abbildung 3-72: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (MW-SE 80 + SE)

Figure 3-72: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (MW SE 80 + SE)

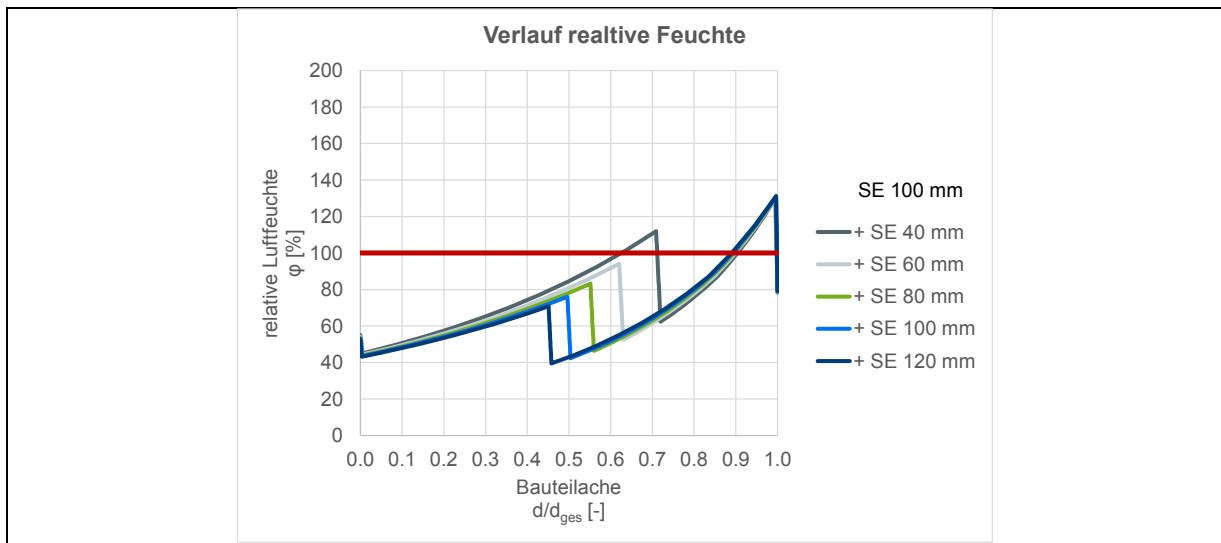


Abbildung 3-73: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (MW-SE 100 + SE)

Figure 3-73: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (MW SE 100 + SE)

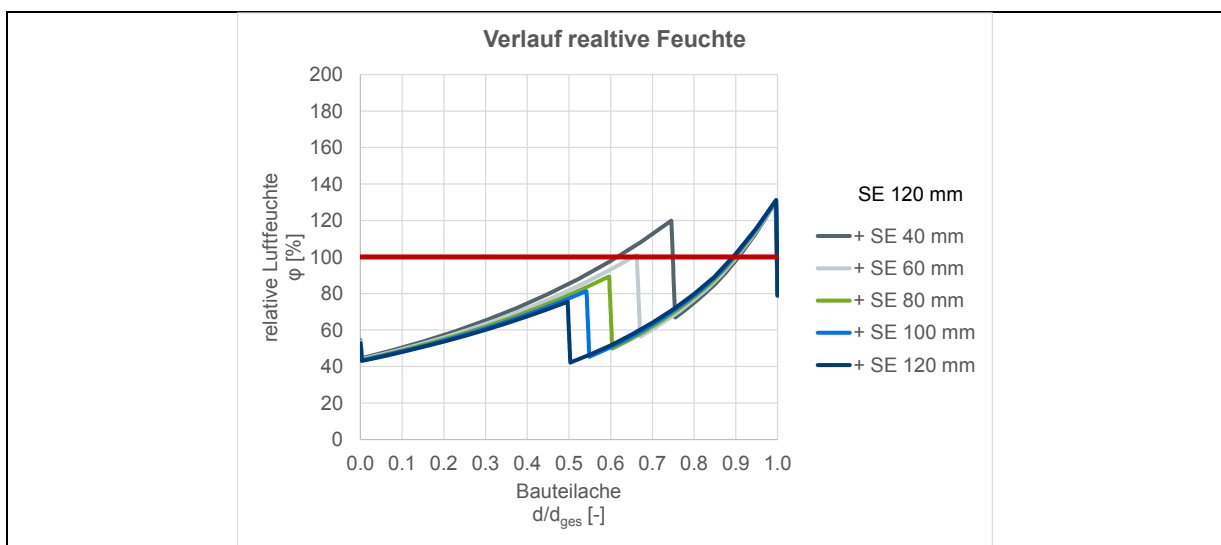
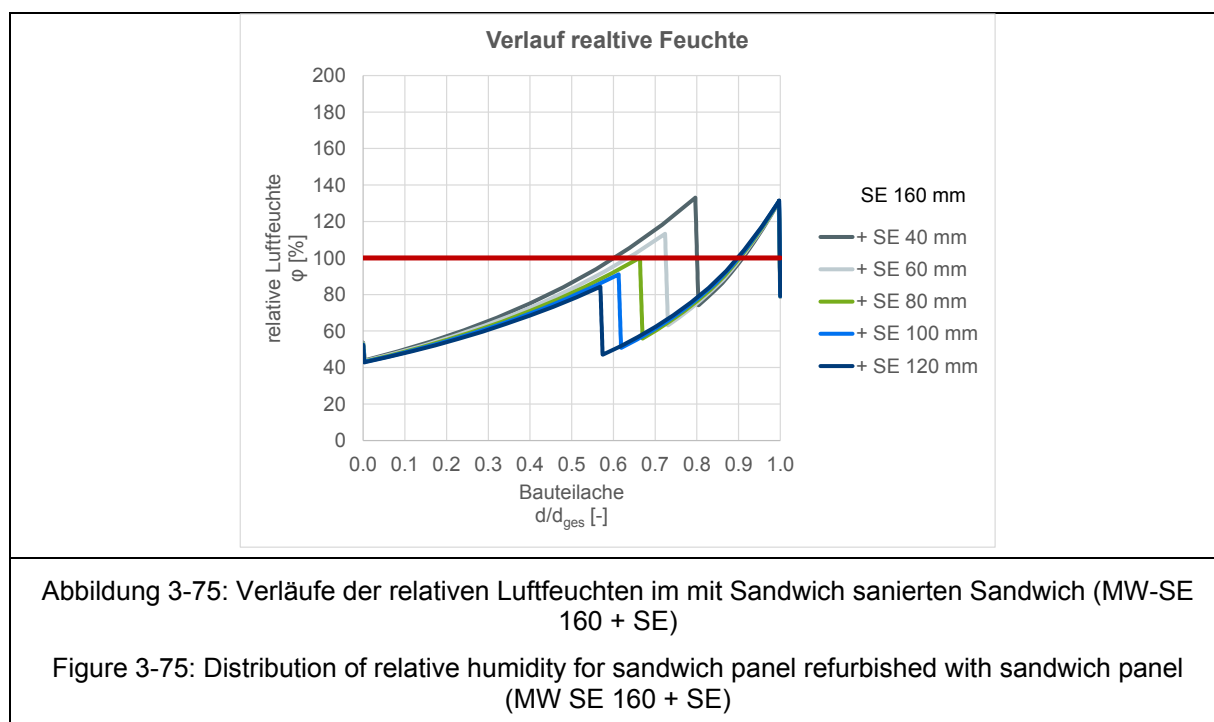


Abbildung 3-74: Verläufe der relativen Luftfeuchten im mit Sandwich sanierten Sandwich (MW-SE 120 + SE)

Figure 3-74: Distribution of relative humidity for sandwich panel refurbished with sandwich panel (MW SE 120 + SE)



Die anhand der Diagramme ermittelten minimal erforderlichen Dicken der Sanierungssandwichelemente sind in Tabelle 3-20 zusammengefasst. Dabei wird hinsichtlich des Dämmkerns des Bestandssandwichelementes zwischen Polyurethan und Mineralwolle unterschieden.

Tabelle 3-20: Hygrisch erforderliche Sandwichdicke bei mit Sandwich sanierten Sandwich

Table 3-20: Hygric required sandwich thickness für sandwich panel refurbished with sandwich panel

(Bestands)Sandwichdicke $d_{SE,Bes}$ [mm]	Hygrisch minimal erforderliche (Sanierungs)Sandwichdicke $d_{SE,San,min}$ [mm]	
	Bestand: PU Sandwich	Bestand: MW-Sandwich
60	60	40
80	80	60
100	100	60
120	120	80
160	> 120	80

3.3.2 Sanierung von massiven Fassadenkonstruktionen Refurbishment of massive façade constructions

3.3.2.1 Sanierung mit Sandwichelementen Refurbishment with sandwich panels

In Zusammenhang mit den Aussagen der vorhergehenden Abschnitte und dem beschriebenen Vorgehen, wurden für die Sanierung von massiven Fassadenkonstruktionen Untersuchung mit dem Schwerpunkt der Verwendung von Sandwichelementen durchgeführt.

Dazu wurde für die drei bereits vorgestellten Ausgangsvarianten – Beton-, Porenbeton- und Mauerwerkswand – das hygrische Verhalten bei Sanierung mit Sandwichelementen unterschiedlicher Elementdicke von 60 bis 200 mm betrachtet. Als Dicke der massiven Bestandswände wurden die in Abschnitt 3.2.2 aufgeführten minimalen und maximalen Werte gewählt: für Beton 100 und 240 mm, für Porenbeton 100 und 500 mm sowie für Mauerwerk 100 und 490 mm.

In Abbildung 3-76 und Abbildung 3-77 sind die Verläufe der Temperatur und der relativen Luftfeuchte dargestellt, die sich nach DIN 4108-3 in Betonwänden, die mit Sandwichwänden sanierte werden, einstellen. Für alle untersuchten Varianten wird der Grenzwert von 100 % relativer Luftfeuchte nur innerhalb des Sandwichquerschnitts überschritten. Da der Taupunkt somit in Bereichen liegt, in die im Regelbereich Feuchtigkeit in eindiffundierten kann, ist keine Tauwasserbildung zu erwarten.

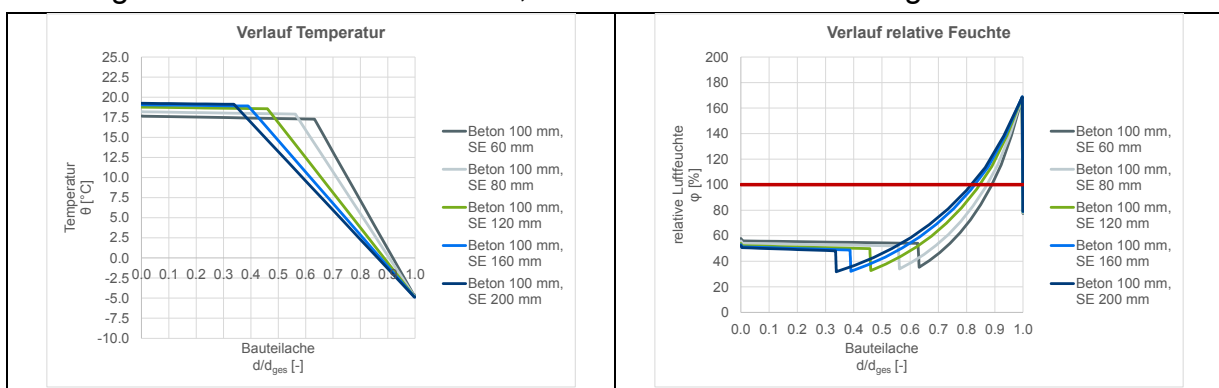


Abbildung 3-76: Verläufe von Temperatur und relative Luftfeuchte in der mit Sandwich sanierten 100-mm-Betonwand

Figure 3-76: Distributions of temperature and relative humidity for 100-mm-concrete wall refurbished with sandwich panels

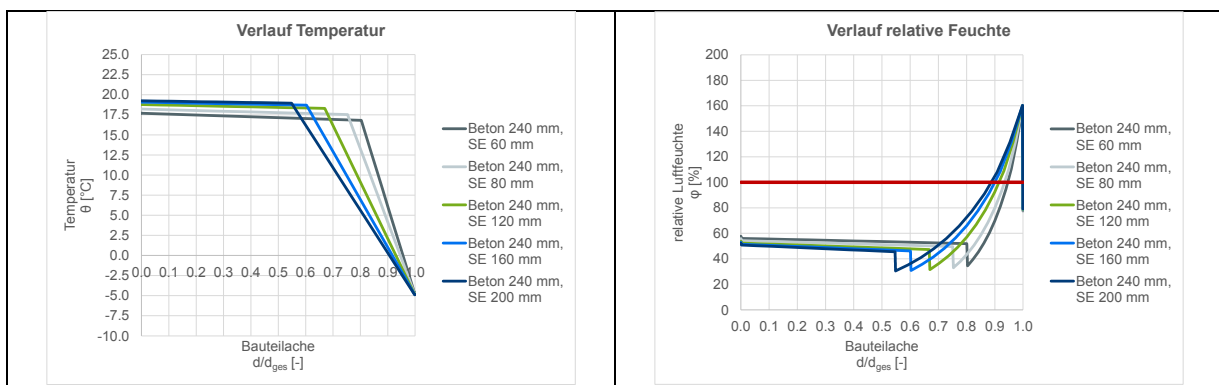


Abbildung 3-77: Verläufe von Temperatur und relative Luftfeuchte in der mit Sandwich sanierten 240-mm-Betonwand

Figure 3-77: Distributions of temperature and relative humidity for 240-mm-concrete wall refurbished with sandwich panels

Abbildung 3-78 und Abbildung 3-79 zeigen für Porenbetonwände, die mit Sandwichelementen sanierte wurden, den Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte, die nach DIN 4108-3 bestimmt wurden. Bei der minimalen Bestandswanddicke, die untersucht wurde (100 mm), kommt es rechnerisch nur im

Bereich des Sandwichquerschnittes zu Tauwasserbildung. Demgegenüber tritt nach DIN 4108-3 bei der maximal betrachteten Dicke (500 mm) bei der Verwendung von Sandwichelementen mit Dicken kleiner als 160 mm Kondensat auch im Bereich der Grenzschicht zwischen Porenbeton und Sandwich auf.

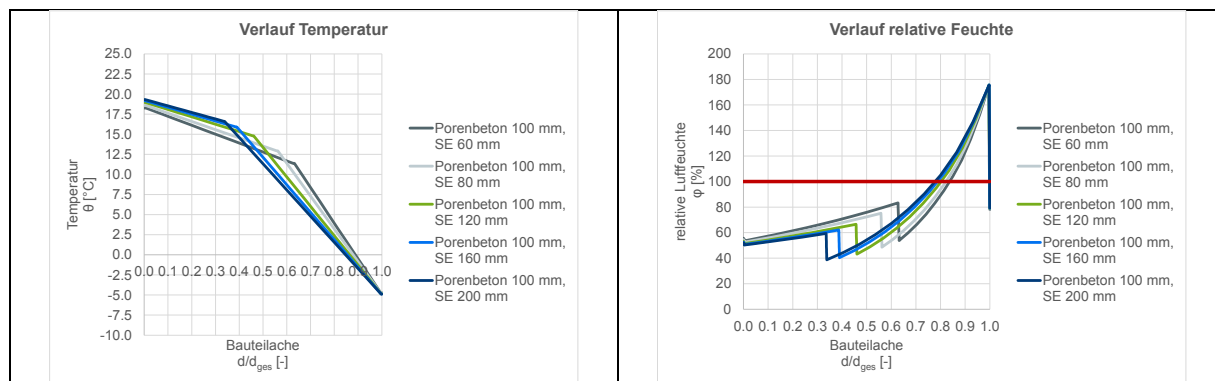


Abbildung 3-78: Verläufe von Temperatur und relative Luftfeuchte in der mit Sandwich sanierten 100-mm-Porenbetonwand

Figure 3-78: Distributions of temperature and relative humidity for 100-mm-gas concrete wall refurbished with sandwich panels

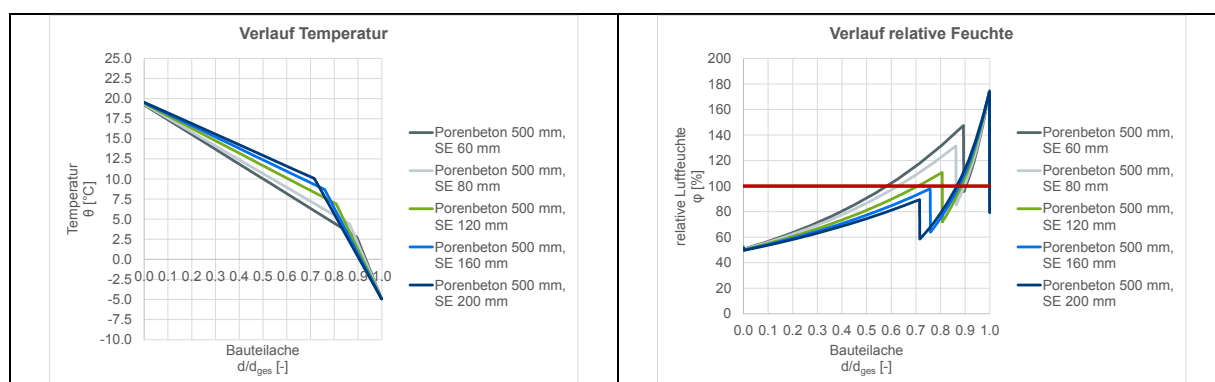


Abbildung 3-79: Verläufe von Temperatur und relative Luftfeuchte in der mit Sandwich sanierten 500-mm-Porenbetonwand

Figure 3-79: Distributions of temperature and relative humidity for 500-mm-gas concrete wall refurbished with sandwich panels

Für massive Bestandswände aus Mauerwerk sind die Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte, die sich nach der Sanierung mit Sandwichelementen gemäß DIN 4108-3 einstellen, in Abbildung 3-80 und Abbildung 3-81 dargestellt. Der Taupunkt wird für die konkret betrachteten Varianten nur im Sandwichbereich überschritten.

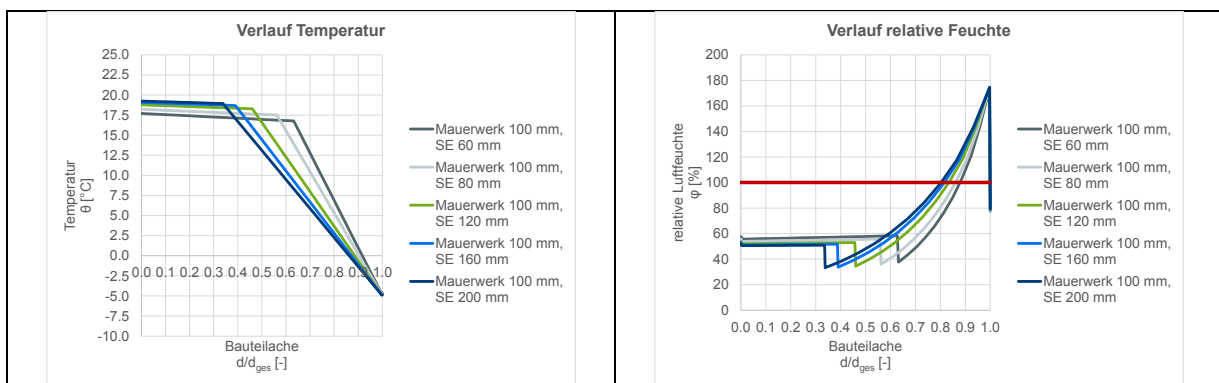


Abbildung 3-80: Verläufe von Temperatur und relative Luftfeuchte in der mit Sandwich sanierten 100-mm-Mauerwerkswand

Figure 3-80: Distributions of temperature and relative humidity for 100-mm-masonry wall refurbished with sandwich panels

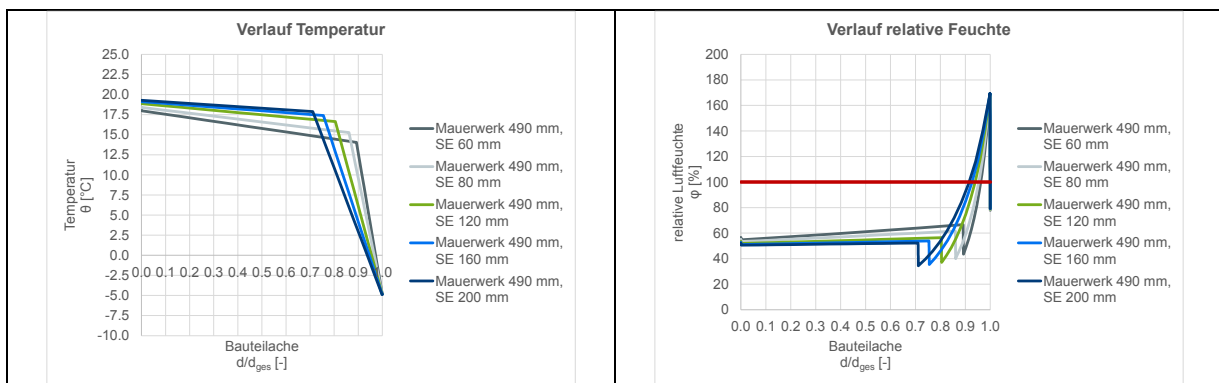


Abbildung 3-81: Verläufe von Temperatur und relative Luftfeuchte in der mit Sandwich sanierten 490-mm-Mauerwerkswand

Figure 3-81: Distributions of temperature and relative humidity for 490-mm-masonry wall refurbished with sandwich panels

3.3.2.2 Sanierung mit modularen Stahlkonstruktionen Refurbishment with build-up systems

Die hyrische Qualität, die sich durch die Sanierung von massiven Bestandswänden mit modularen Stahlleichtbaukonstruktionen ergibt, entspricht im Wesentlichen der der gedämmten Bestandswände nach Abschnitt 2.2.2.2, sofern die außenseitige Wandverkleidung für die Untersuchungen als hinerlüftet angesetzt wird.

Daher wird in diesem Zusammenhang auf die Berechnungsergebnisse, die in Abschnitt 2.2.2.2 zu finden sind, verwiesen.

3.4 Luftdichtheit Air tightness

Wie in Abschnitt 2.2.3 ausgeführt, ist eine luftdichte Konstruktion entsprechende Voraussetzung nicht nur für energetische effiziente, sondern auch für feuchteschutztechnisch unbedenkliche Gebäudehüllen.

Vor diesem Hintergrund wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Gebäude im Allgemeinen sowie Anschlussbereiche in der Gebäudehülle im Speziellen luftdicht auszuführen sind und daher einer besonders sorgfältigen Planung und Ausführung bedürfen. Weitere Hinweise dazu sind in den entsprechenden Normen zu finden.

3.5 Lastfall Temperatur bei Hybridelementen **Load case temperature for hybrid elements**

3.5.1 Allgemeines **Preface**

Wie in Abschnitt 0 erwähnt, kann der aus einer Temperaturdifferenz resultierende Lastfall bei statisch unbestimmten (Mehrfeldträger-) Systemen bemessungsmaßgebend werden. Dieser Lastfall stellt somit exemplarisch das Zusammenspiel zwischen bauphysikalisch-thermischem Bauteilverhalten einerseits und baustatischen Bemessungsmethoden andererseits dar.

Als Folge der unterschiedlichen Temperaturen an der inneren und äußeren Bauteiloberfläche kommt es zu Zwangsspannungen innerhalb des Bauteils. Für eine entsprechende Bemessung von Stahl-Sandwichelementen ist gemäß DIN EN 14509 bzw. der konkreten Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 55 \text{ K}$ anzusetzen. Diese ergibt sich aus den hinterlegten Temperaturrandbedingungen von raumseitig $\theta_i = 25 \text{ °C}$ und außenseitig infolge von Sonneneinstrahlungseffekten $\theta_e = 80 \text{ °C}$.

Bei dem singulären Bauteil Sandwichelement, das als Verbundquerschnitt trägt, muss der gesamte Temperaturgradient innerhalb des Sandwichquerschnitts abgebaut werden. Spannungserzeugend ist demnach die komplette Temperaturdifferenz $\Delta T = 55 \text{ K}$.

Für isoliert betrachtete Kassettenelement ergibt sich eine spannungserzeugende Temperaturdifferenz $\Delta T = 0 \text{ K}$, da hier ein Tragverhalten als Einzelquerschnitt vorliegt.

Das Zusammenfügen der beiden Einzelbauteile im Hybridelement legt nahe, dass auch das Tragverhalten eine Kombination aus Einzel- und Verbundquerschnitt ist. Die Temperaturdifferenz wird anteilig im Kassetten- und im Sandwichquerschnitt abgebaut. Daher reduziert sich auch der Anteil, der für den Sandwichquerschnitt als spannungserzeugend wirksam wird.

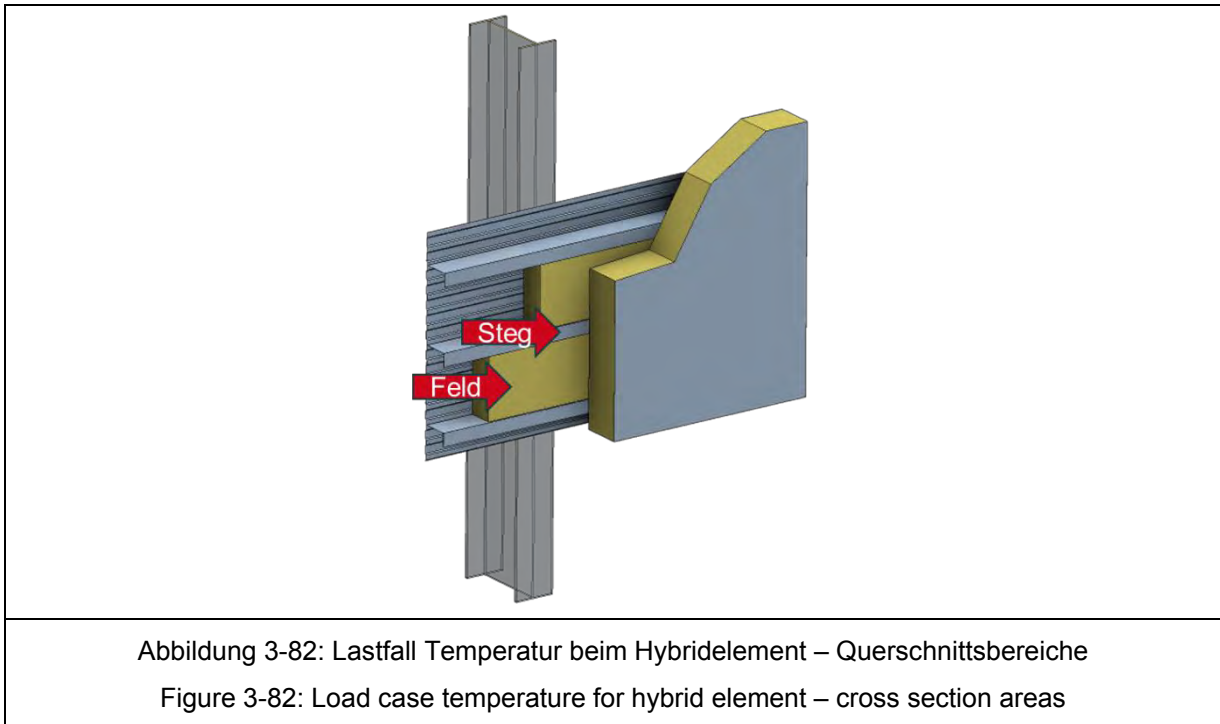
In diesem Zusammenhang wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt, die die vermuteten Effekte aufzeigen sollen.

3.5.2 Experimentelle Untersuchung **Experimental investigation**

Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine Hybridkonstruktion gewählt, die aus einer 100 mm Bestandskassettenfassade ($t_n = 0,75 \text{ mm}$) und einem 120 mm Sanierungssandwichelement (Fugentyp III) bestand. Die MW-Kassettenendämmung entsprach WLS 035, der PU-Sandwichdämmkern WLS 025. Die Bemessungswerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der beiden Bestandteile betragen


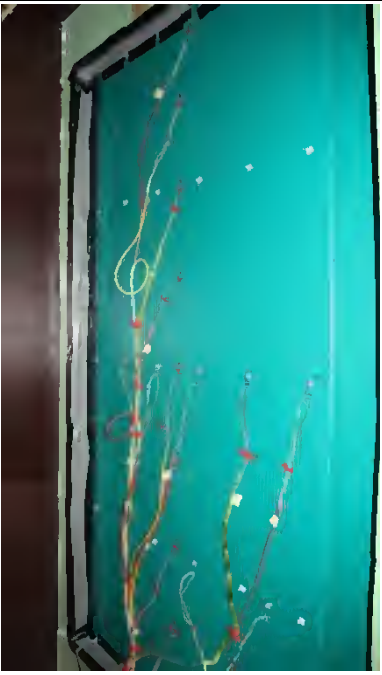
$U_{d,KAS} = 0,69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ bzw. $U_{d,SE} = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; nach Tabelle 3-1 ergibt sich nach der Sanierung ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_{d,HYB} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Im Hinblick auf das thermische Verhalten kann bei dem Hybridelement zwischen vier Querschnittsbereichen unterschieden werden. Beim Kassettenelement lassen sich die zwei Bereiche „Feld“ und „Steg“ identifizieren; für das Sandwichelement ist zwischen „Feld-“ und „Fugenbereich“ zu differenzieren. Daraus lassen sich vier verschiedenen Bereiche ableiten. Abbildung 3-82 zeigt exemplarisch die Bereiche.



Der Versuchsaufbau ist nachfolgend in Abbildung 3-83 und Abbildung 3-84 visualisiert. Gemessen wurden die Temperaturen jeweils an den Bauteiloberflächen und an der Grenzschicht zwischen den beiden Einzelbauteilen, jeweils für alle vier Bereiche. Die Randbedingungen wurden entsprechend der normativen Vorgaben auf der Warmseite zu $\theta = 80 \text{ °C}$ und auf der Kaltseite zu $\theta = 25 \text{ °C}$ gewählt.

Kassettenprofile	Kassettdämmung
	
<p>Abbildung 3-83: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – Versuchsaufbau (1) Figure 3-83: Load case temperature for hybrid element – test set-up (1)</p>	

Sandwichelemente	Messtechnik
	
<p>Abbildung 3-84: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – Versuchsaufbau (2) Figure 3-84: Load case temperature for hybrid element – test set-up (2)</p>	

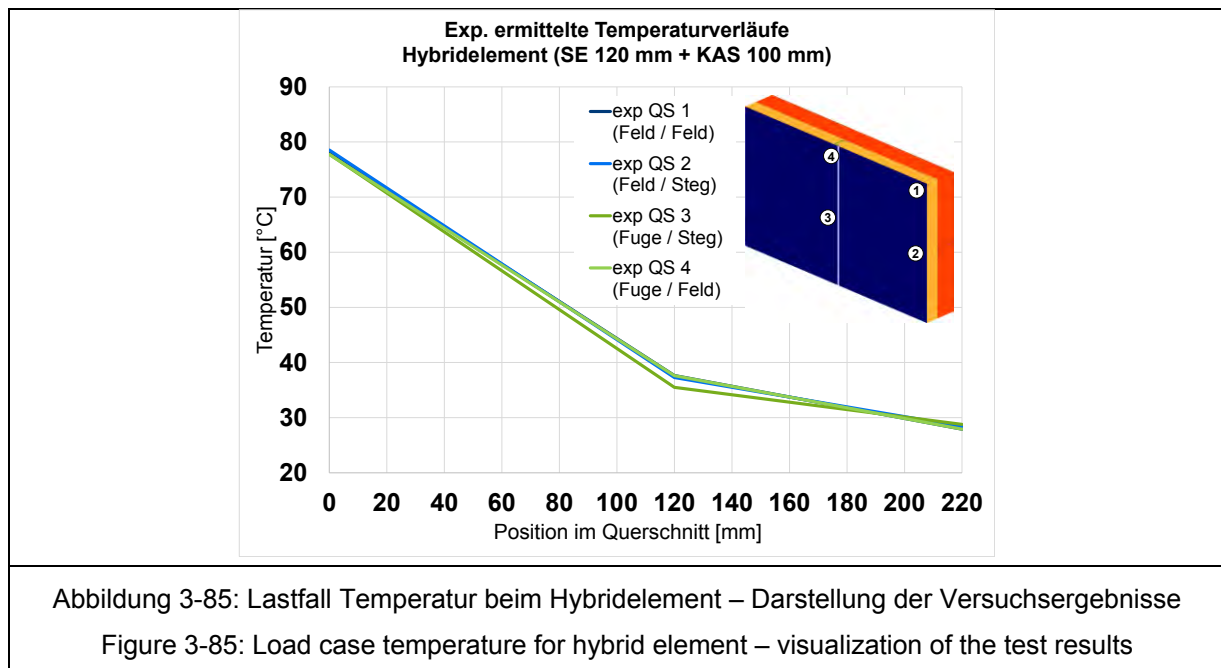
Die gemessenen Temperaturen sind in Tabelle 3-21 zusammengestellt. Der Einfluss der unterschiedlichen Bereiche ist nur sehr gering. Die Ursache hierfür liegt u.a. in der jeweils unmittelbar an die Messpunkte angrenzenden Stahlprofilbleche, die dazu

führen, dass die Wärme sich innerhalb einer Ebene entsprechend gleichmäßig verteilt. In Abbildung 3-85 sind die Zahlenwerte grafisch dargestellt. Dabei wurde vorausgesetzt, dass der Temperaturverlauf im Querschnittsprofil zwischen den Messpunkten linear ist.

Tabelle 3-21: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – Versuchsergebnisse

Table 3-21: Load case temperature for hybrid element –test results

Bereich	Temperatur θ [°C]				
	Warmseite	Sandwich		Kassette	Kaltseite
		Position im Querschnitt [mm]			
		0	120	220	
QS 1 (Feld / Feld)	80,0	78,0	37,6	27,9	25,0
QS 2 (Feld / Steg)	80,0	78,5	37,3	28,4	25,0
QS 3 (Fuge / Steg)	80,0	77,8	35,5	28,8	25,0
QS 4 (Fuge / Feld)	80,0	77,7	37,6	27,9	25,0
gemittelt	80,0	78,0	37,0	28,3	25,0



Im versuchstechnisch betrachteten Fall ergibt sich an der Grenzschicht zwischen Kassette und Sandwich im Mittel eine Temperatur von ca. 37 °C. Daraus kann ein Temperaturgradient von $\Delta T = 43$ K abgeleitet werden, der für den Sandwichquerschnitt

spannungserzeugend ist. Verglichen mit den ursprünglichen 55 K entspricht das einer Reduktion von 24 %.

3.5.3 Numerische Untersuchung Numerical investigation

Ausgehend von den experimentellen Versuchen wurden zusätzlich begleitende numerische Untersuchungen mittels FEM-Berechnungen durchgeführt.

Dazu wurde zunächst der konkrete Versuch entsprechend abgebildet; als Ergebnis wurde der Temperaturverlauf innerhalb des gesamten Hybridquerschnitts bestimmt. In Tabelle 3-22 sind die auf dieser Grundlage bereits gemittelten Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 3-22: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – numerische Ergebnisse

Table 3-22: Load case temperature for hybrid element – numeric results

		Temperatur θ [°C]			
Bereich	Warmseite	Sandwich		Kassette	Kaltseite
		Position im Querschnitt [mm]			
		0	120	220	
gemittelt	80,0	78,9	37,0	25,4	25,0

Abbildung 3-86 zeigt eine Darstellung des ermittelten Temperaturverlaufs, bereits im direkten Vergleich mit den gemessenen Werten.

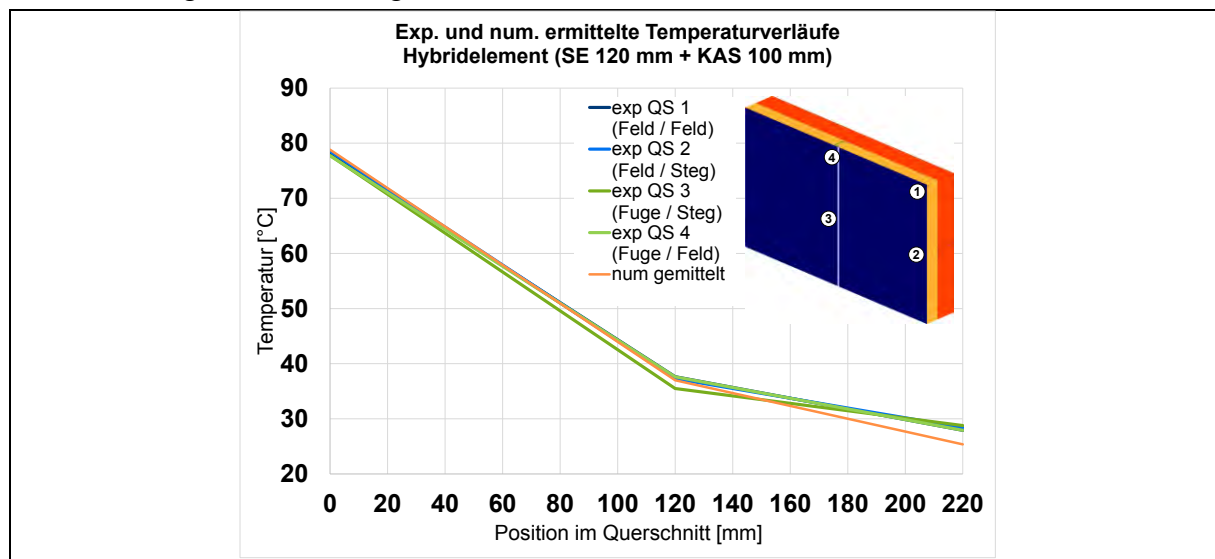


Abbildung 3-86: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – Darstellung der Ergebnisse

Figure 3-86: Load case temperature for hybrid element – visualization of the results

Es ist zu erkennen, dass die experimentell bestimmten und die numerisch ermittelten Werte sehr gut übereinstimmen. Lediglich im Bereich der Oberfläche an der Kaltseite treten einige Abweichungen auf, die sich auf unterschiedlichen Wärmeübergangswiderstände zurückführen lassen. Für die numerische Berechnung

wurden die Werte unter Verweis auf DIN EN ISO 6496 zu 0,13 und 0,04 m²·K/W gewählt. Inwieweit die im Versuch sich einstellenden Größen mit den angesetzten übereinstimmen, ist nicht abschließend zu beurteilen.

Auf Grundlage des Vergleichs zwischen numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden weitere numerische Berechnungen durchgeführt. Dabei sollten die jeweiligen spannungserzeugenden Temperaturdifferenzen, die für die Bemessung des Sandwichelementes anzusetzen sind, bestimmt werden.

Die Dicke des raumseitig – d.h. in diesem Fall auf der kälteren Seite – angeordneten Kassettenelementes wurde zwischen 90 und 240 mm variiert. Für die dementsprechend auf der Außenseite – Warmseite – liegenden Sandwichelemente wurden Dicken von 40 bis 200 mm betrachtet. Unter Verwendung der Randbedingungen von $\theta = 80\text{ °C}$ (Warmseite) und $\theta = 25\text{ °C}$ (Kaltseite) ließen sich die in Tabelle 3-23 aufgeführten Grenzschnitttemperaturen ermitteln.

Tabelle 3-23: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – weitere numerische Ergebnisse (1)

Table 3-23: Load case temperature for hybrid element – further numeric results (1)

		Temperatur zwischen Kassette und Sandwich $\theta_{\text{KAS-SE}} [\text{°C}]$						
		Dicke des Sandwichelement (Warmseite) $d_{\text{SE}} [\text{mm}]$						
		40	60	80	100	120	160	200
Dicke des Kassettenelements (Kaltseite) $d_{\text{KAS}} [\text{mm}]$	90	52	46	42	39	37	35	33
	100	53	46	42	40	37	35	33
	120	54	48	44	41	39	36	34
	130	55	48	44	41	39	36	35
	145	56	49	45	42	40	37	35
	160	57	50	46	43	41	38	36
	160	58	51	47	44	42	38	36
	180	58	52	48	45	42	39	37
	200	59	53	48	45	43	40	37
	220	60	54	49	46	44	40	38
240	52	46	42	39	37	35	33	

Daraus können in Verbindung mit den Temperaturrandbedingungen die im Sandwich auftretenden Temperaturdifferenzen bestimmt werden (siehe Tabelle 3-24).

Tabelle 3-24: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – weitere numerische Ergebnisse (2)

Table 3-24: Load case temperature for hybrid element – further numeric results (2)

		Temperaturdifferenz im Sandwichelement ΔT_{SE} [K]						
		Dicke des Sandwichelement (Warmseite) d_{SE} [mm]						
		40	60	80	100	120	160	200
Dicke des Kassettenelements (Kaltseite) d_{KAS} [mm]	90	28	34	38	41	43	45	47
	100	27	34	38	40	43	45	47
	120	26	32	36	39	41	44	46
	130	25	32	36	39	41	44	45
	145	24	31	35	38	40	43	45
	160	23	30	34	37	39	42	44
	160	22	29	33	36	38	42	44
	180	22	28	32	35	38	41	43
	200	21	27	32	35	37	40	43
	220	20	26	31	34	36	40	42
	240	28	34	38	41	43	45	47

In Abbildung 3-87 ist eine Diagrammdarstellung der Ergebnisse der numerischen Betrachtungen zu finden. Neben den konkret bestimmten Temperaturdifferenzen ist auch die konstante 55-K-Grenzgerade als Bezugswert eingetragen.

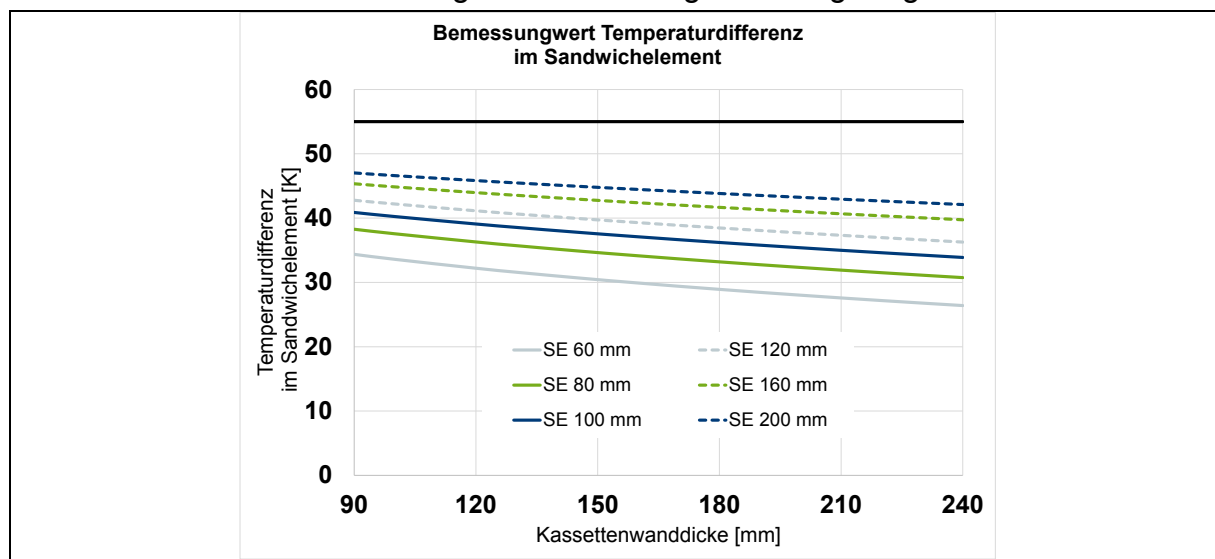


Abbildung 3-87: Lastfall Temperatur beim Hybridelement – Darstellung der numerischen Ergebnisse

Figure 3-87: Load case temperature for hybrid element – visualization of the numeric results

Anhand der Berechnungen können Temperaturgradienten zwischen 26 und 47 K ermittelt werden, die im Sandwichelement auftreten. Bezogen auf den ursprünglichen Gradienten von 55 K entspricht das einer Reduktion von 15 bis 53 %.

3.6 Praktische Energieeinsparpotential auf Gebäudeebene Practical energy saving potentials on building level

3.6.1 Allgemeines Preface

Um die in den vorhergehenden Abschnitten auf Bauteilebene durchgeführten Berachtungen in einem Gesamtgebäudekontext bewerten zu können, wurde für die im Mittelpunkt des Forschungsprojektes stehenden Hybridelemente aus Kassette und Sandwich der Einfluss der Sanierungsmaßnahme anhand der Ermittlung des spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizienten vor und nach der Sanierung für eine Vielzahl sogenannter „Musterhallen“ mit verschiedenen Abmessungen aufgezeigt.

3.6.2 Definition der Musterhallenvarianten Definition of sample hall variations

Dazu wurden für eine parametrisierte Industrie- bzw. Gewerbehalle Bandbreiten für die Gebäudeabmessungen definiert. Abbildung 3-88 zeigt eine Skizze der Musterhalle.

In den beiden Giebelseiten der Halle befinden sich jeweils eine Tür und ein Tor, in beiden Traufseiten je ein Fensterband. Das Hallendach ist flach geneigt und besitzt ein Lichtband.



3.6.2.1 Geometrische Parameter Geometric parameter

Die Bandbreiten der Abmessungen sind in Tabelle 3-25 zusammengestellt. Auf dieser Grundlage ergeben sich rund 10.000 unterschiedliche Hallenvarianten vor und nach der Sanierung.

Tabelle 3-25: Bandbreite der Abmessungen der Musterhallen

Table 3-25: Scope of dimensions of the sample halls

	Minimale Abmessung	Maximale Abmessung	Schrittweite
Breite B [m]	10	50	2
Länge L [m]	20	100	4
Höhe H [m]	5	25	1

Die parametrischen Bauteilflächen, die für die Berechnungen angesetzt wurden, sind in Tabelle 3-26 zu finden.

Tabelle 3-26: Parametrische Hüllflächen der Musterhalle

Table 3-26: Parametric envelope areas of the sample halls

Bauteil	Fläche A [m ²]
Lichtband	$A_{LB} = 2 \cdot (L - 10)$
Fenster	$A_F = 2 \cdot (1 \cdot (L - 10))$
Tür	$A_{TÜR} = 2 \cdot (1 \cdot 2)$
Tor	$A_{TOR} = 2 \cdot (4 \cdot 4)$
Dach	$A_D = (B \cdot L) - A_{LB}$
Bodenplatte	$A_{BP} = B \cdot L$
Außenwand	$A_{AW} = (2 \cdot (H \cdot (B + L))) - A_F - A_{TÜR} - A_{TOR}$

Als Kennwert, der im weiteren Verlauf verwendet wurde und ein Maß für die „Kompaktheit“ des Gebäudes ist, wurde das Verhältnis von Fläche zu Volumen – A/V [1/m] – herangezogen. Für die definierten Varianten liegt dieses Verhältnis zwischen 0,14 und 0,70 1/m.

Um innerhalb der so erzeugten „Variantenwolke“ exemplarisch konkrete Hallen herauszugreifen, wurden 4 „Typenhallen“ mit festen Abmessungen definiert (siehe Tabelle 3-27).

Tabelle 3-27: Abmessungen der Typenhallen

Table 3-27: Dimensions of the type halls

	Halle 1	Halle 2	Halle 3	Halle 4
Breite B [m]	30	20	15	12
Länge L [m]	45	60	60	60
Höhe H [m]	8	6	5	4
Verhältnis A/V [1/m]	0,36	0,47	0,57	0,70

3.6.2.2 Thermische Parameter Thermal parameter

In Tabelle 3-28 sind die verwendeten Bemessungswerte der Wärmedurchgangskoeffizienten aufgeführt.

Tabelle 3-28: Wärmedurchgangskoeffizienten der Musterhalle

Table 3-28: Thermal transmittances of the sample halls

Bauteil	Bemessungswärmedurchgangskoeffizient U_d [W/(m ² ·K)]
Lichtband	2,50
Fenster	1,80
Tür	4,00
Tor	2,90
Dach	0,31
Bodenplatte	0,19
Außenwand	Nach Abschnitt 3.6.3

Zur Berücksichtigung der nicht regelmäßig auftretenden Wärmebrücken, die beispielweise an allen Anschlüssen zwischen den einzelnen Bauteilen vorkommen, wurde gemäß der EnEV der pauschale Wärmebrückenzuschlag von $\Delta U = 0,10$ W/(m²·K) verwendet.

3.6.3 Sanierungsziel und thermische Qualität der Außenwand **Target of refurbishment and thermal quality of the external wall**

Es wurden zwei „Sanierungsziele“ unterschieden. In beiden Fällen wurde als Bestandsfassade eine Kassettenwand der Dicke 100 mm mit 3 mm Trennstreifen gewählt. Wie Abbildung 2-26 in Abschnitt 2.2.1.3.1 entnommen werden kann, beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient für diese Konstruktion 0,81 W/(m²·K).

3.6.3.1 Sanierungsziel „U-Wert“ **Target of refurbishment “U-value”**

Als Zielwert, der nach der Sanierung einzuhalten ist, wurde für die Außenwand zunächst ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,20 W/(m²·K) vorgegeben; auf Bauteilebene entspricht das einer Reduktion um 75 %. Um diesen Werte erreichen zu können, wurde entsprechend der Ergebnisse in Tabelle 3-2 bzw. Abbildung 3-6 in Abschnitt 3.2.1.1.1 ein 100 mm Sandwichelement gewählt. Der Bemessungswärmedurchgangskoeffizient des Hybridelementes beträgt in diesem Fall 0,199 W/(m²·K).

3.6.3.2 Sanierungsziel „Dämmstoffmenge“ **Target of refurbishment “amount of insulation”**

Das zweite betrachtete Sanierungsziel bezieht sich auf den effektiven Einsatz einer zusätzlichen Dämmstoffschicht von 60 mm. Dazu wurde wie in Abschnitt 3.2.1.1.3 bereits erläutert, die thermische Qualität, die sich für unterschiedliche Konstruktionen ergibt, bestimmt. Abbildung 3-89 fasste diese Ergebnisse nochmals zusammen.

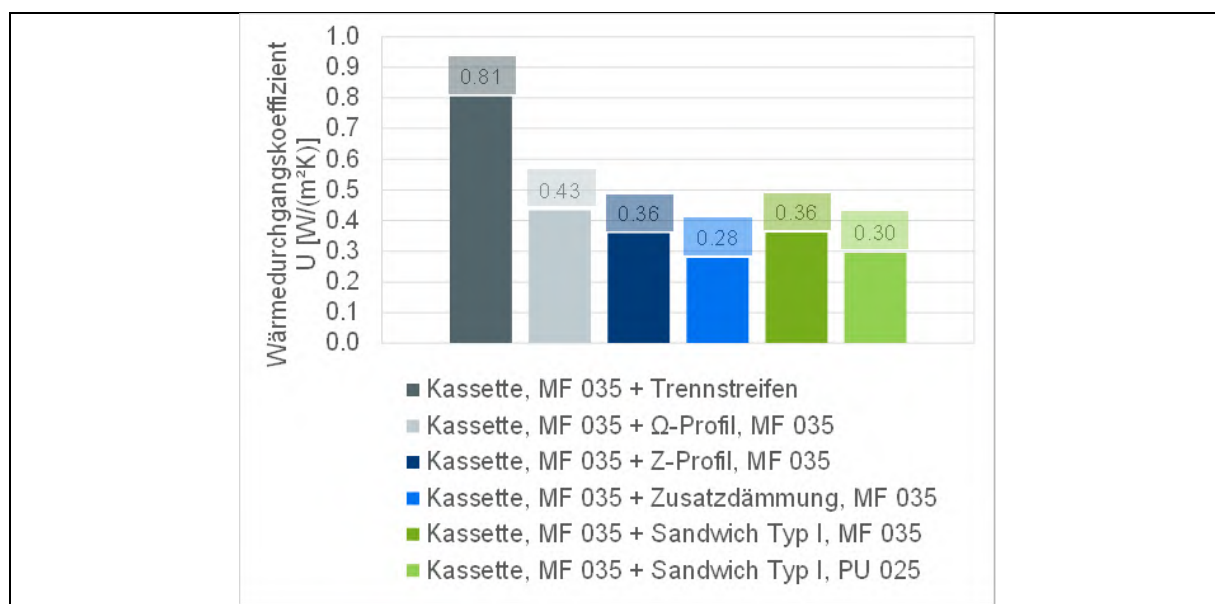


Abbildung 3-89: Sanierungsziel Dämmstoffmenge

Figure 3-89: Target of refurbishment amount of insulation

Die Ausgangsvariante war bei eine 100 mm Kassettenkonstruktion mit Mineralwöldämmung WLS 035. Als Sanierungsmaßnahme wurden jeweils 60 mm in der angegebenen WLS betrachtet.

3.6.4 Ergebnisse Results

3.6.4.1 Sanierungsziel „U-Wert“ Target of refurbishment “U-value”

In Abbildung 3-90 sind die berechneten spezifischen Transmissionswärmeflusskoeffizienten in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis der Musterhallen dargestellt. Die Varianten vor der Sanierung sind in grau, die nach der Sanierung in blau abgebildet. Zusätzlich sind die 4 Typenhallen vor und nach der Sanierung gekennzeichnet.

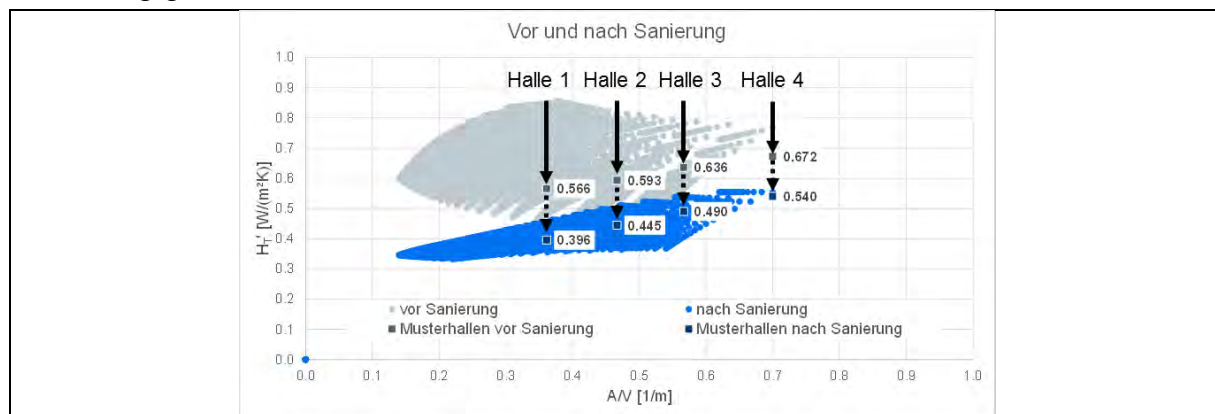


Abbildung 3-90: Spezifische Transmissionswärmeflusskoeffizienten der Musterhallen (U-Wert)

Figure 3-90: Specific transmission heat transfer coefficients of the sample halls (U-value)

In Bezug auf alle rund 10.000 betrachteten Varianten ergeben sich bei einem mittleren A/V-Verhältnis von 0,29 1/m Transmissionswärmetransferkoeffizienten von 0,64 vor bzw. 0,39 W/(m²·K) nach der Sanierung, was einer mittleren Reduktion um ca. 40 % entspricht.

Abbildung 3-91 zeigt die Reduktion für alle untersuchten Varianten.

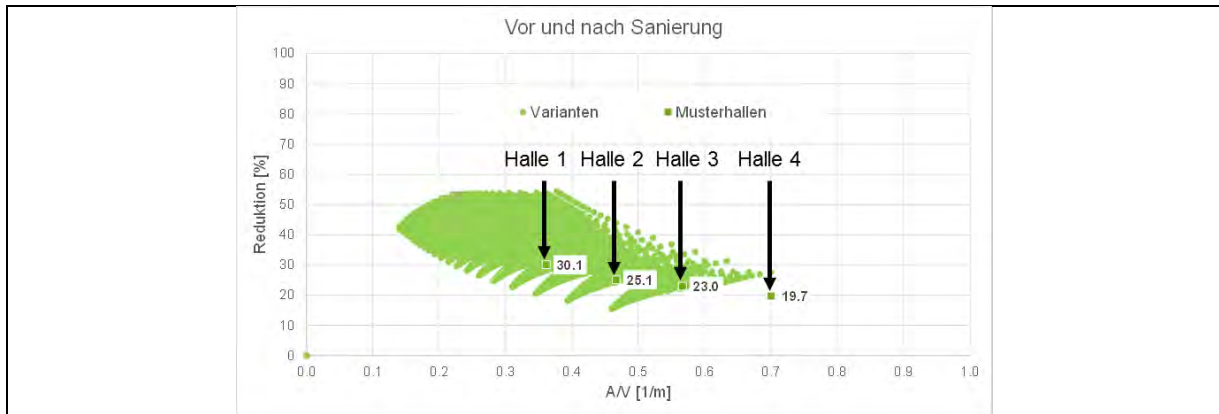


Abbildung 3-91: Reduktion der spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizienten der Musterhallen (U-Wert)

Figure 3-91: Reduction of specific transmission heat transfer coefficients of the sample halls (U-value)

3.6.4.2 Sanierungsziel „Dämmstoffmenge“ Target of refurbishment “amount of insulation”

Die berechneten spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizienten in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis sind in Abbildung 3-92 zu finden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde an dieser Stelle darauf verzichtet, die gesamte „Variantenwolke“ darzustellen.

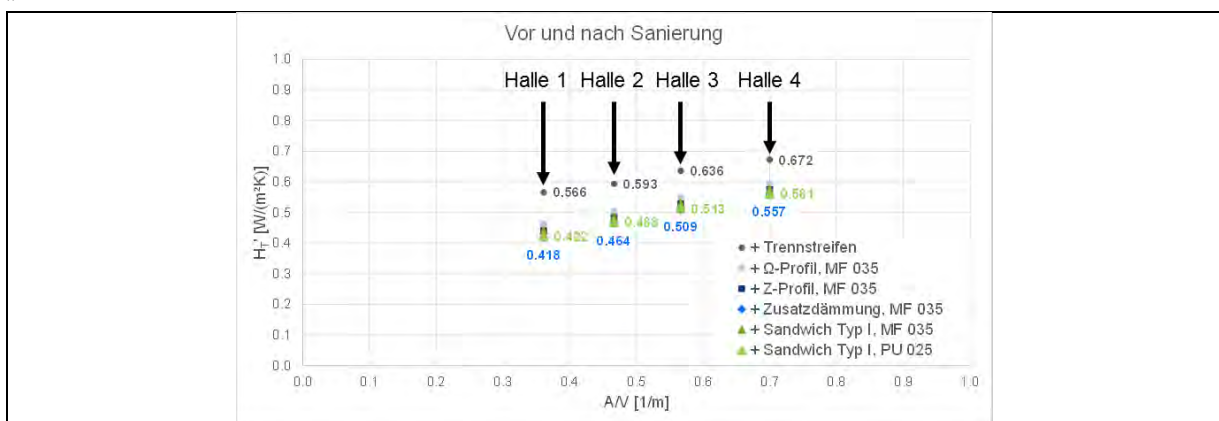


Abbildung 3-92: Spezifische Transmissionswärmetransferkoeffizienten der Musterhallen (Dämmstoffmenge)

Figure 3-92: Specific transmission heat transfer coefficients of the sample halls (amount of insulation)

Ausgehend von den Wärmedurchgangskoeffizienten, die durch die Sanierung der Außenwandkonstruktionen erzielt werden können, zeigen die Ergebnisse, dass die zwar wärmebrückenfreie, aber rein akademische Varianten „Zusatzdämmung“ das

höchste Einsparpotential bietet. In Abbildung 3-93 sind die entsprechenden prozentualen Reduktion für die untersuchten Varianten dargestellt.

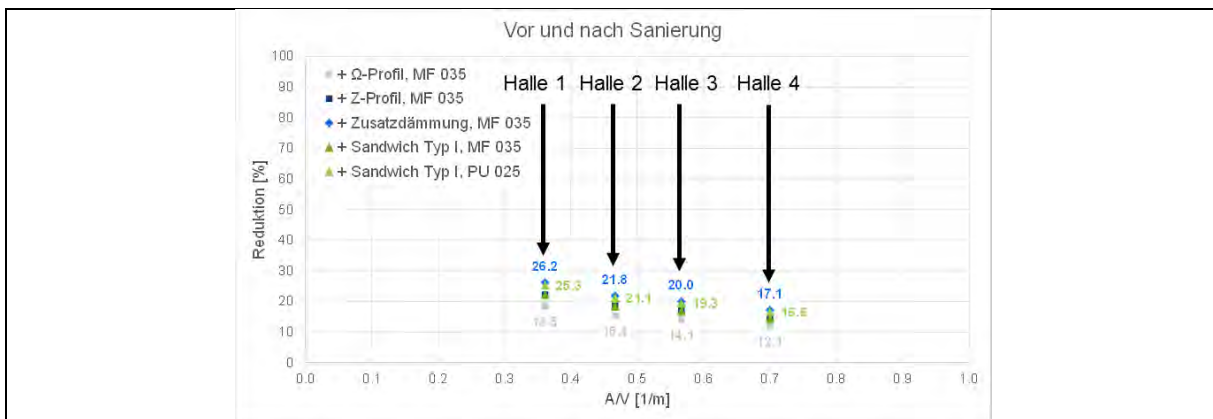


Abbildung 3-93: Reduktion der spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizienten der Musterhallen (Dämmstoffmenge)

Figure 3-93: Reduction of specific transmission heat transfer coefficients of the sample halls (amount of insulation)

Abschließend zeigt Abbildung 3-94 eine alternative Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen.

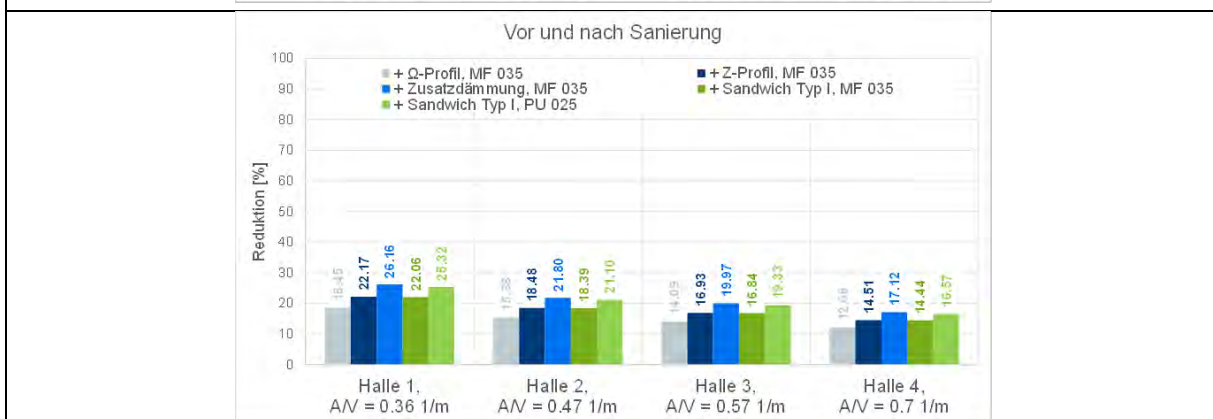
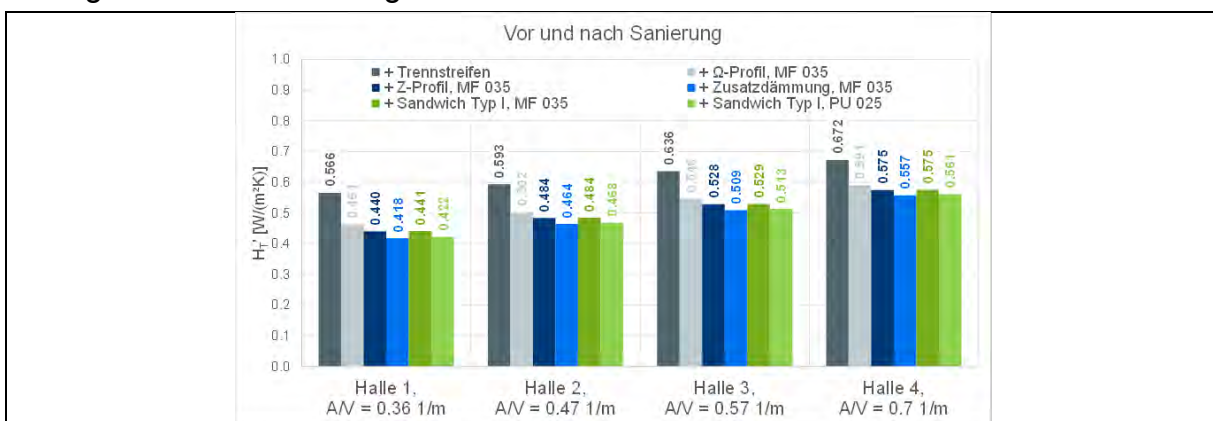


Abbildung 3-94: Alternative Ergebnisdarstellung Musterhallenvarianten (Dämmstoffmenge)

Figure 3-94: Alternative presentation of results for sample hall variations (amount of insulation)

4 Statische Untersuchungen Statical investigations

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten mechanisch-baustatischen Untersuchungen vorgestellt. Zunächst wird auf die baustatischen Randbedingungen, wie veränderte Lastannahmen und Maßtoleranzen eingegangen, anschließend folgen die analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen zur Sanierung von Stahlleichtbaufassaden, massiven Fassaden und Dächern.

This chapter introduces the structural engineering investigations performed in the scope of this research project. Beginning with an analysis of static boundary conditions, like load assumptions and dimensional tolerances, analytical, numerical and experimental studies on refurbishment of lightweight steel façades, solid façades and roof constructions will be introduced.

4.1 Veränderte Lastannahmen Changed load specifications

4.1.1 Allgemeines Preface

Bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden müssen die unmittelbar von der Änderung berührten Teile mit den Einwirkungen nach den aktuellen technischen Baubestimmungen erneut nachgewiesen werden, siehe Abschnitt 2.3.2. Der erneute Nachweis muss auf Grundlage des in DIN EN 1990 [66] vorgestellten Bemessungskonzeptes mit Grenzzuständen und Teilsicherheitsbeiwerten erfolgen. Die aktuell gültigen Normen zur Ermittlung der Einwirkungen können Tabelle 2-15 in Abschnitt 2.3.3.2 entnommen werden.

Die Wind- und Schneelastannahmen unterlagen in den letzten Jahrzehnten starken Veränderungen. Im Sanierungsfall ist daher eine genauere Betrachtung erforderlich:

- Erhöhte Lastannahmen können dazu führen, dass ein erneuter statischer Nachweis der Bestandsbauteile ohne geeignete Ertüchtigungsmaßnahmen nicht möglich ist. Dies hat erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer energetischen Sanierung.
- Reduzierte Lastannahmen können erforderliche Tragreserven zur baulichen Erweiterung bereitstellen.

In den folgenden Abschnitten werden die im Gebäudebestand relevanten Wind- und Schneelastnormen praxisgerecht aufgearbeitet und anhand von Beispielen ausgewertet. Da viele äußere Randbedingungen, wie Gebäudealter, -standort und -geometrie einen Einfluss auf die Änderung der Lastannahmen haben ist eine einfache oder pauschale Abschätzung der Änderung zunächst nicht möglich.

4.1.2 Betrachtete Normen Considered standards

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Windlastnormen der Normenreihe DIN 1055-4 seit 1938, die Schneelastnormen der Reihe DIN 1055-5 seit 1936 und die entsprechenden DDR-Standards seit 1964 betrachtet. Auf die vor Einführung der Normenreihe DIN 1055 gültigen „Preußischen Bestimmungen“ wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Wichtiger Hinweis: Das Ausgabedatum einer Norm entspricht nicht dem Datum der bauaufsichtlichen Einführung. Bei Bestandsgebäuden ist daher in jedem Fall zu prüfen, auf Grundlage welcher Lastannahmen die Bestandsstatik erstellt wurde.

Tabelle 4-1: Übersicht der Normausgaben zur Bestimmung der Windlast

Table 4-1: Overview of standard issues for wind load determination

Normtitel	Ausgabe	Anhänge / Kommentare
DIN 1055-4	1938-06	
	1977-05	
	1986-08	A1: 1987
	2001-03	(Entwurf)
	2005-03	B1: 2006-03
DIN EN 1991-1-4	2010-12	A1, NA

In Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3 werden die betrachteten Normausgaben dargestellt.

Tabelle 4-2: Übersicht der Normausgaben zur Bestimmung der Schneelast (BRD)

Table 4-2: Overview of standard issues for snow load determination (FRG)

Normtitel	Ausgabe	Anhänge / Kommentare
DIN 1055-5	1936-12	
	1975-06	
	1994-04	A1
	2001-04	(Entwurf)
	2004-02	(Entwurf)
	2005-07	
DIN EN 1991-1-3	2010-12	A1, NA

Tabelle 4-3: Übersicht der Normausgaben der DDR

Table 4-3: Overview of DDR standard issues

Normtitel	Ausgabe	Anhänge / Kommentare
TGL 20167	1964	
	1971	(Entwurf)
TGL 32274/07	1976	
TGL 32274/05	1976	

4.1.3 Entwicklung der Windlastnormen Evolution of wind load standards

4.1.3.1 DIN 1055-4:1938-06 DIN 1055-4:1938-06

Nach der DIN 1055-4 aus dem Jahr 1938 [59] berechnet sich die Windlast, die auf ein Bauwerk einwirkt nach Gl. 4-1.

$$w = c \cdot q \qquad \text{Gl. 4-1}$$

mit dem Staudruck q in kp/m^2 und einem einheitslosen Beiwert c , welcher die Gebäudegeometrie berücksichtigt. Diese Formel behält ihre Gültigkeit für alle nachfolgenden Normen, lediglich die Notation ändert sich.

Der Staudruck q variierte dabei abhängig von der Höhe. Tabelle 4-4 zeigt die verschiedenen Staudrücke. Hier werden vier Bereiche unterteilt.

Tabelle 4-4: Staudruck q nach [59]

Table 4-4: Dynamic pressure q according to [59]

Höhe über Gelände h [m]	Staudruck q [kp/m^2]
von 0 bis 8	50
über 8 bis 20	80
über 20 bis 100	110
über 100	130

Der Beiwert c gibt jeweils einen Faktor für den Druck- bzw. Soganteil des angreifenden Windes an. Somit wird zwischen zwei unterschiedlichen Wandbereichen unterschieden: Die Seite, welche dem Winddruck direkt ausgesetzt ist, und die Oberfläche, die sich auf der gegenüberliegenden Seite befindet. Sog parallel zum Wind wird nicht berücksichtigt. Die Windlast auf Dächern entspricht auf der windabgewandten Seite dem Wert für die Wandfläche. Auf der windzugewandten Seite ist die Last abhängig vom Dachneigungswinkel. Diese Verteilung gilt für die Haupttragwerke. Bei der Bemessung der einzelnen Tragglieder müssen die Druckwerte um 25 % erhöht werden.

Zusätzlich wird in der Norm darauf hingewiesen, dass Sogspitzen am Übergang von Wand- zur Dachfläche auftreten können. Genauere Angaben finden sich dazu nicht. Bei Gebäuden auf Anhebungen (deutlich über dem umliegenden Gelände) ist ein Mindeststaudruck von 100 kP/m^2 anzusetzen.

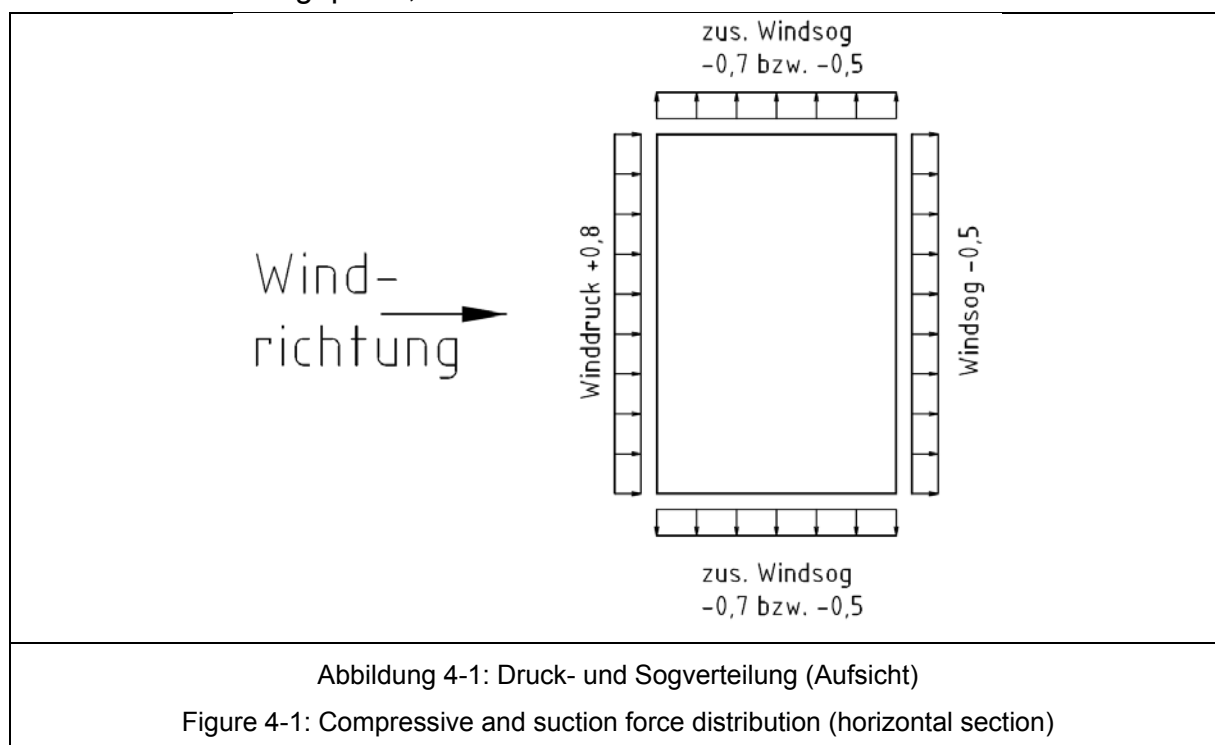
4.1.3.2 DIN 1055-4:1977-05 DIN 1055-4:1977-05

Der Geltungsbereich der DIN 1055-4 Ausgabe 1977-05 [61] beschränkt sich auf nicht schwingungsanfällige Bauwerke. Ohne Nachweis zählen dazu Industriegebäude mit einer Schlankheit von $h/b \leq 5$. Der Staudruck wird nicht mehr in der Einheit kp/m^2 sondern in kN/m^2 angegeben. Betragsmäßig gibt es hier gegenüber der Vorgängernorm keine Änderungen.

Zu dem Beiwert c werden in dieser Normausgabe keine Angaben gemacht. Diese Beiwerte sind dem Entwurf der DIN 1055 Teil 45 „Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Aerodynamische Formbeiwerte für Baukörper“ zu entnehmen, aus dem später die nachfolgende Norm entwickelt wurde. Für die Bemessung der einzelnen Tragglieder sind die Werte für Druck auch in dieser Normausgabe um 25 % zu erhöhen.

4.1.3.3 DIN 1055-4:1986-08 DIN 1055-4:1986-08

Mit der Ausgabe der DIN 1055-4:1986 [62] werden die Vorschriften aus der DIN 1055-4:1977 und der DIN 1055-5 in einer Norm zusammengefasst. Im Vergleich zu Normausgabe von 1938 werden Flächen, die parallel zur Windrichtung verlaufen, mit einem separaten Beiwert berücksichtigt. Das entsprechende Lastbild in DIN 1055-4:1986 zeigt Abbildung 4-1. Der Beiwert (- 0,7 oder - 0,5) ergibt sich aus der Gebäudegeometrie. Die Beiwerte für Flächen, auf die der Wind senkrecht einwirkt, wurden ebenfalls angepasst, die Staudruckwerte bleiben unverändert.



Die Berechnung der Belastung auf Dachflächen wird sowohl für die Luv- als auch für die Leeseite abhängig vom Dachneigungswinkel.

Zusätzlich zu dem Windsog an der Gebäudeseite kann es in den Eckbereichen zu Sogspitzen kommen. Diese Sogspitzenbereiche haben eine Breite zwischen einem und zwei Metern. Für den Lastfall, dass der Wind unter einem Winkel von 45° zur Wand anströmt, ergeben sich zusätzlich Sogspitzen in den Randbereichen des Dachs. Hierbei wird zwischen Flachdächern und Satteldächern unterschieden. Die entsprechenden Zeichnungen und Beiwerte c_p können [62] entnommen werden.

Diese Sogspitzen dienen lediglich der Bemessung von Einzelbauteilen. Als Beispiel für Einzelbauteile führt die Norm Dach- und Wandtafeln auf. Die Werte für Druck sind auch in dieser Norm für die Bemessung einzelner Bauteile um 25 % zu erhöhen.

In dieser Normausgabe wird darauf hingewiesen, dass das beschriebene Windlastmodell sehr vereinfacht ist. So ist beispielsweise die Auftretenswahrscheinlichkeit der maximalen Windlasten je nach Region unterschiedlich. Die Norm verweist dabei auf die Windgeschwindigkeitszonenkarte der DIN 1056:1984 „Freistehende Schornsteine in Massivbau“. „Für wirklichkeitsnähere Ansätze muss generell auf die Grundlagen der modernen Windlasttheorie zurückgegriffen werden“ [62].

4.1.3.4 DIN 1055-4:2001-03 DIN 1055-4:2001-03

Der Normentwurf aus dem Jahr 2001 [56] bringt größere Umstrukturierungen mit sich. Eine vereinfachte Ermittlung des Staudrucks (welcher jetzt als Geschwindigkeitsdruck bezeichnet wird) ist nur noch bei einer Gebäudehöhe bis zu 10 m über Geländeoberfläche zulässig. Außerdem wird eine Windzonenkarte in die Norm integriert. Die Windzonenkarte gliedert Deutschland in vier verschiedene Bereiche, in denen jeweils ein separater Geschwindigkeitsdruck anzusetzen ist, siehe Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5: Geschwindigkeitsdrücke der Windlastzonen [56]

Table 4-5: Dynamic pressures of wind load zone [56]

Windzone	Geschwindigkeitsdruck q [kN/m ²]
1	0,7
2	0,9
3	1,2
4	1,5

Neben dem vereinfachten Verfahren zur Ermittlung des Geschwindigkeitsdrucks, kann dieser auch über eine Formel in Abhängigkeit der Gebäudehöhe z und des Beiwertes $q_{ref,0}$ bestimmt werden. Sowohl dieser Beiwert, als auch die zugrundeliegende Formel sind von der Windlastzone abhängig.

Für die Windlastzonen 1 bis 3 errechnen sich die Geschwindigkeitsdrücke zu:

$$z > 4,0 \text{ m} \qquad q = 2,1 \cdot q_{ref,0} \cdot (z/10)^{0,24} \qquad \text{Gl. 4-2}$$

$$z \leq 4,0 \text{ m} \qquad q = 1,7 \cdot q_{ref,0} \qquad \text{Gl. 4-3}$$

Für die Windlastzone 4 lassen sich die Geschwindigkeitsdrücke wie folgt berechnen:

$$z > 4,0 \text{ m} \qquad q = 2,6 \cdot q_{ref,0} \cdot (z/10)^{0,19} \qquad \text{Gl. 4-4}$$

$$z \leq 4,0 \text{ m} \qquad q = 1,9 \cdot q_{ref,0} \qquad \text{Gl. 4-5}$$

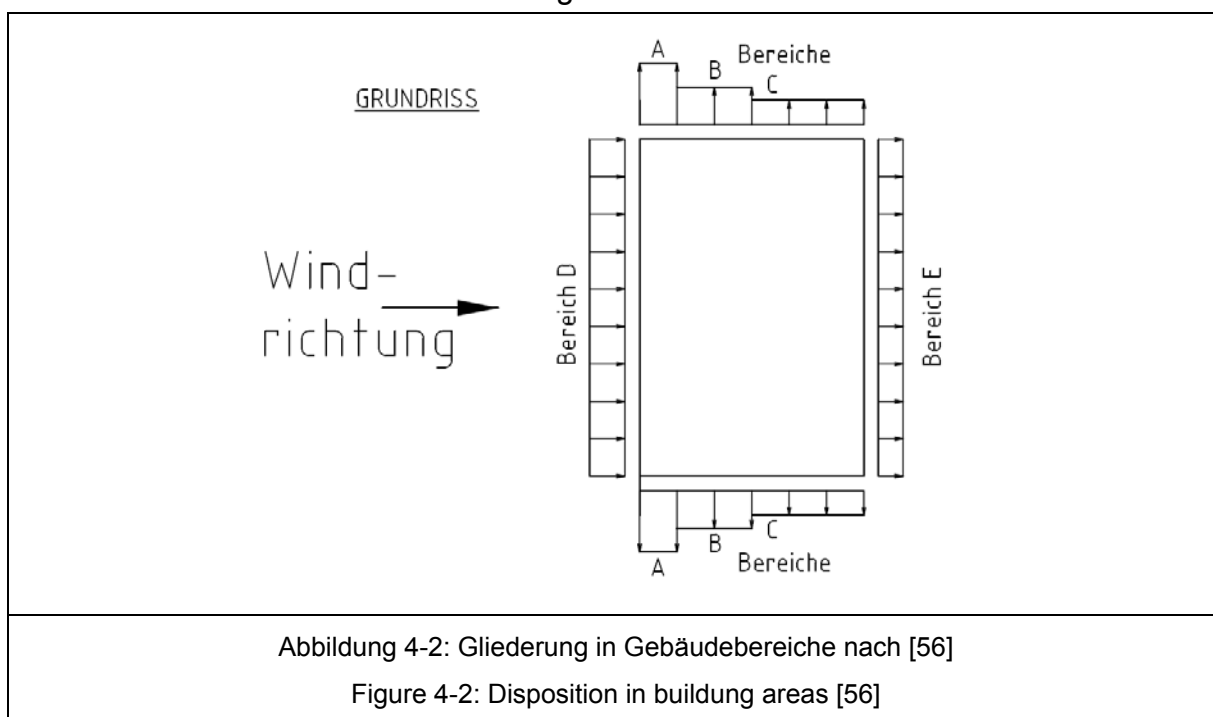
Eine zusätzliche Änderung besteht in der Aufteilung der Bauwerksoberflächen. Es wird nicht mehr nur in Druck und Sog, senkrecht und parallel zur Windrichtung unterschieden. Stattdessen werden die Gebäudeaußenwände in insgesamt fünf Bereiche gegliedert, auf denen jeweils eine andere Windbelastung anzusetzen ist.

Abbildung 4-2 zeigt die anzunehmende Gebäudeaufteilung. Für jeden Bereich existiert ein eigener Druckbeiwert $c_{pe,10}$ bzw. $c_{pe,1}$. Der Beiwert $c_{pe,10}$ wird verwendet, wenn die Lasteinzugsfläche größer 10 m^2 ist. Ist die Lasteinzugsfläche A kleiner oder gleich 1 m^2 , wird der Druckbeiwert $c_{pe,1}$ angewendet. Für Flächen, die zwischen diesen Größen liegen, kann mit der nachfolgenden Formel interpoliert werden.

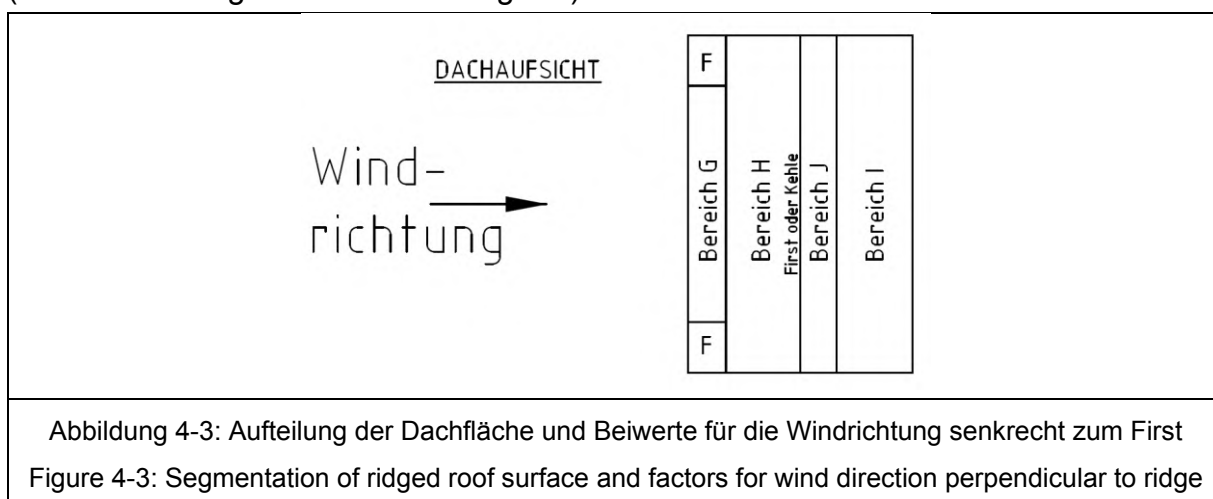
$$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot \log(A) \quad \text{Gl. 4-6}$$

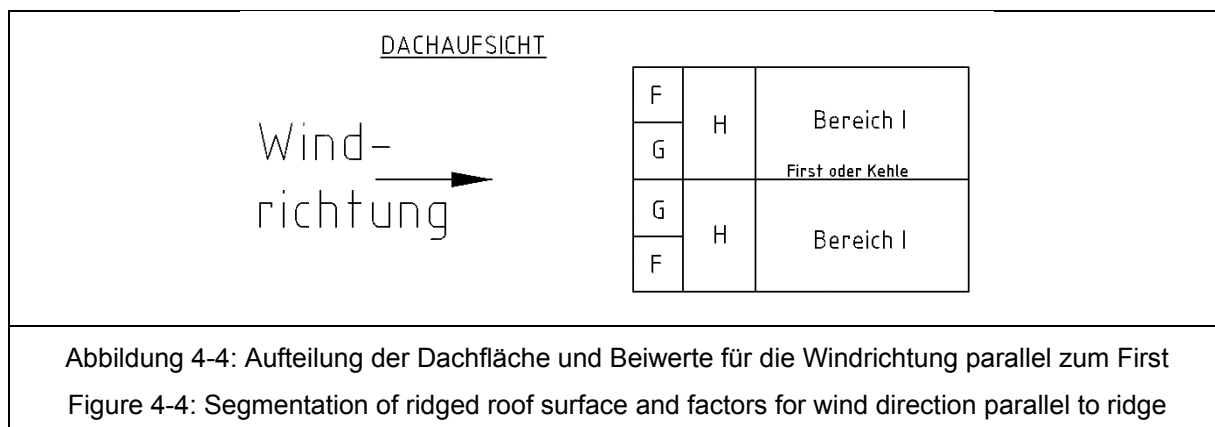
Die Abmessungen der Bereiche und die zugehörigen Außendruckbeiwerte hängen von der Gebäudegeometrie ab und können [56] entnommen werden.

Die Dachfläche wird ebenfalls in verschiedene Bereiche gegliedert, in denen unterschiedliche Druck- bzw. Sogbeanspruchungen angesetzt werden müssen. Auch bei Dächern hängen die Abmessungen der Bereiche und die zugehörigen Außendruckbeiwerte von der Gebäudegeometrie ab.



Es wird bei Satteldächern zwischen zwei verschiedenen Windrichtungen unterschieden (siehe Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4):





Für Flachdächer gibt es eine gesonderte Geometrieaufteilung mit zugehörigen Beiwerten. Der Bereich J entfällt bei Flachdächern.

Bei den Nachweisen der Verankerung der Gebäudehülle und ihrer Standsicherheit sind die aerodynamischen Beiwerte um 10 % zu erhöhen.

4.1.3.5 DIN 1055-4:2005-03 DIN 1055-4:2005-03

Im März 2005 wurde die nächste Fassung der DIN 1055-4 ausgegeben [57]. Die einzelnen Windzonen werden weiter unterteilt in Unterzonen und die Geschwindigkeitsdrücke könnten bis zu einer Gebäudehöhe von 25 m vereinfacht bestimmt werden. Tabelle 4-6 stellt die vereinfachten Geschwindigkeitsdrücke dar.

Tabelle 4-6: Geschwindigkeitsdrücke der Windlastzonen nach [57]

Table 4-6: Dynamic pressures of wind load zone according to [57]

Windzone und Unterzone		Geschwindigkeitsdruck q [kN/m ²]		
		Gebäudehöhe h ≤ 10 m	Gebäudehöhe 10 m < h ≤ 18 m	Gebäudehöhe 18 m < h ≤ 24 m
1	Binnenland	0,50	0,65	0,75
2	Binnenland	0,65	0,80	0,90
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	1,00	1,10
3	Binnenland	0,80	0,95	1,10
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,20	1,30
4	Binnenland	0,95	1,15	1,30
	Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,25	1,40	1,55
	Inseln der Nordsee	1,40	-	-

Die zugehörige Windzonenkarte kann [57] entnommen werden. Die Grenzen der einzelnen Windzonen haben sich im Vergleich zur DIN 1055-4:2001 verschoben. Außerdem haben sich die Werte für q_{ref} verändert.

Im Binnenland (Mischprofil der Geländekategorien II und III) wird der Geschwindigkeitsdruck wie folgt berechnet:

$$z \leq 7 \text{ m} \quad q(z) = 1,5 \cdot q_{\text{ref}} \quad \text{Gl. 4-7}$$

$$7 \text{ m} < z \leq 50 \text{ m} \quad q(z) = 1,7 \cdot q_{\text{ref}}(z/10)^{0,37} \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$50 \text{ m} < z \leq 300 \text{ m} \quad q(z) = 2,1 \cdot q_{\text{ref}}(z/10)^{0,24} \quad \text{Gl. 4-9}$$

In küstennahen Gebieten sowie auf den Inseln der Ostsee (Mischprofil der Geländekategorien I und II) wird der Geschwindigkeitsdruck wie folgt berechnet:

$$z \leq 4 \text{ m} \quad q(z) = 1,8 \cdot q_{\text{ref}} \quad \text{Gl. 4-10}$$

$$4 \text{ m} < z \leq 50 \text{ m} \quad q(z) = 2,3 \cdot q_{\text{ref}}(z/10)^{0,27} \quad \text{Gl. 4-11}$$

$$50 \text{ m} < z \leq 300 \text{ m} \quad q(z) = 2,6 \cdot q_{\text{ref}}(z/10)^{0,19} \quad \text{Gl. 4-12}$$

Auf den Inseln der Nordsee (Geländekategorie I) wird der Geschwindigkeitsdruck wie folgt berechnet:

$$z \leq 2 \text{ m} \quad q(z) = 1,1 \text{ kN/m}^2 \quad \text{Gl. 4-13}$$

$$2 \text{ m} < z \leq 300 \text{ m} \quad q(z) = 1,5 \cdot q_{\text{ref}}(z/10)^{0,19} \quad \text{Gl. 4-14}$$

Fassaden werden auch weiterhin in fünf Bereiche gegliedert. Die zugehörigen Außendruckbeiwerte können [57] entnommen werden. Bei den $c_{pe,10}$ -Werten des D-Bereiches liegt in der ersten Version der Norm ein Vorzeichenfehler vor, der später berichtigt wurde.

Die $c_{pe,1}$ -Werte, sowie die Werte aller Lasteinzugsflächen $< 10 \text{ m}^2$, sind hierbei nur für die Ankerkraftberechnung von Bauteilen, die unmittelbar durch Windbelastung beansprucht werden und für Verankerungsnachweise zu verwenden.

Bei Flachdächern sind sowohl die Unterteilung der Dachfläche als auch die Beiwerte unverändert geblieben. Bei Satteldächern erfolgte eine Erweiterung der Tabelle für eine Dachneigung von 10° aus linearer Interpolation. Zusätzlich erfolgten geringfügige Änderungen der Beiwerte.

4.1.3.6 DIN EN 1991-1-4:2010-12 DIN EN 1991-1-4:2010-12

Im Dezember 2010 wurde die erste europäische Windlastnorm EN 1991-1-4 [69] eingeführt, welche sich nur unwesentlich von der DIN 1055-4:2005 unterscheidet. Die Geschwindigkeitsdrücke der einzelnen Windzonen sind sowohl für die vereinfachte Ermittlung als auch für die genauere Ermittlung mittels Formeln identisch geblieben. Auch die Beiwerte für die Gebäudegeometrie wurden übernommen.

Die Einteilung der Wandflächen erfolgt analog zu Abbildung 4-2 in fünf Bereiche, für die globale ($c_{pe,10}$) und lokale ($c_{pe,1}$) Druckbeiwerte angegeben werden. Die lokalen Druckbeiwerte werden hierbei zur Bemessung von Verankerungen oder kleiner Bauteile verwendet. Die Bemessung des Gesamttragwerks erfolgt mit den $c_{pe,10}$ -Werten.

Die Aufteilung der Dachflächen erfolgt analog zur DIN 1055-4:2005. Bei den Außendruckbeiwerten gibt es geringfügige Änderungen der Beiwerte für den Bereich I

bei Flachdächern und parallel zum First angeströmten Satteldächern und, abhängig vom Neigungswinkel, in allen Bereichen Änderungen bei senkrecht zum First angeströmten Satteldächern.

**4.1.3.7 TGL 20167 Februar 1964
TGL 20167 February 1964**

In der Deutschen Demokratischen Republik waren die DI-Normen der Bundesrepublik Deutschland nicht gültig. Lastannahmen für Bauten konnten den Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (kurz TGL) entnommen werden. Der Aufbau der Norm und die Windlastberechnung lassen sich gut mit den damaligen DI-Normen vergleichen.

Im Februar 1964 erschien die TGL 20167 [72], welche sich mit Lasten aus Verkehr-, Schnee- und Windbeanspruchungen auseinandersetzt. Sie unterschied sich in den Windlastannahmen nicht von dem im November 1963 erschienen Normentwurf. Analog zur DIN berechnet sich die so genannte Normlast p_n zu

$$p_n = q_0 \cdot c \qquad \text{Gl. 4-15}$$

mit dem Staudruck q_0 und dem Beiwert c , welcher die Gebäudegeometrie berücksichtigt. Der Staudruck ist auch in den TGL abhängig von der Gebäudehöhe (siehe Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7: Staudruck q_0 nach [72]

Table 4-7: Dynamic pressure q_0 according to [72]

Höhe über Gelände h [m]	Staudruck q_0 [kp/m ²]
von 0 bis 10	55
über 10 bis 20	75
über 20 bis 40	100
über 40 bis 100	120
über 350	165

Die sogenannte Rechnungslast p ergibt sich durch Multiplikation der Normlast p_n mit dem Grenzlastfaktor n .

$$p = p_n \cdot n \qquad \text{Gl. 4-16}$$

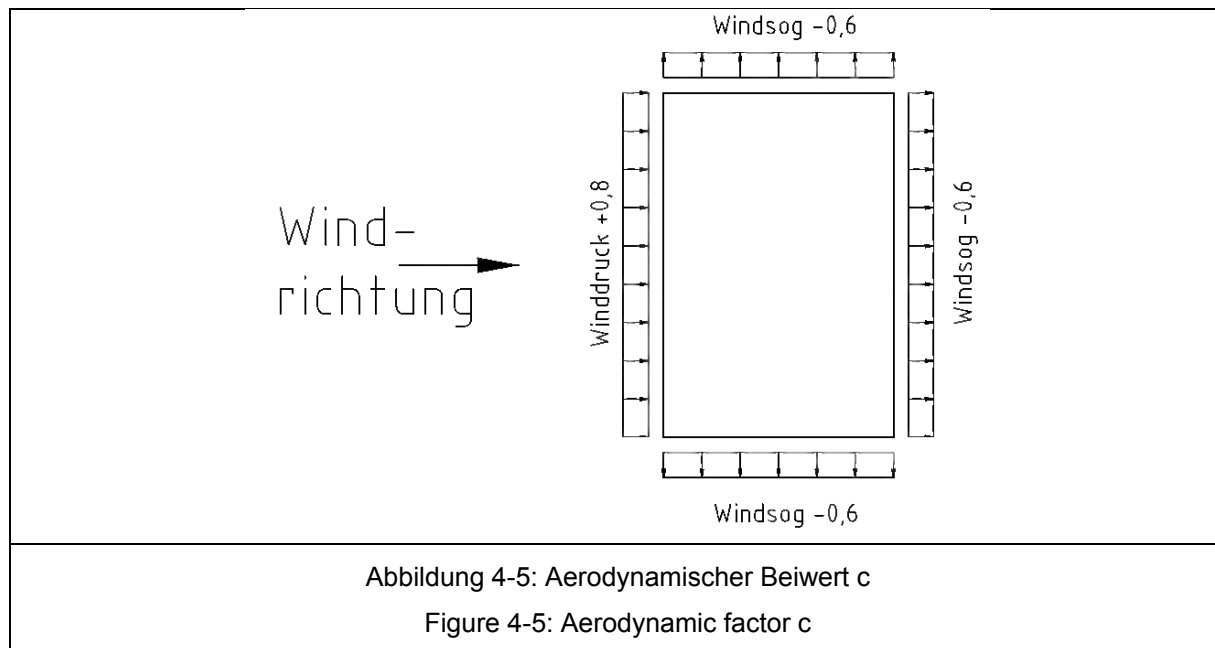
Der Grenzlastfaktor n kann der folgenden Tabelle 4-8 entnommen werden.

Tabelle 4-8: Grenzlastfaktor n [72]

Table 4-8: Ultimate load factor n [72]

Kategorie	Lastfaktor n
Wohn-, Gesellschafts-, Industrie- und Landwirtschaftsbauten	1,2
turmartige Bauwerke	1,3
Montagelastfall	1,0

Diese Staudrücke dürfen bei Gebäudehöhen $\leq 5,0$ m um 25 % abgemindert werden. Bei Bauwerken in bestehender geschlossener Bebauung kann der Staudruck auf 80 % verringert werden. Allerdings darf nur eine der beiden Abminderungen vorgenommen werden. Der aerodynamische Beiwert c für Wandflächen kann der folgenden Abbildung 4-5 entnommen werden. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der entsprechenden DI-Norm.



**4.1.3.8 TGL 20167 Mai 1971
 TGL 20167 May 1971**

Im Jahr 1971 erscheint ein Normentwurf [73], der für Dachflächen den Beiwert c_s einführt, welcher Sogspitzen im First- und Randbereich berücksichtigt. Die anzusetzende Windlast auf Wandflächen ist identisch zur Normausgabe von 1964. Die aerodynamischen Beiwerte können der Tabelle 4-9 entnommen werden.

Tabelle 4-9: Aerodynamische Beiwerte c und c_s [73]

Table 4-9: Aerodynamic factors c and c_s [73]

Dachneigung α [°]	Beiwert c	Beiwert c_s
0	- 0,8	- 1,2
15	- 0,8	- 1,2
30	0	- 2,0
≥ 60	+ 0,8	0

Die c_s -Werte werden dabei zusätzlich zu den c -Werten angesetzt, allerdings nur bei der Bemessung der Einzelelementverankerung. Bei den Standsicherheitsnachweisen findet der c_s -Wert keine Berücksichtigung. Bei Dachneigungen zwischen $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ muss der c_s -Wert im Firstbereich nicht berücksichtigt werden.

4.1.3.9 TGL 32274/07 Dezember 1976
TGL 32274/07 December 1976

Mit der TGL 32274/07 [75], einer reinen Windlastnorm, ändert sich die Einheit von kp/m^2 zu kN/m^2 . Die Staudrücke änderten sich sonst jedoch nicht.

Eine Abminderung des Staudrucks auf 75 % ist bei Gebäudehöhen $\leq 5,0$ m weiterhin zulässig. Außerdem kann eine Verringerung des anzusetzenden Drucks für Bauwerke in geschützter Lage nach Tabelle 4-10 erfolgen.

Tabelle 4-10: Abminderungsfaktor ω für Gebäude in geschützter Lage [75]

Table 4-10: Factor ω for buildings in protected areas [75]

Höhe über Gelände h [m]	Abminderungsfaktor ω
von 0 bis 10	0,65
über 10 bis 20	0,71
über 20 bis 40	0,77
über 40 bis 100	0,86
über 350	1,00

Die Grenzlastfaktoren sind in den Normausgaben von 1964 und 1976 identisch. Die aerodynamischen Beiwerte sind in dieser Normausgabe sowohl für Dach- als auch für Wandflächen abhängig vom Längen zu Breitenverhältnis und vom Höhen zu Breitenverhältnis und können [75] entnommen werden.

Der c_s -Wert ist bei der Verankerungsbemessung zu verwenden. Der Standsicherheitsnachweis des Bauwerks erfolgt mit den c -Werten. Bei Dachneigungen zwischen $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ darf auch nach dieser Normausgabe der c_s -Wert im Firstbereich vernachlässigt werden. Bei Windbeanspruchung parallel zum First werden die aerodynamischen Beiwerte für eine Dachneigung von $\alpha = 0^\circ$ bestimmt.

4.1.4 Auswertung anhand von Beispielgebäuden
Analysis based on example buildings

4.1.4.1 Vorbemerkungen
Preliminary remark

Anhand von drei unterschiedlichen, repräsentativen Hallengeometrien werden die anzusetzenden Windlasten in Abhängigkeit vom Baujahr und Standort miteinander verglichen. Bei dieser Betrachtung werden die vereinfachten Geschwindigkeitsdrücke des Eurocodes verwendet, da die Berechnungsfunktion für die vorhandenen Drücke nicht linear sind und somit die Komplexität eines Vergleiches deutlich zunimmt.

Bei allen drei Bauwerken handelt es sich um gedrungene Hallen mit einem 11° geneigtem Satteldach. Zunächst werden die Hallengeometrien und die zugehörigen Lastbilder dargestellt, anschließend erfolgt eine grafische Auswertung unter Berücksichtigung der jeweiligen Normausgaben und heutigen Windzonen nach Eurocode.

4.1.4.2 Geometrie und Lastbilder Halle A
Geometry and load arrangement Hall A

Halle A hat die eine Grundfläche von 12 m x 60 m, eine geringe Traufhöhe von 2,83 m und eine Firsthöhe von 4 m, siehe Abbildung 4-6.

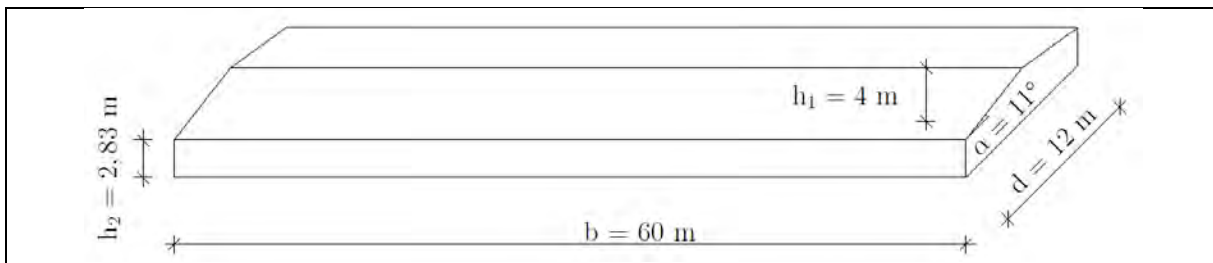


Abbildung 4-6: Geometrie Halle A

Figure 4-6: Geometry Hall A

Unter der Annahme, dass der Wind senkrecht auf die Gebäudelängsseite trifft, ergeben sich nach unterschiedlichen Normen folgenden Lastbilder für die globale Bemessung (linkes bzw. oberes Lastbild) und für die lokale Bemessung (rechtes bzw. unteres Lastbild): (vgl. Abbildung 4-7 bis Abbildung 4-14)

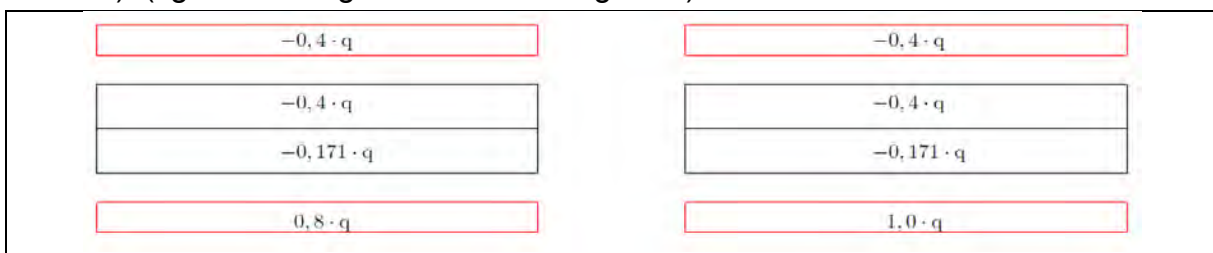


Abbildung 4-7: Lastbild Halle A 1938

Figure 4-7: Load arrangement Hall A 1938

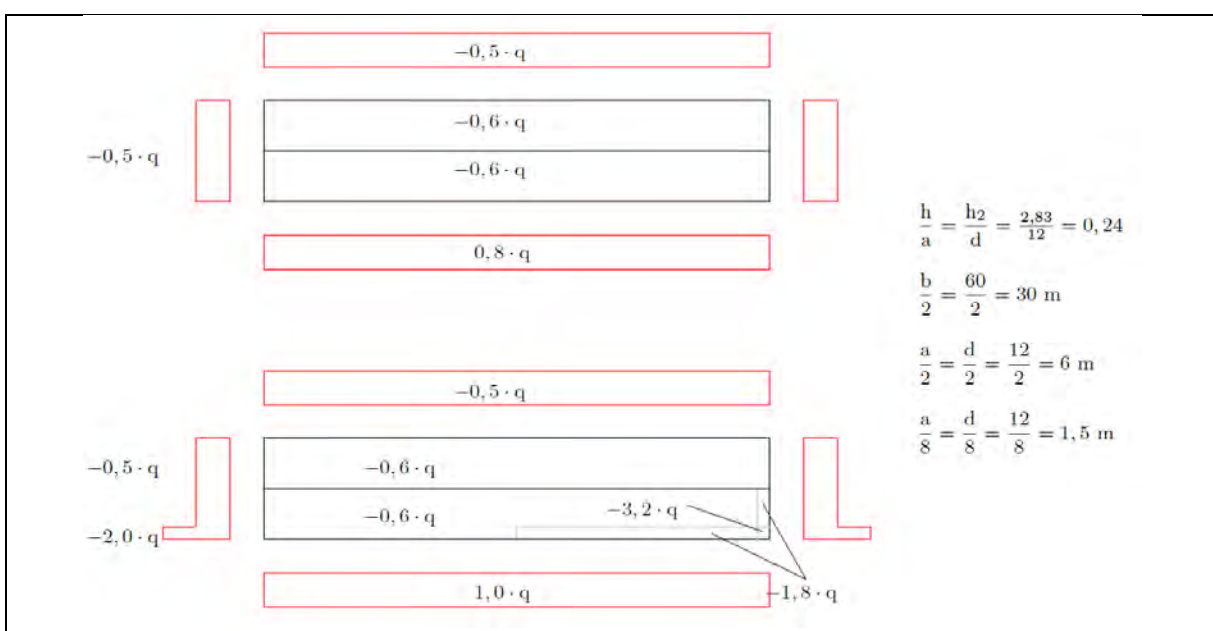


Abbildung 4-8: Lastbild Halle A 1986

Figure 4-8: Load arrangement Hall A 1986

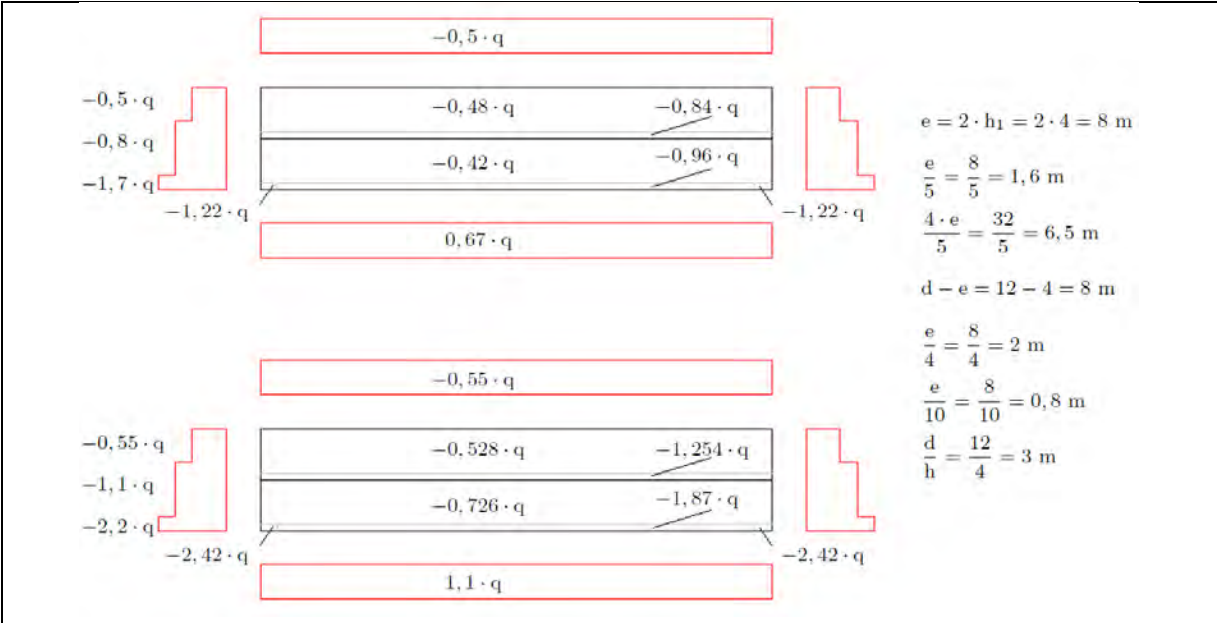


Abbildung 4-9: Lastbild Halle A 2001
 Figure 4-9: Load arrangement Hall A 2001

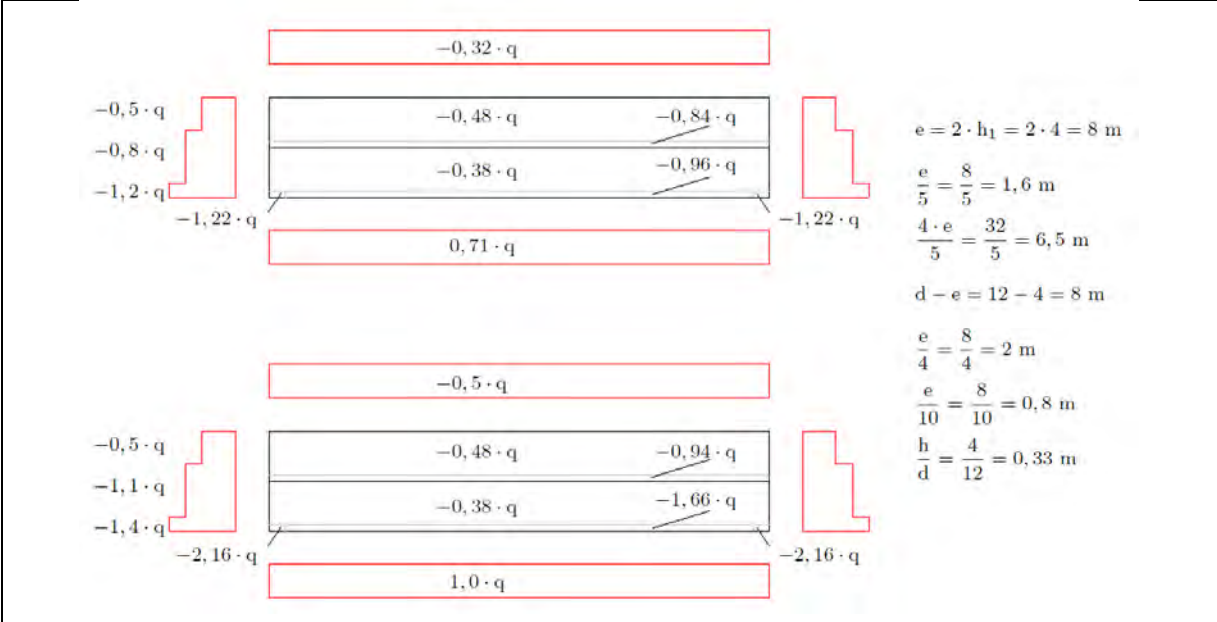


Abbildung 4-10: Lastbild Halle A 2005
 Figure 4-10: Load arrangement Hall A 2005

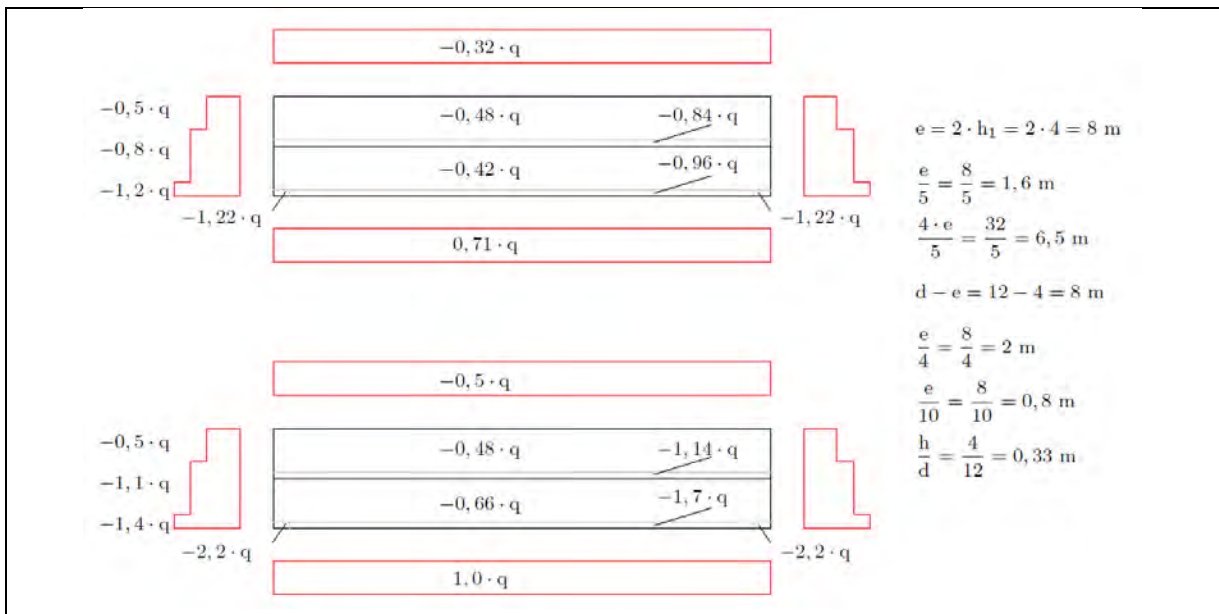


Abbildung 4-11: Lastbild Halle A 2010
 Figure 4-11: Load arrangement Hall A 2010

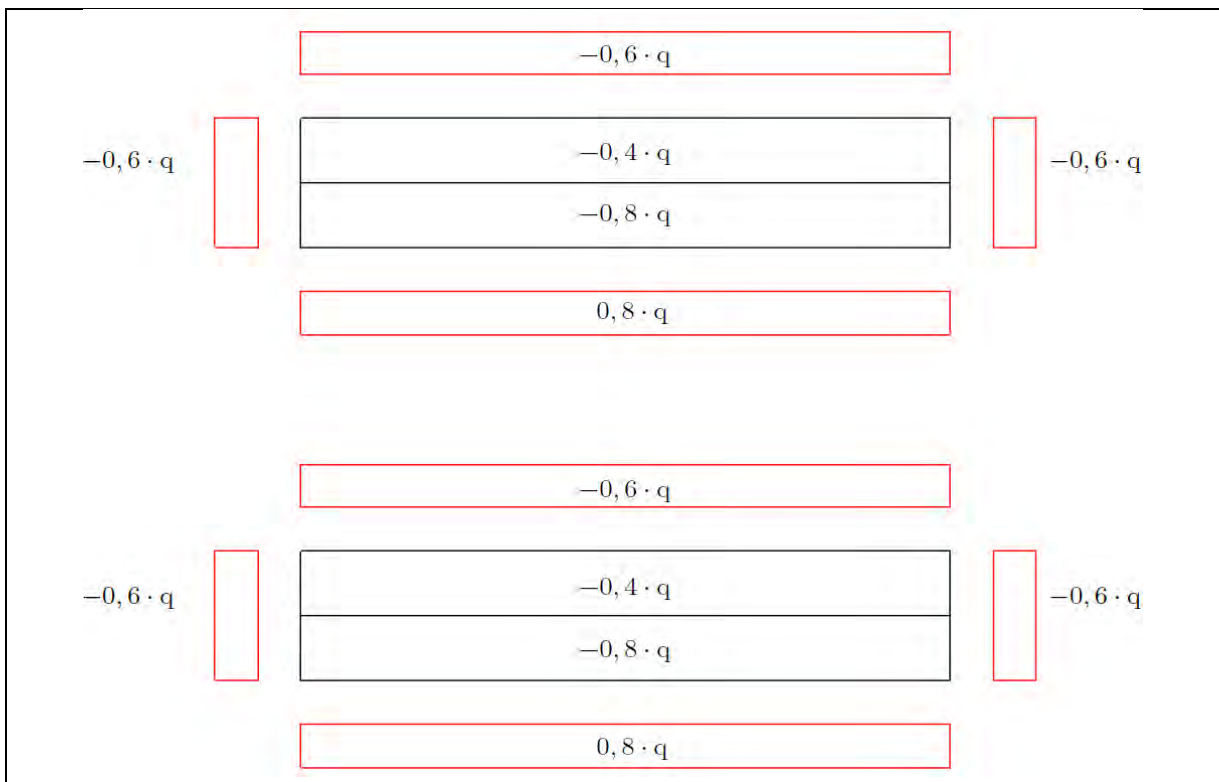
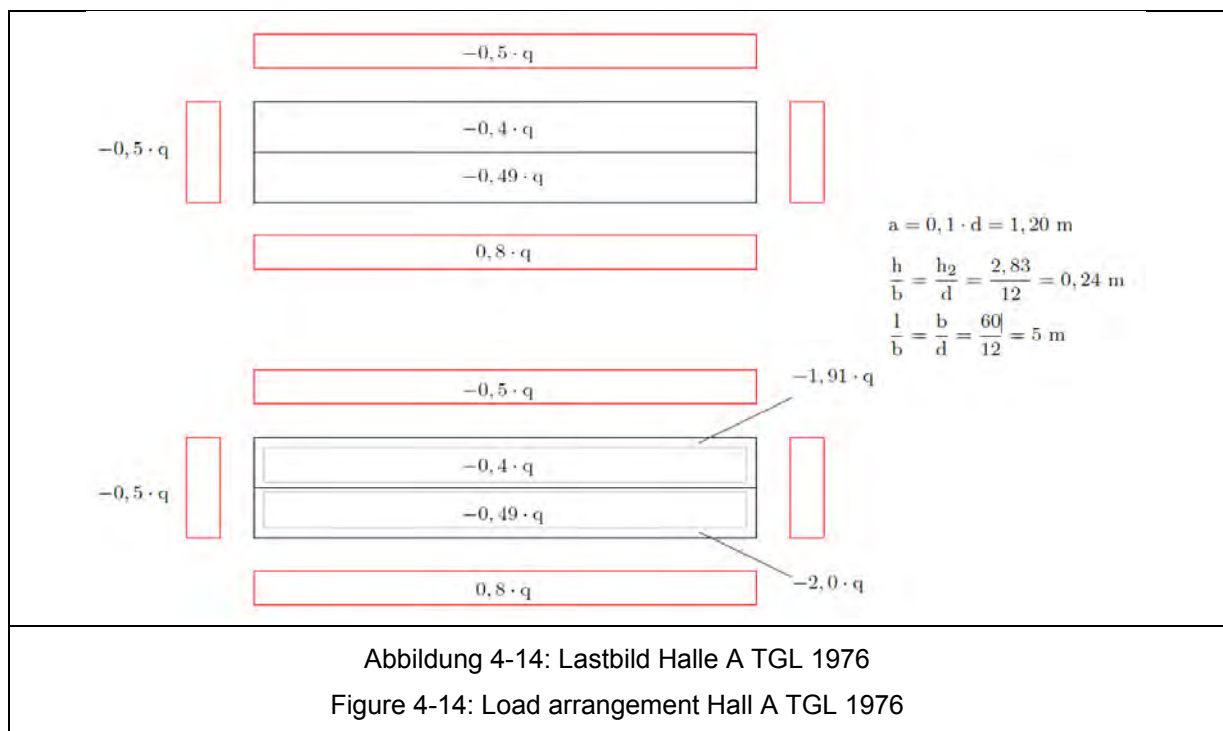
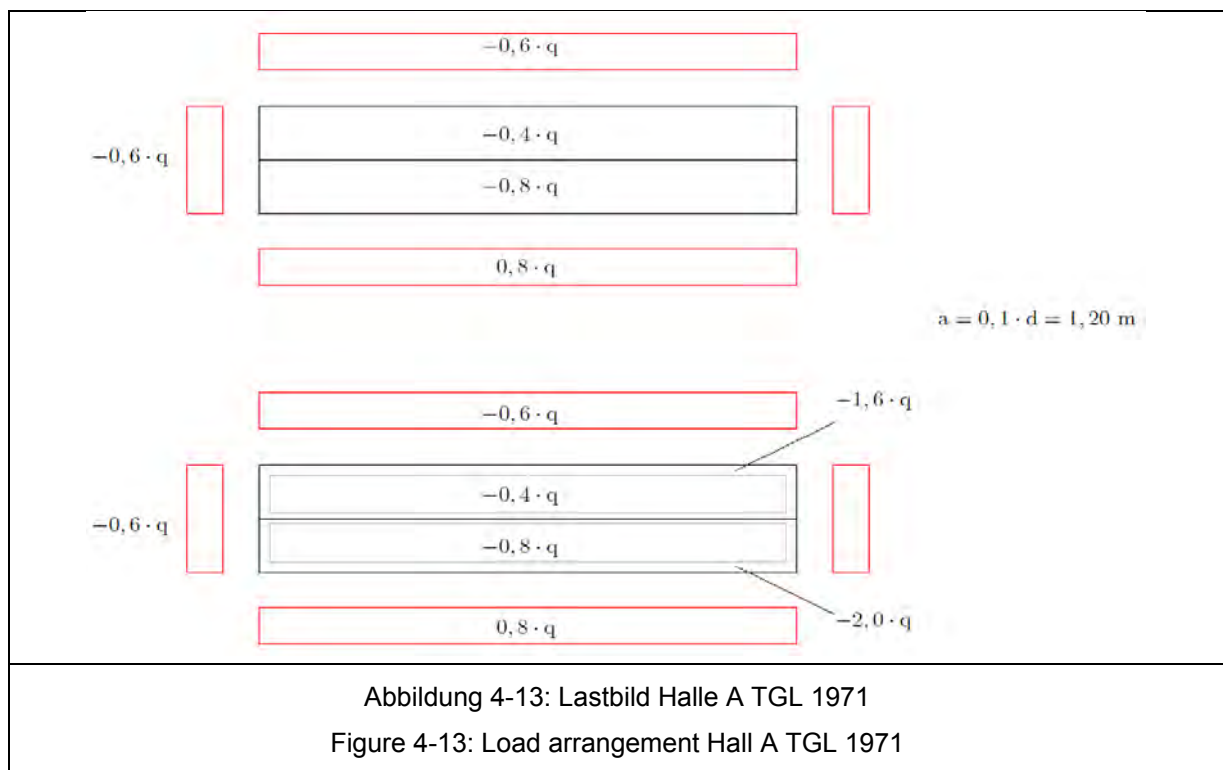


Abbildung 4-12: Lastbild Halle A TGL 1964
 Figure 4-12: Load arrangement Hall A TGL 1964



4.1.4.3 Geometrie und Lastbilder Halle B Geometry and load arrangement Hall B

Die Abmessungen der Halle B betragen 20 m x 30 m x 7 m, siehe Abbildung 4-15.

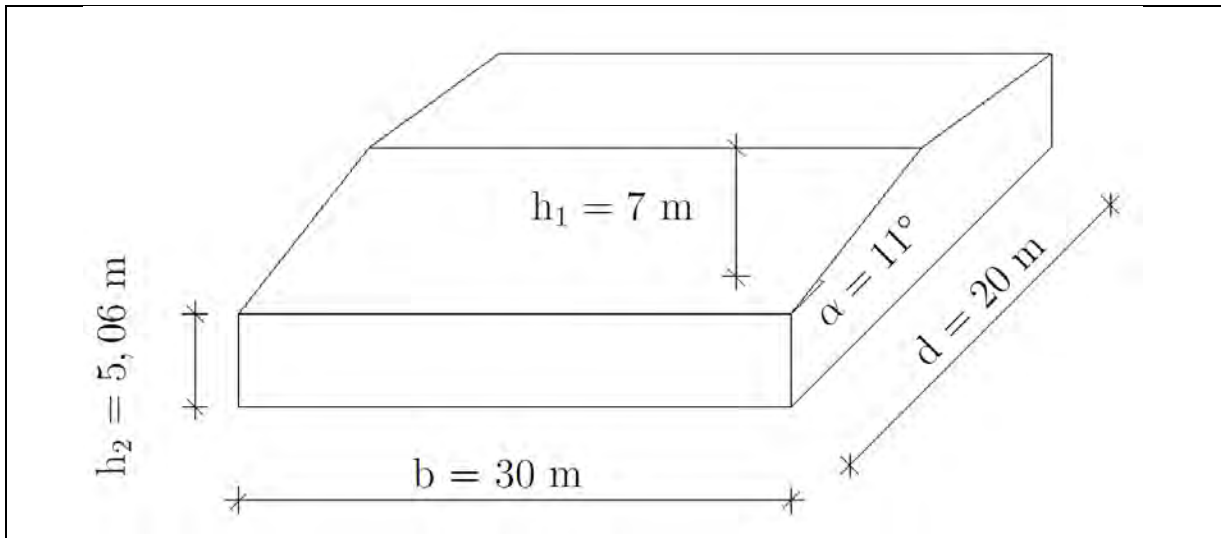
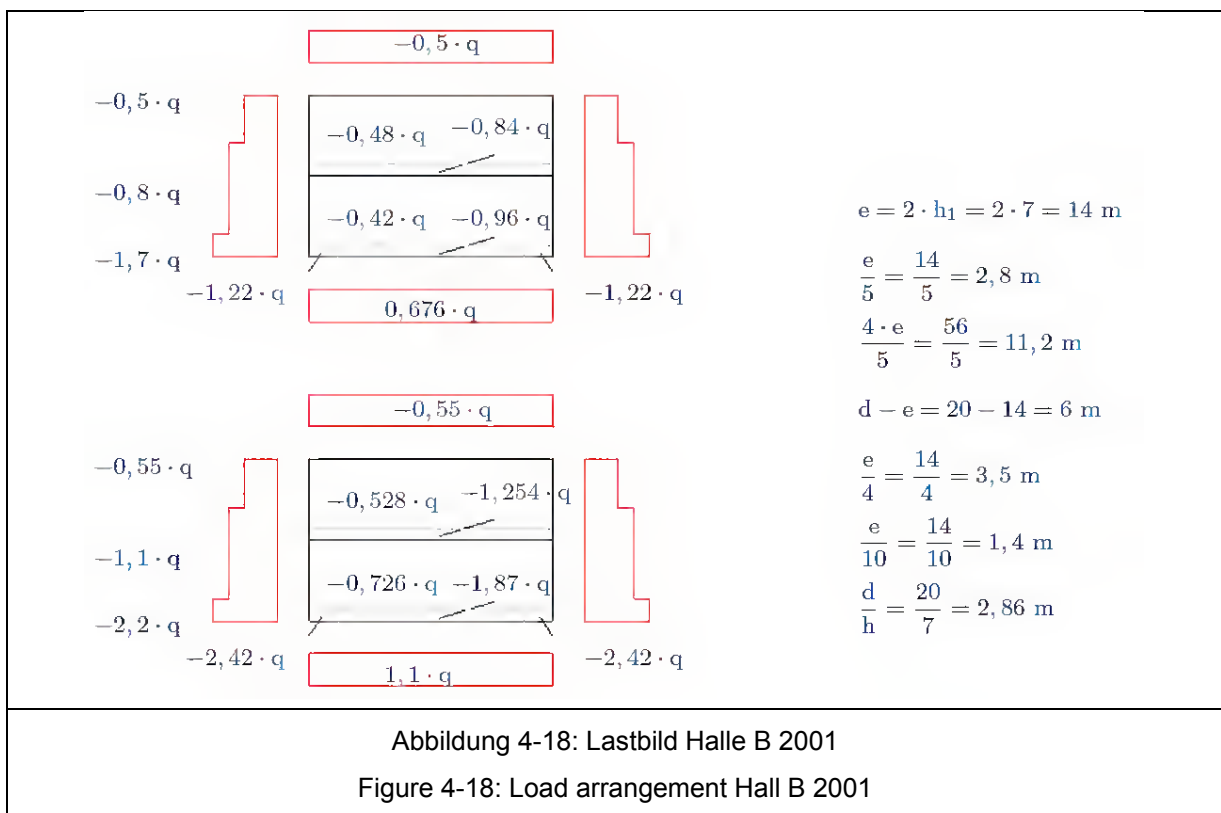
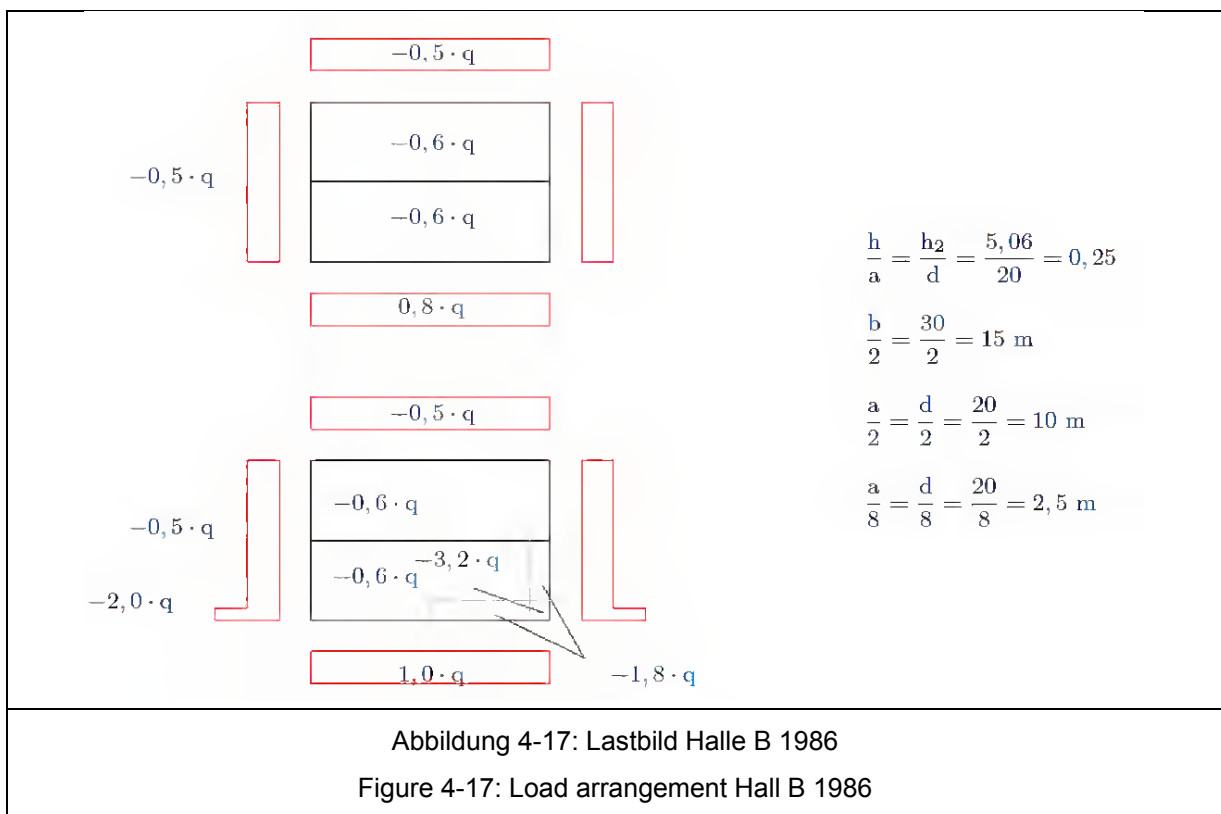


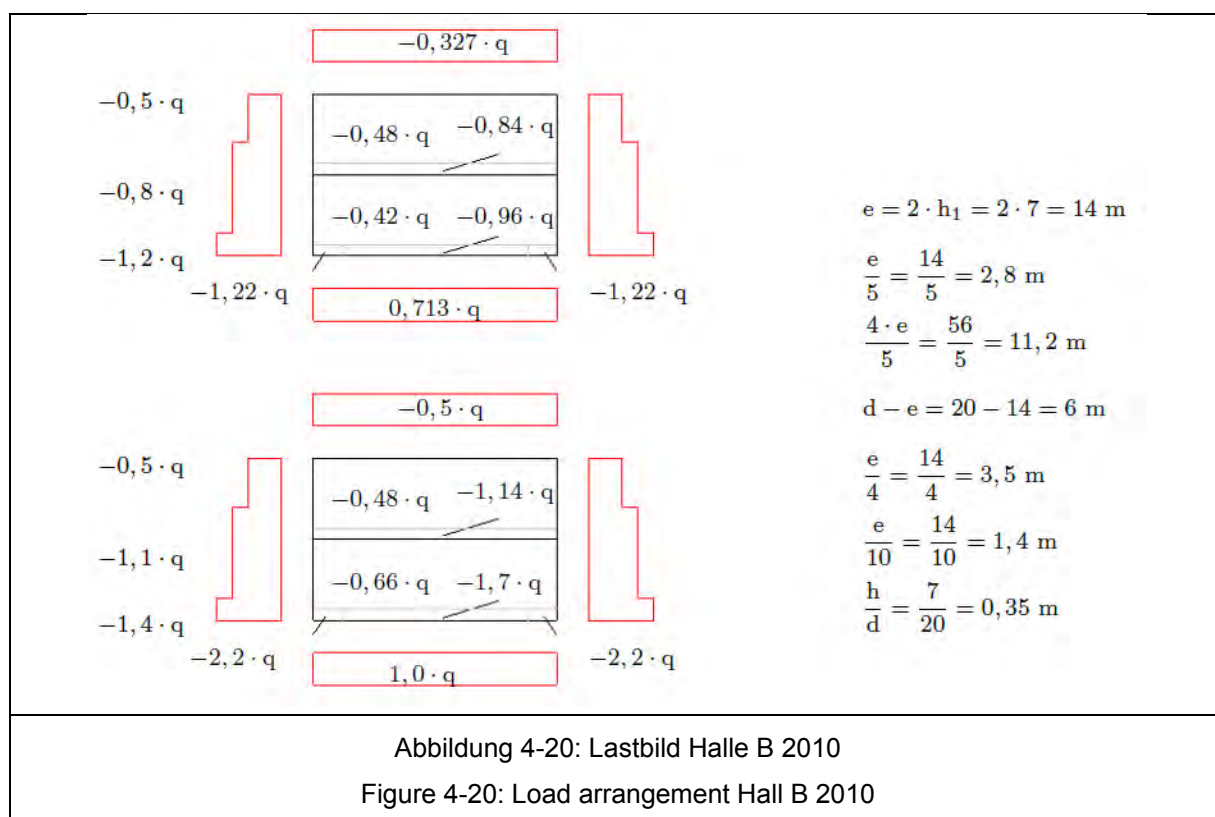
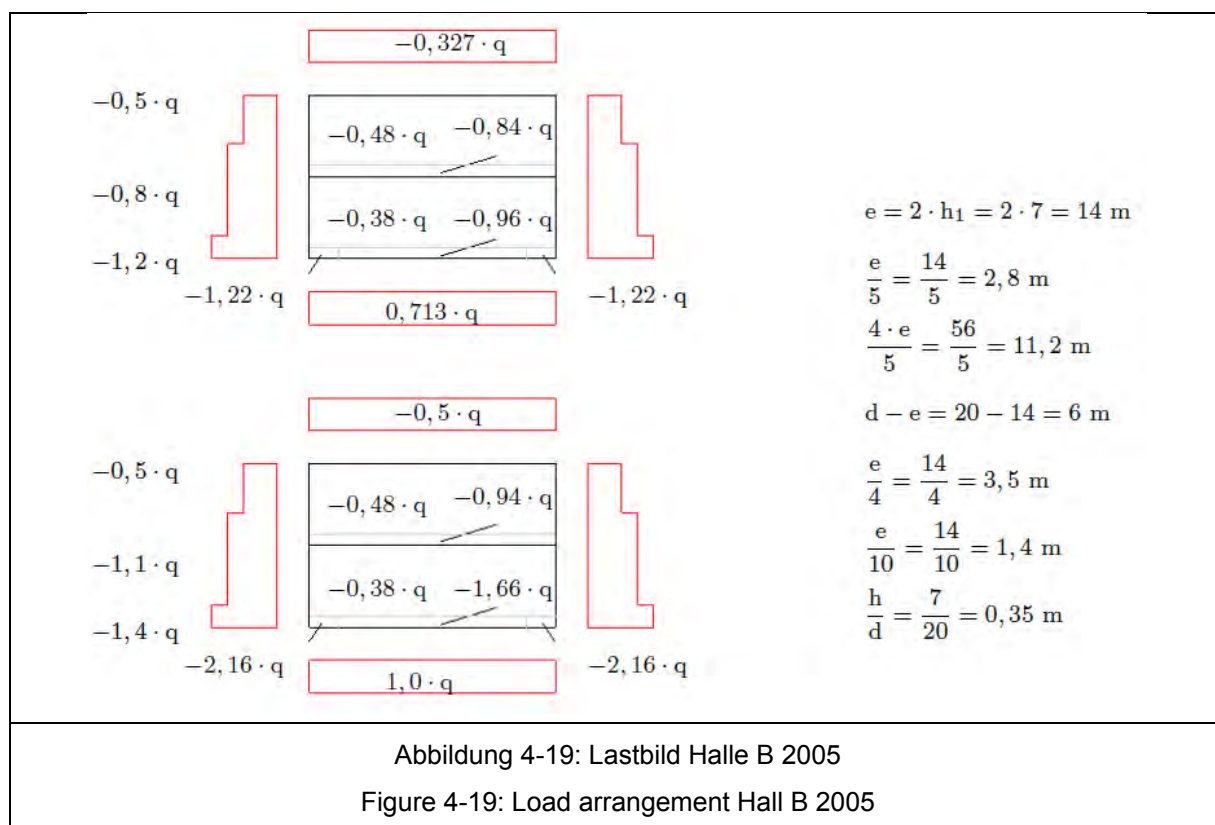
Abbildung 4-15: Geometrie Halle B
 Figure 4-15: Geometry Hall B

Unter der Annahme, dass der Wind senkrecht auf die längere Gebäudeseite trifft, ergeben sich nach unterschiedlichen Normen folgenden Lastbilder (auch hier links bzw. oben globale Betrachtung, rechts bzw. unten lokale Betrachtung): (vgl. Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-23)



Abbildung 4-16: Lastbild Halle B 1938
 Figure 4-16: Load arrangement Hall B 1938





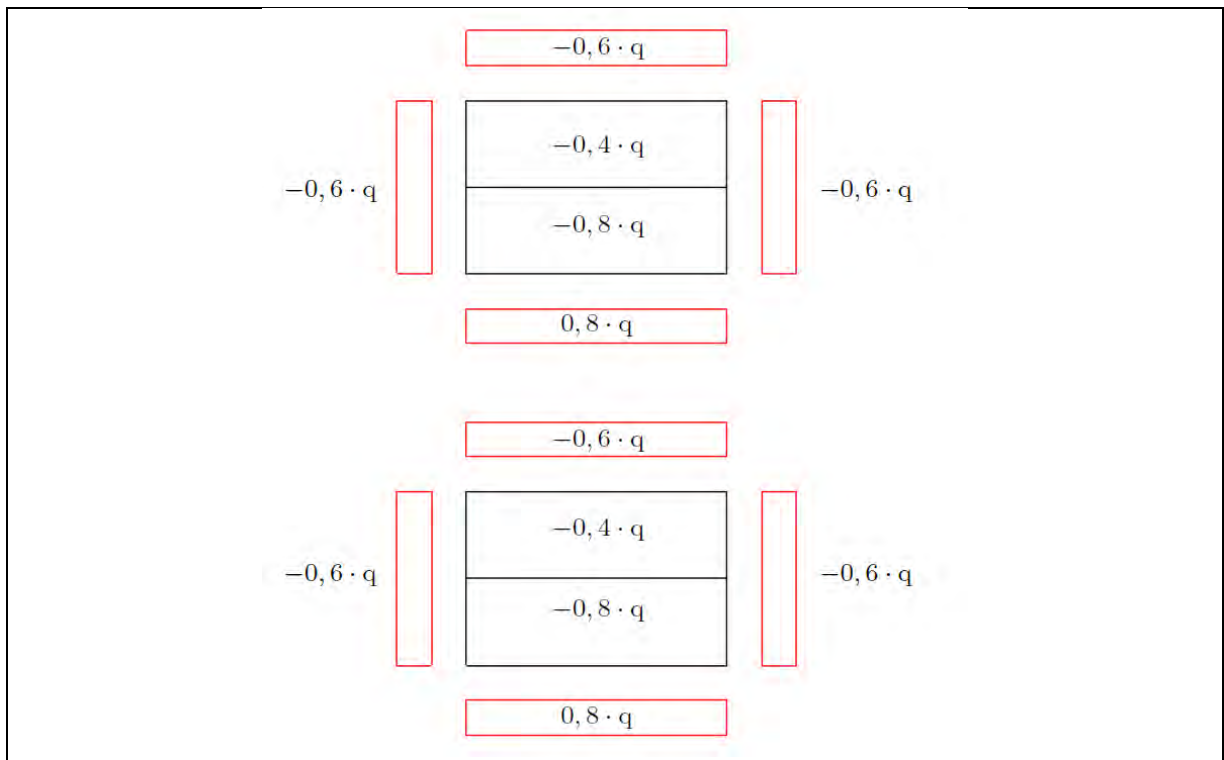


Abbildung 4-21: Lastbild Halle B TGL 1964
 Figure 4-21: Load arrangement Hall B TGL 1964

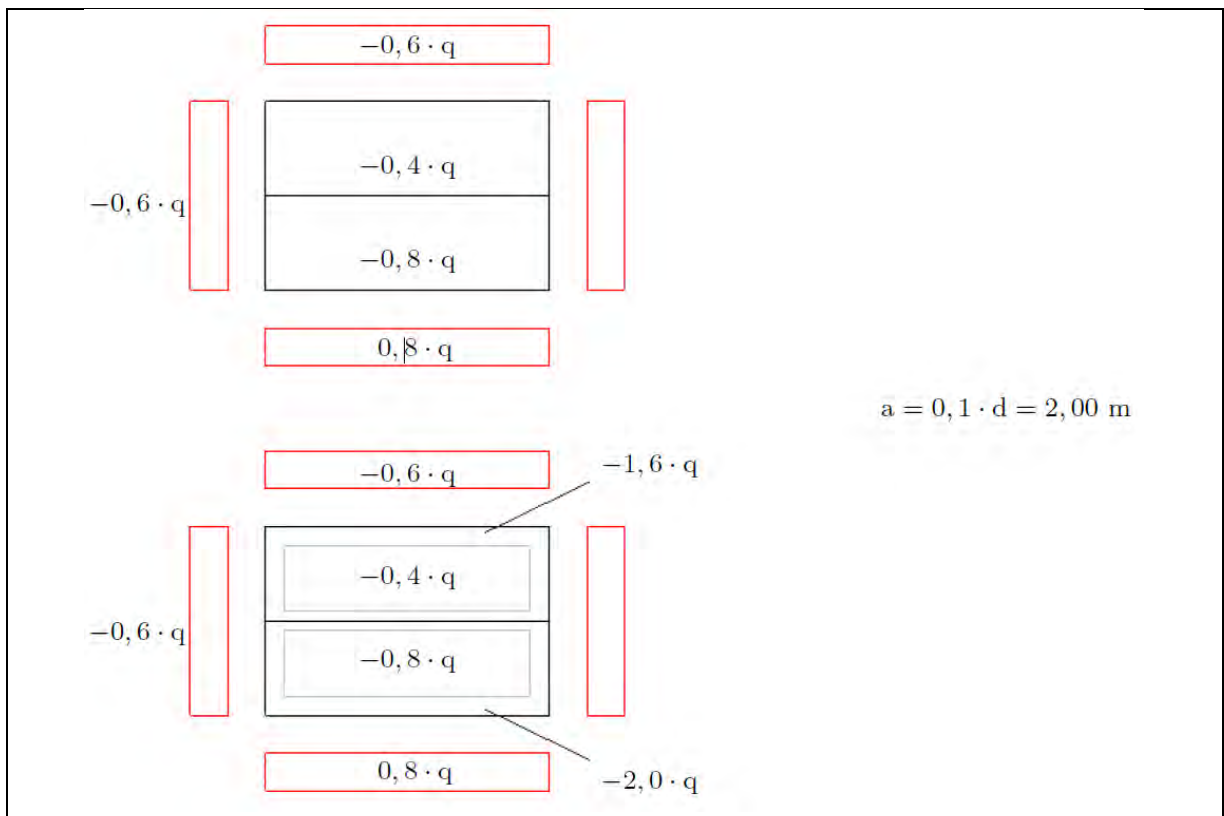
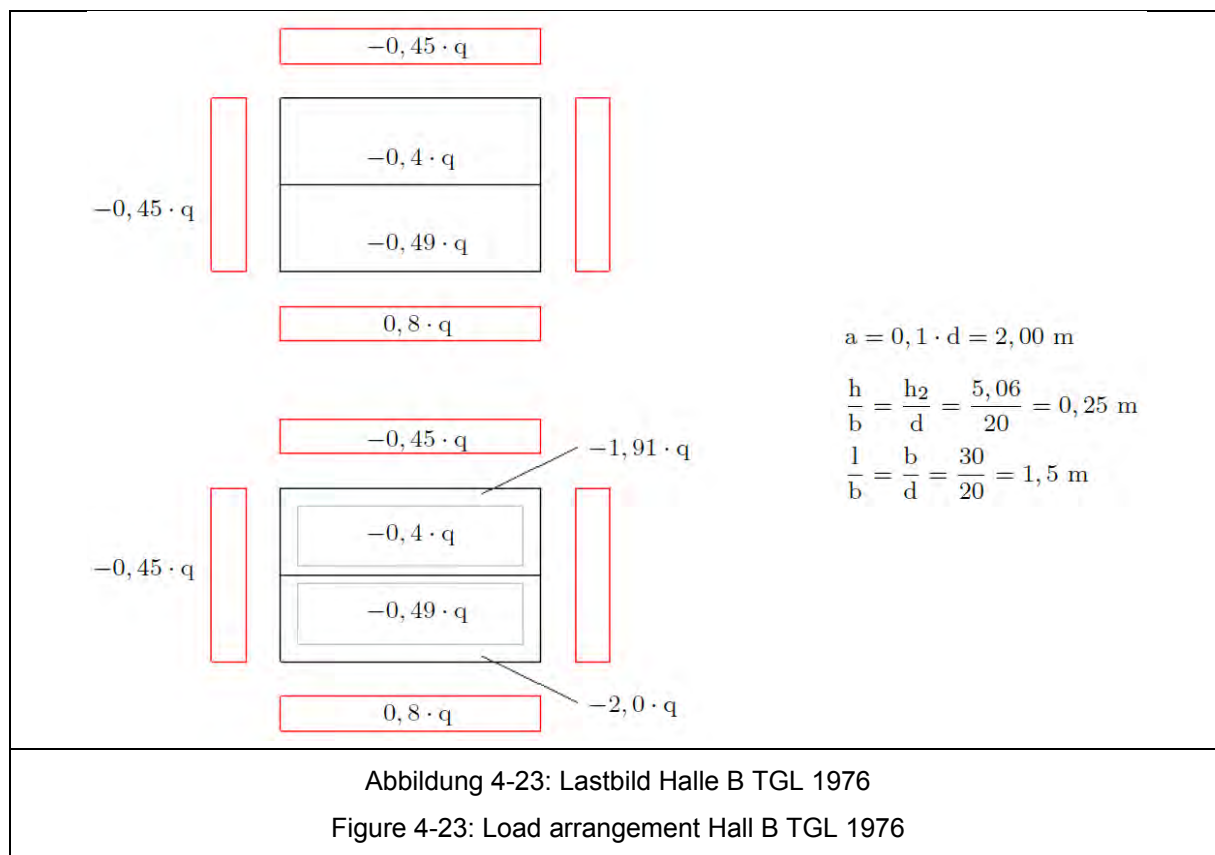
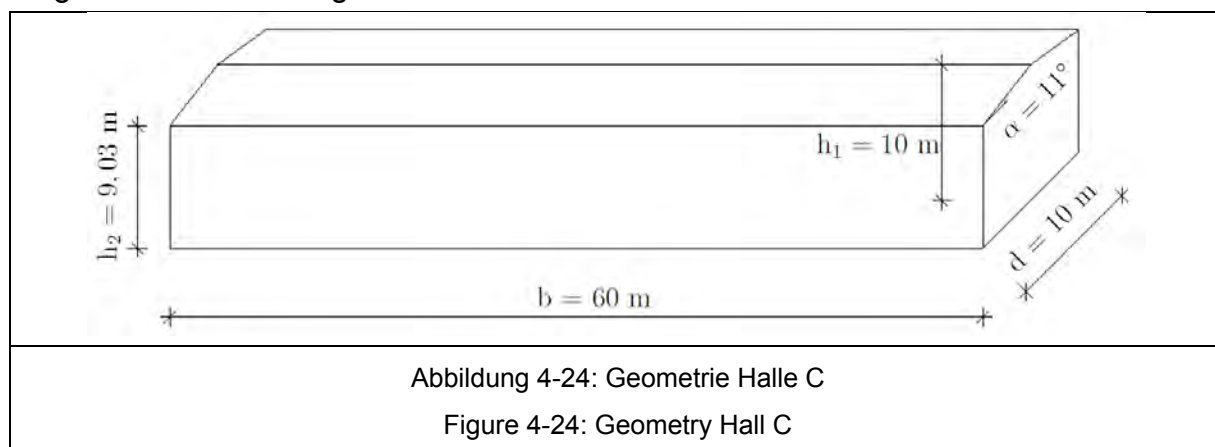


Abbildung 4-22: Lastbild Halle B TGL 1971
 Figure 4-22: Load arrangement Hall B TGL 1971

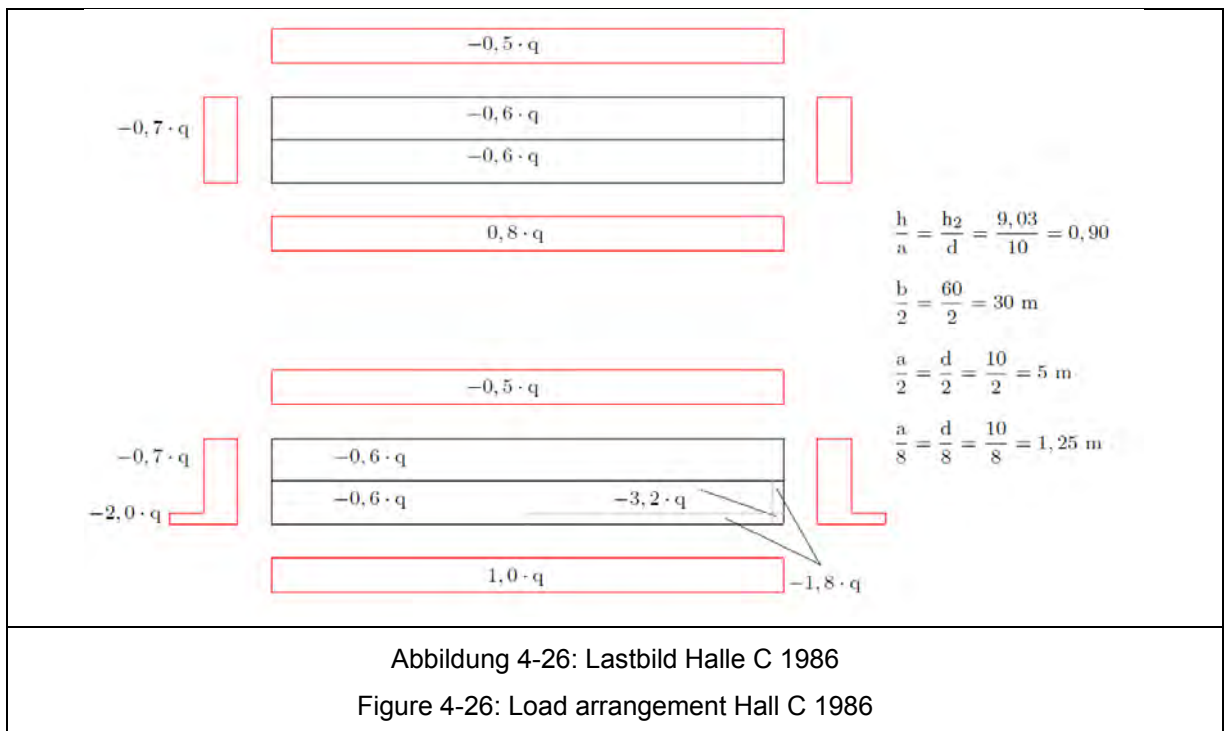
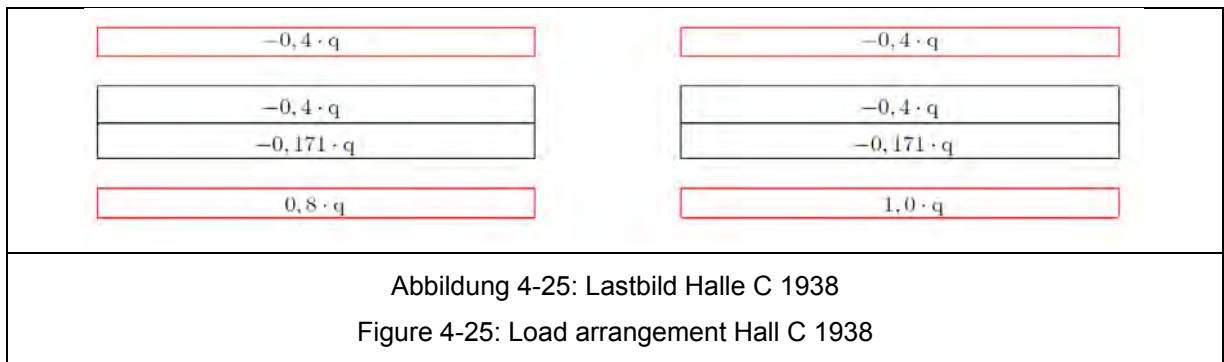


4.1.4.4 Geometrie und Lastbilder Halle C Geometry and load arrangement Hall C

Die Halle C hat Abmessungen von 10 m x 60 m x 10 m, siehe Abbildung 4-24. Bei der Berechnung der Windlast nach Eurocode und DIN 1055-4:2001 und 2005 entfällt aufgrund der Gebäudegeometrie der C-Bereich.



Nachfolgend sind links bzw. oben die globalen Beanspruchungen und rechts bzw. unten die lokalen Beanspruchungen dargestellt: (vgl. Abbildung 4-25 bis Abbildung 4-32)



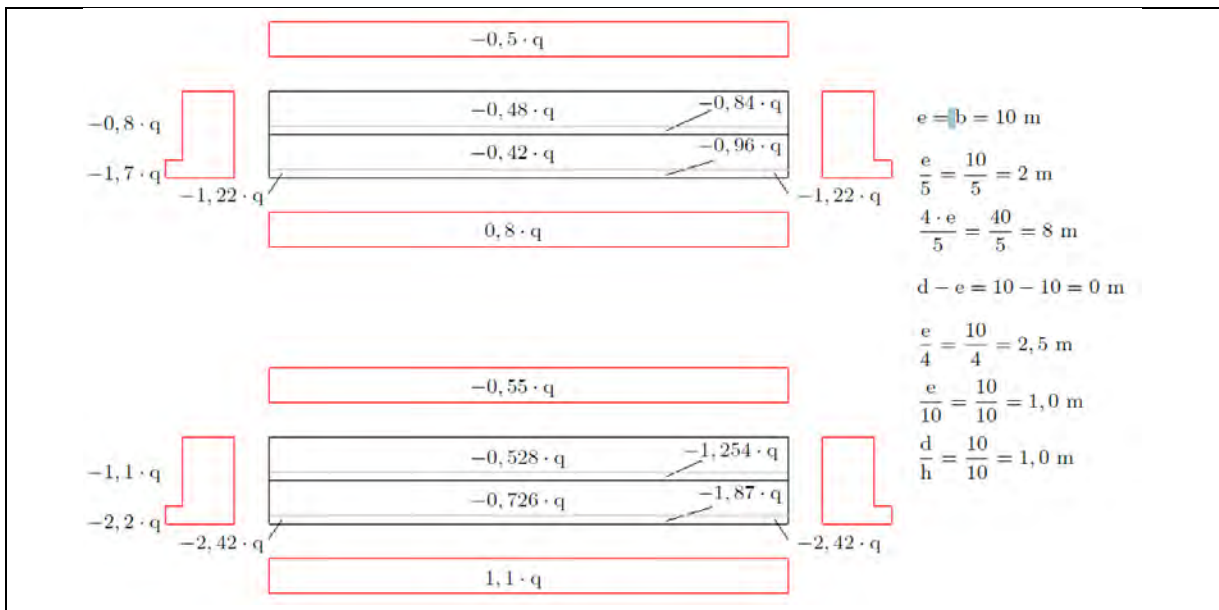


Abbildung 4-27: Lastbild Halle C 2001
 Figure 4-27: Load arrangement Hall C 2001

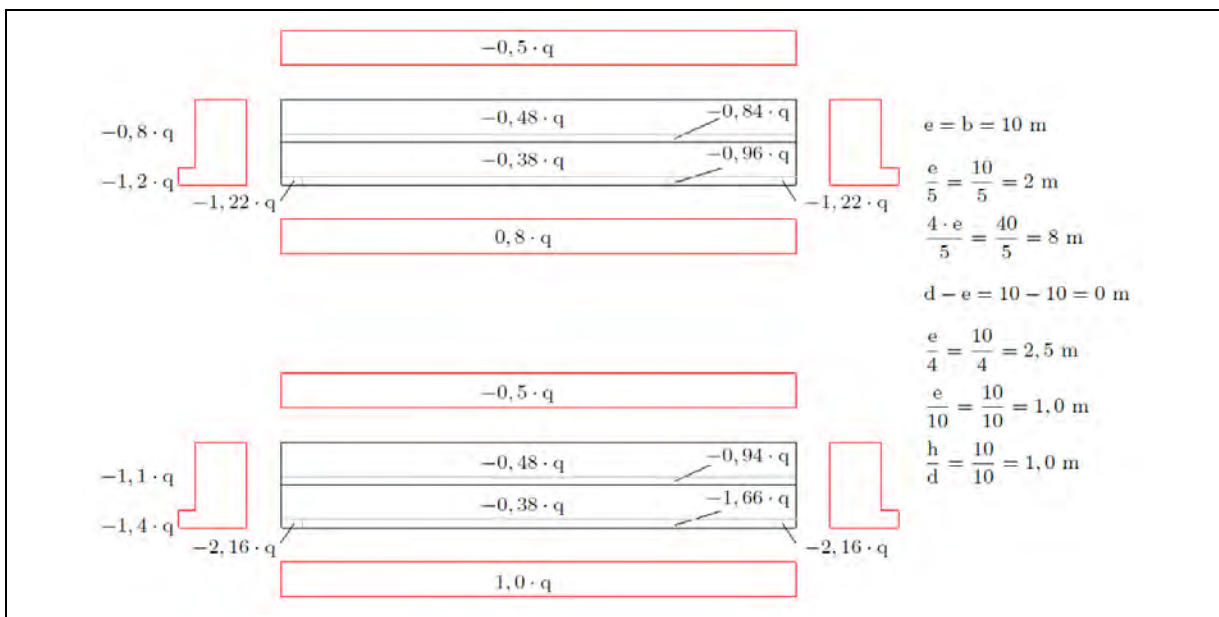


Abbildung 4-28: Lastbild Halle C 2005
 Figure 4-28: Load arrangement Hall C 2005

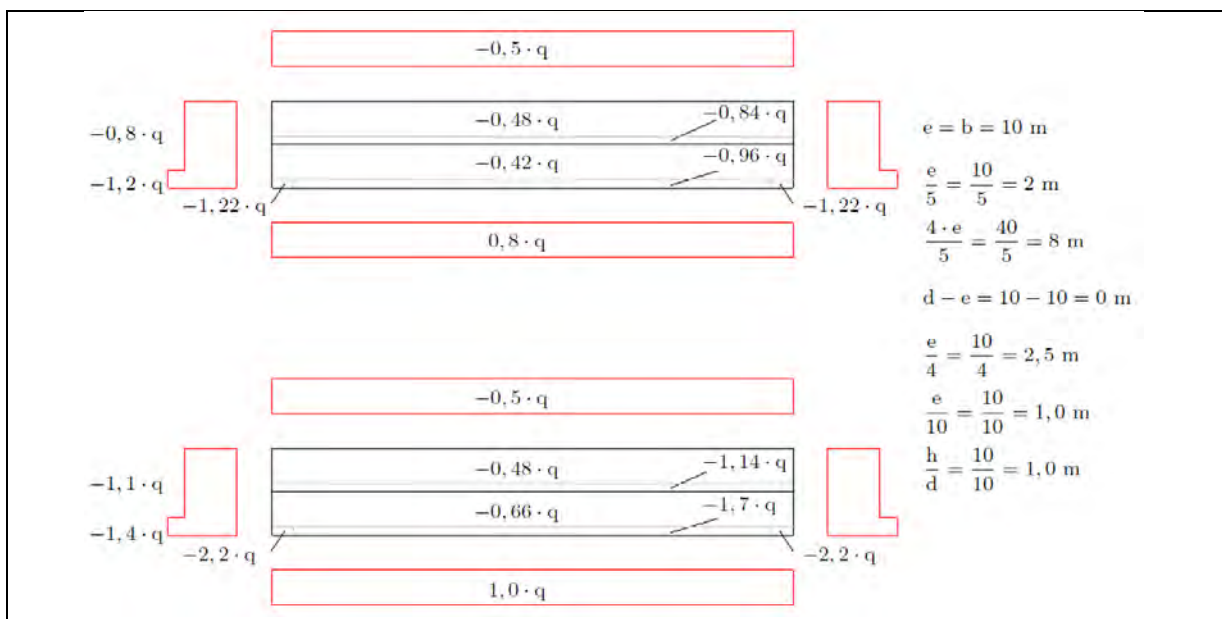


Abbildung 4-29: Lastbild Halle C 2010
 Figure 4-29: Load arrangement Hall C 2010

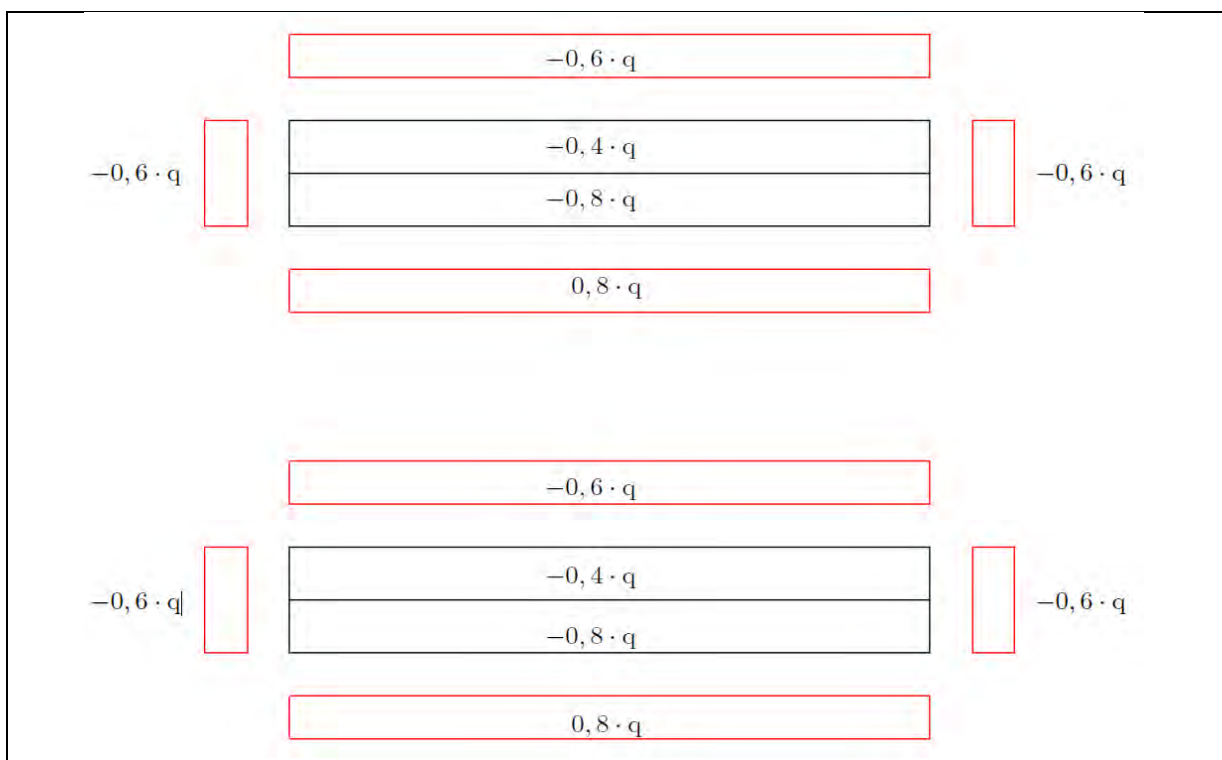
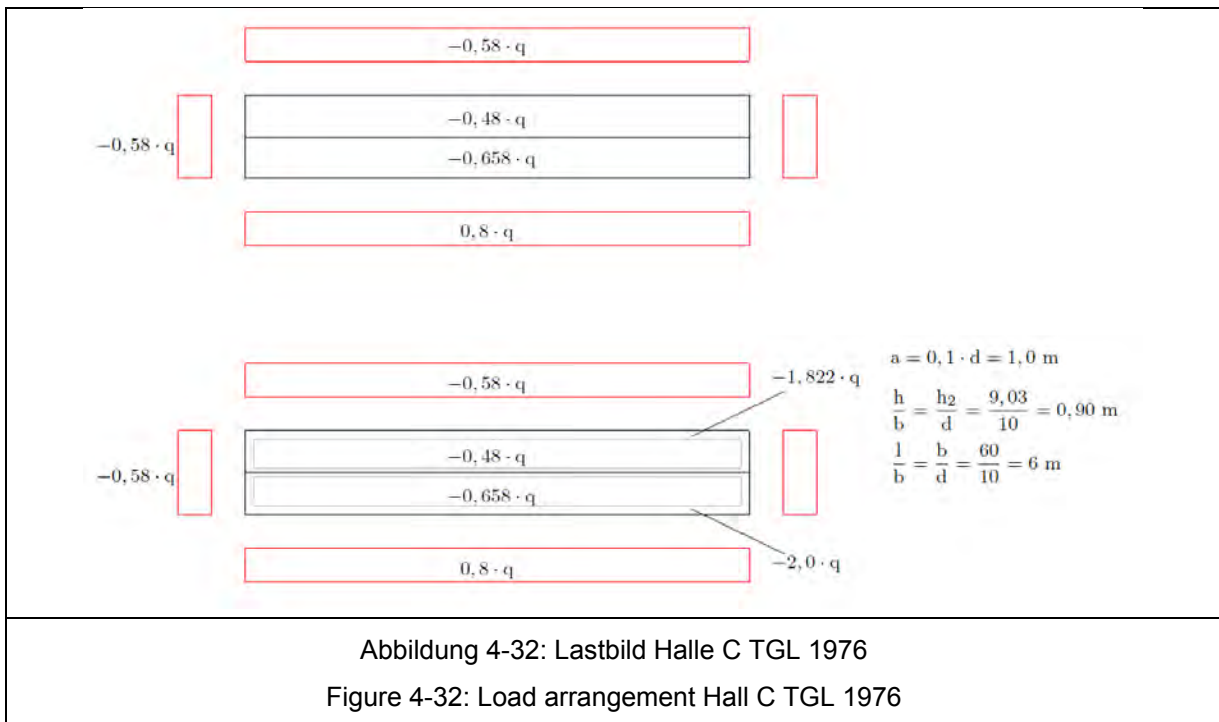
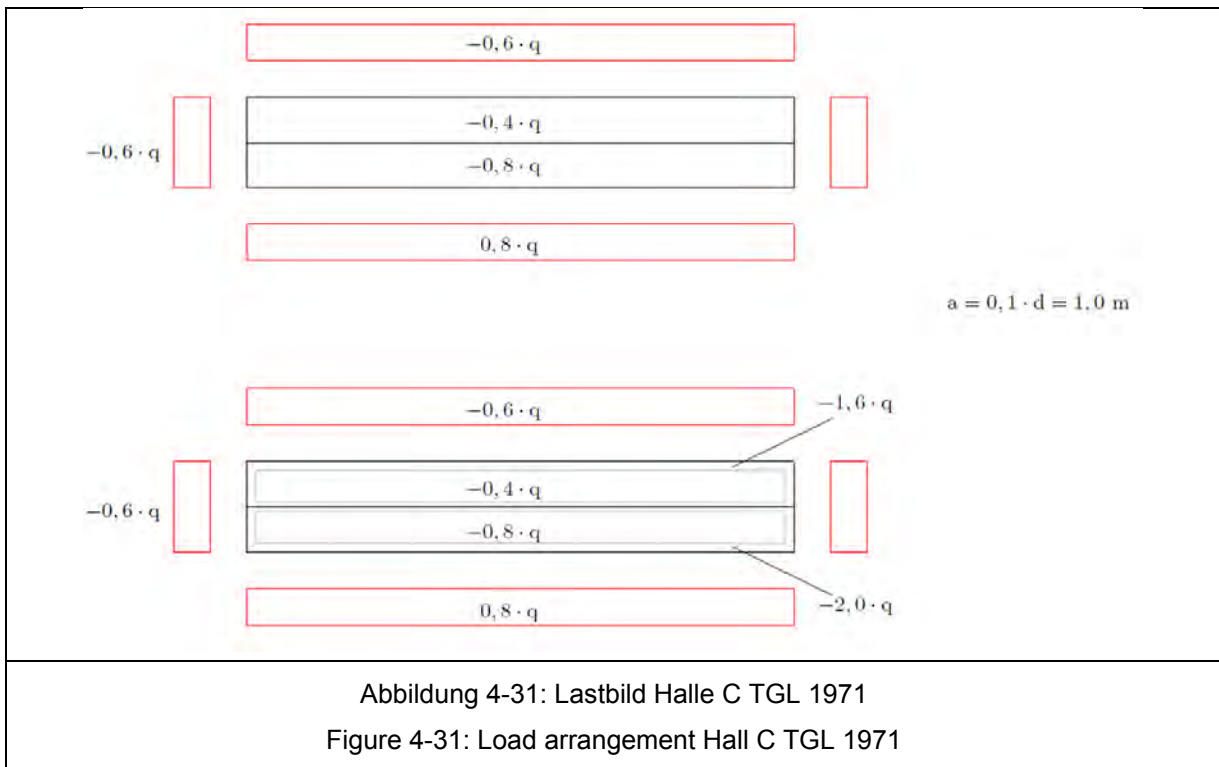


Abbildung 4-30: Lastbild Halle C TGL 1964
 Figure 4-30: Load arrangement Hall C TGL 1964



**4.1.4.5 Auswertung
 Analysis**

In den folgenden Diagrammen wird die Entwicklung der charakteristischen Windlast auf die einzelnen Gebäudebereiche der unterschiedlichen Beispielgebäude in Abhängigkeit von der Windzone nach aktuellem Eurocode dargestellt.

Die folgende Auswertung erfolgt anhand der Notation des Eurocodes. Das bedeutet beispielsweise für den Vergleich zwischen den TGLs ab 1971 und dem Eurocode, dass die c_s -Werte auf die Bereiche angesetzt werden, die den F-, G- und J-Bereichen entsprechen.

Bei der Auswertung wird lediglich der Fall berücksichtigt, dass Wind senkrecht auf die Gebäudelängsseite trifft, da dies die höheren Windlasten ergibt. Da in der Normausgabe von 1938 keine Belastung anzusetzen ist, wenn die Wand parallel zum Wind verläuft, wird an diesen Wänden ebenfalls der Windsog für senkrechte Flächen angesetzt, um einen Vergleich mit den nachfolgenden Normen zu ermöglichen. Die Sogspitzen im Firstbereich der Hallen nach TGL dürfen auf Grund der Dachneigung vernachlässigt werden. In dieser Auswertung werden die Sogspitzen dennoch angesetzt, um einen Vergleich zum J-Bereich des Eurocodes zu haben. Mögliche Abminderungen aufgrund der Bauwerksumgebung werden hier nicht berücksichtigt. Beim Vergleich zwischen der DIN 1055-4: 2001 und dem Eurocode ist darauf zu achten, dass sich die Windzongrenzen verschoben haben. Der Vergleich hat seine Gültigkeit also nur bei Bauwerken die nach beiden Normen der gleichen Windzone zugeordnet werden.

Zunächst werden beispielhaft die anzusetzenden Windlasten für die globale Bemessung der Halle A in Westdeutschland dargestellt. Die anzusetzenden Windlasten für die lokale Bemessung von Halle A, Halle A in Ostdeutschland und die anzusetzenden Windlasten (global und lokal) der Hallen B und C sind in Anhang B1 dargestellt.

1. Windlast auf Wände für die globale Bemessung Halle A in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010

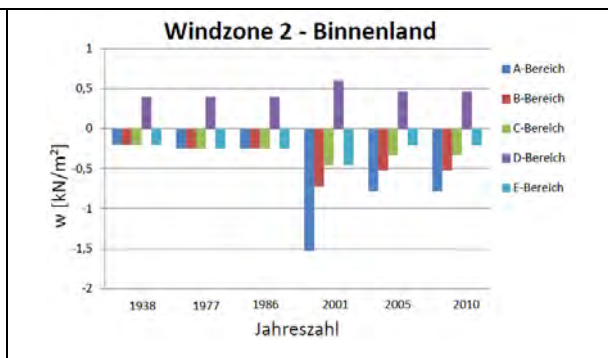
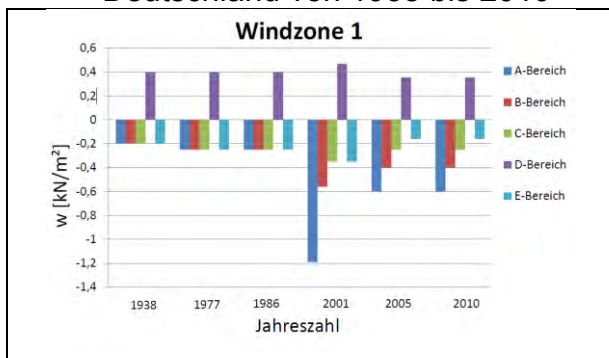


Abbildung 4-33: Windlastentwicklung Windzone 1 (Wände)

Figure 4-33: Wind load development Windzone 1 (walls)

Abbildung 4-34: Windlastentwicklung Windzone 2 Binnenland (Wände)

Figure 4-34: Wind load development Windzone 2 Inland (walls)

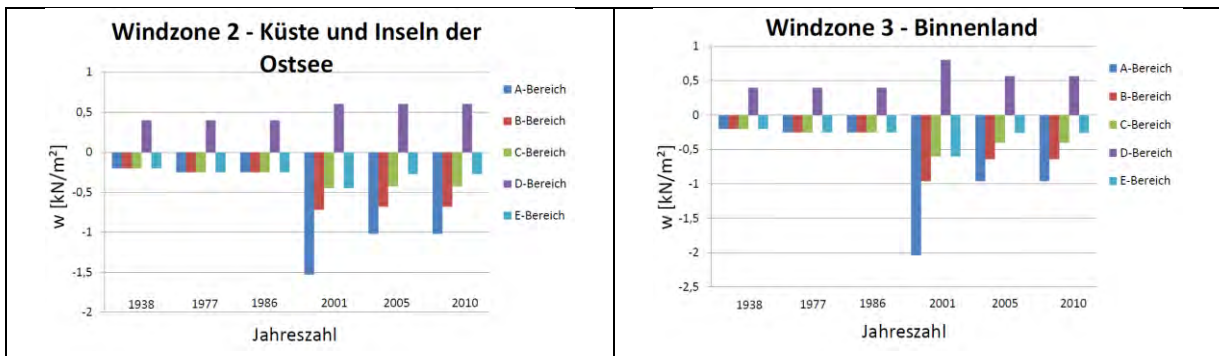


Abbildung 4-35: Windlastentwicklung Windzone 2 Küste und Inseln Ostsee (Wände)
 Figure 4-35: Wind load development Windzone 2 Coast and islands Baltic Sea (walls)

Abbildung 4-36: Windlastentwicklung Windzone 3 Binnenland (Wände)
 Figure 4-36: Wind load development Windzone 3 Inland (walls)

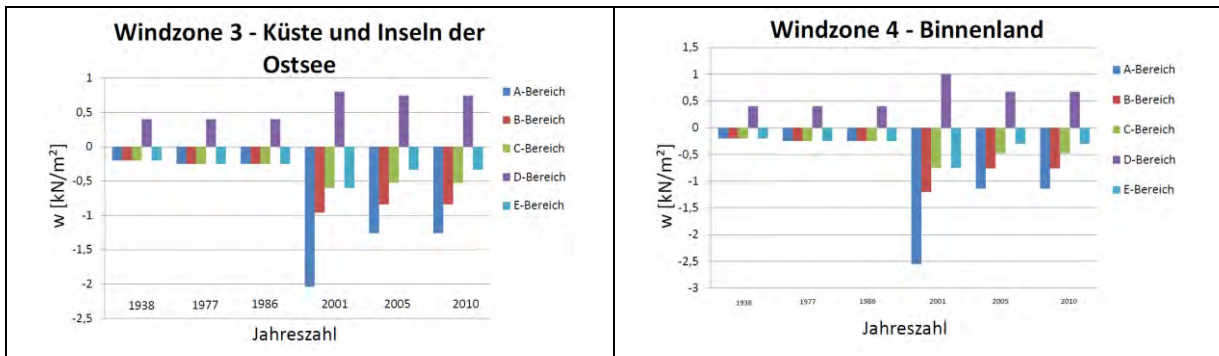


Abbildung 4-37: Windlastentwicklung Windzone 3 Küste und Inseln Ostsee (Wände)
 Figure 4-37: Wind load development Windzone 3 Coast and islands Baltic Sea (walls)

Abbildung 4-38: Windlastentwicklung Windzone 4 Binnenland (Wände)
 Figure 4-38: Wind load development Windzone 4 Inland (walls)

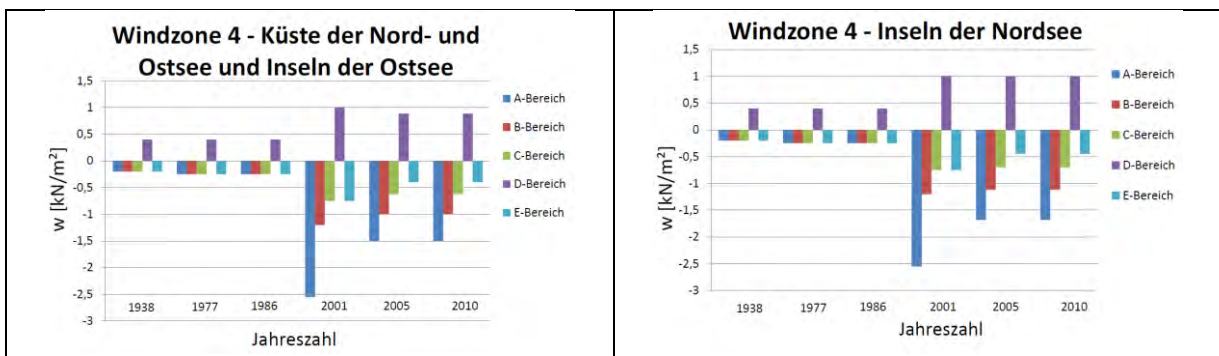
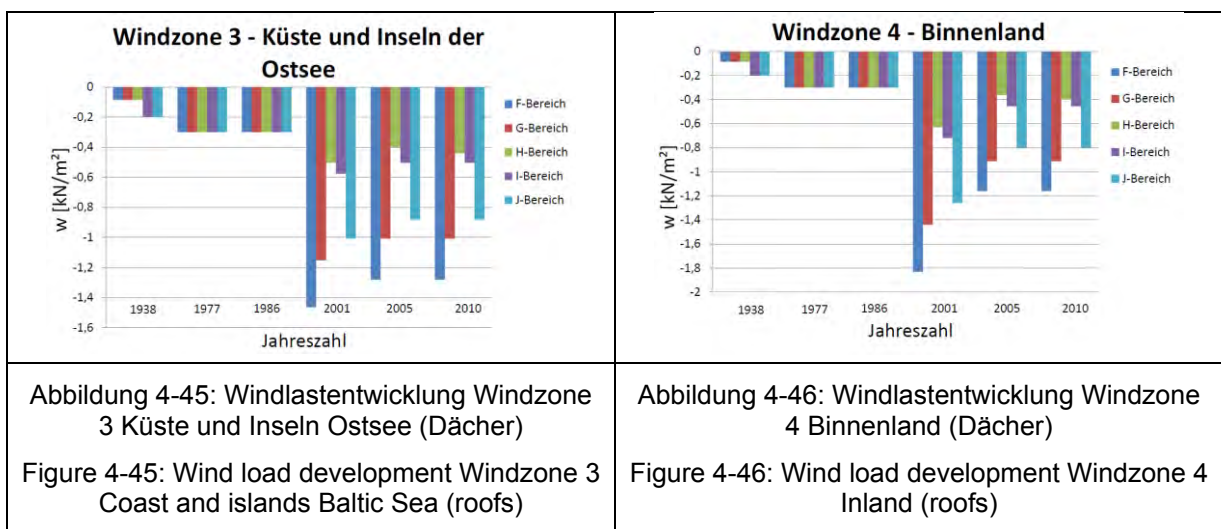
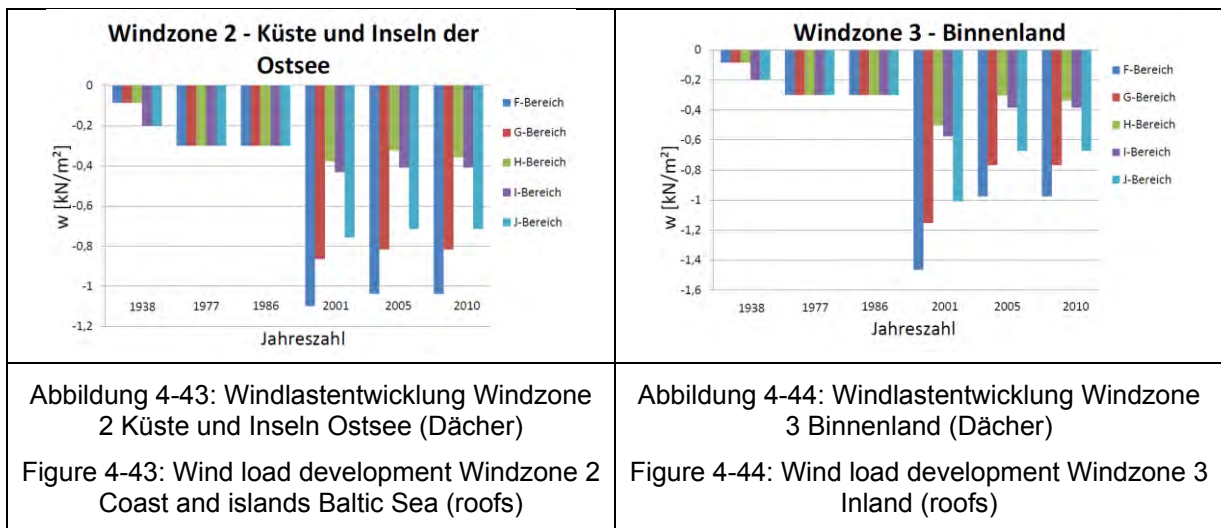
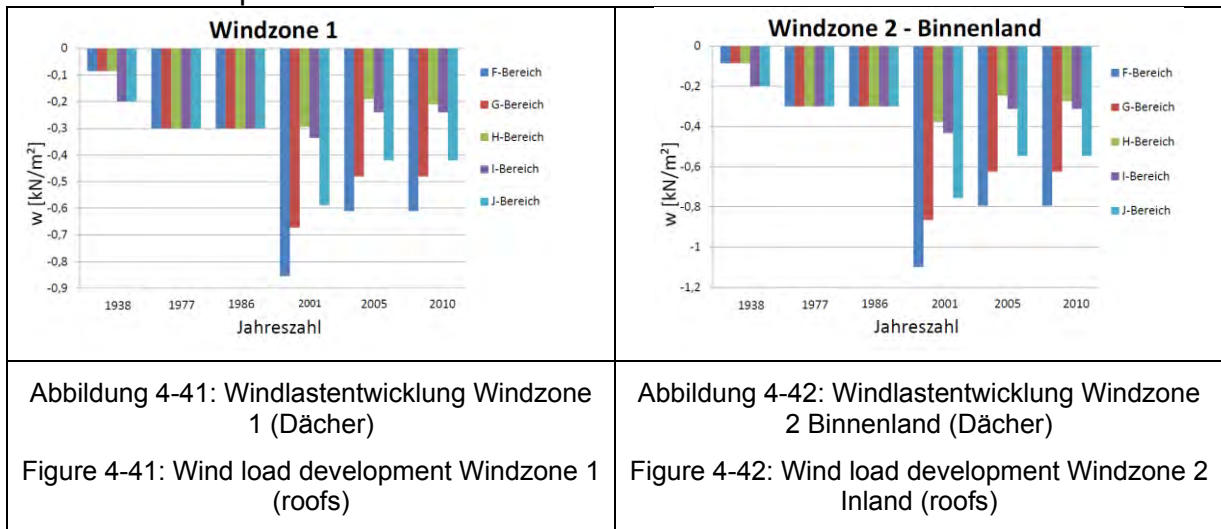
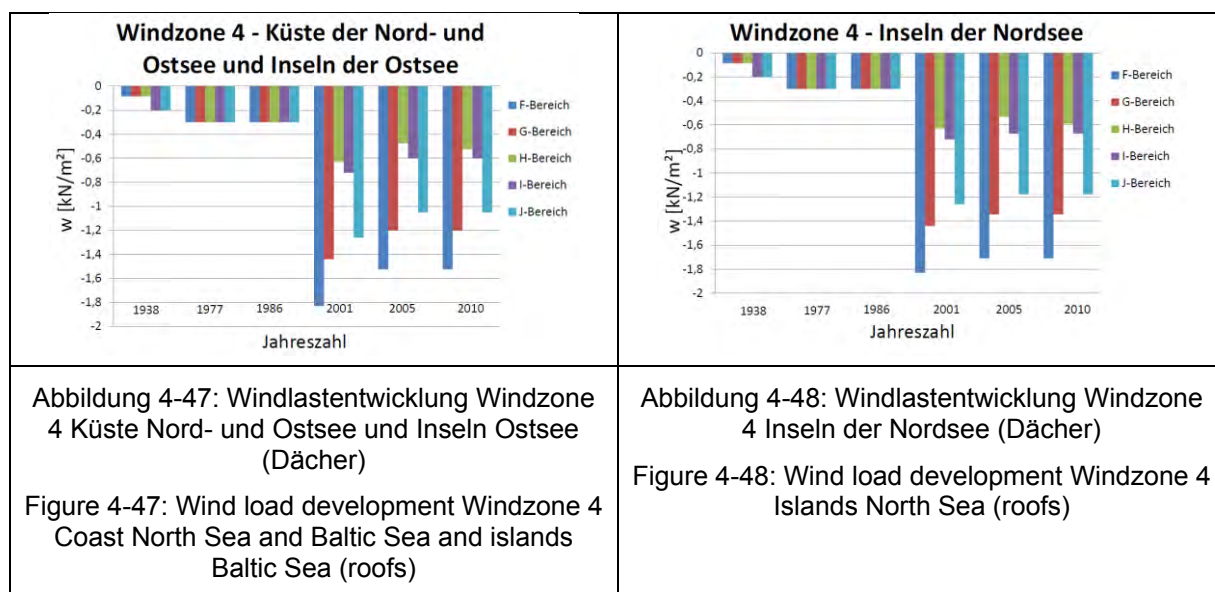


Abbildung 4-39: Windlastentwicklung Windzone 4 Küste Nord- und Ostsee und Inseln Ostsee (Wände)
 Figure 4-39: Wind load development Windzone 4 Coast North Sea and Baltic Sea and islands Baltic Sea (walls)

Abbildung 4-40: Windlastentwicklung Windzone 4 Inseln der Nordsee (Wände)
 Figure 4-40: Wind load development Windzone 4 Islands North Sea (walls)

2. Windsoglast auf Dächern für die globale Bemessung Halle A in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010





Nach Auswertung und Analyse dieser und der im Anhang dargestellten Diagramme wird festgestellt, dass keine pauschale Umrechnung zwischen den einzelnen Normausgaben möglich ist. Die parallel zur Anströmrichtung verlaufenden Wandflächen (Bereiche A, B und C) und die Randbereiche der Dachflächen (F, G und J) werden nach aktueller Norm teilweise deutlich höher beansprucht. Auch in den Windzonen 3 und 4 wurden die Lastannahmen in allen Bereichen teilweise deutlich erhöht. Hier muss im Sanierungsfall geprüft werden, ob und wie die Gebäudehülle statisch ertüchtigt werden kann.

Die Auswertungen der drei Beispielhallen liefern gute Anhaltswerte für eine baupraktische Anwendung. Planer können so einfach die Veränderung der Windlastannahmen abschätzen. Dazu werden die folgenden Eingangsparameter benötigt:

- Gebäudegeometrie (ähnlich Halle A, Halle B oder Halle C)
- Gebäudestandort (Windzone nach Eurocode 1-1-4:2010-12 [69])
- Gebäudealter (auf Grundlage welcher Lastannahmen wurde bemessen)

Insgesamt wurden 808 Einzeldiagramme und 167 zusammenfassende Diagramme erstellt.

4.1.5 Umrechnungsverfahren für Hallen mit Flachdächern Calculation procedure for hall buildings with flat roofs

4.1.5.1 Vorbemerkungen Preface

Mit dem folgenden Verfahren können die Windlasten für die globale Bemessung von Hallen mit Flachdächern zwischen den DIN-Normen bis einschließlich 1986 und dem Eurocode in seiner aktuell gültigen Fassung umgerechnet werden.

Hinweis: Für Gebäude mit Satteldächern kann dieses Verfahren nicht angewendet werden, hier weichen die Berechnungskonzepte der unterschiedlichen Normausgaben zu sehr voneinander ab.

4.1.5.2 Umrechnungsverfahren
Calculation procedure

Die folgende Tabelle 4-11 zeigt den Umrechnungsfaktor ω_{1938} zwischen dem Staudruck nach DIN 1055-4:1938 und dem Geschwindigkeitsdruck nach Eurocode 1.

Tabelle 4-11: Umrechnungsfaktor ω_{1938}

Table 4-11: Factor ω_{1938}

h/d [-]	Umrechnungsfaktor ω_{1938}				
	Bereich A	Bereich B	Bereich C	Bereich D	Bereich E
≥ 5	3,500	2,000	1,250	1,000	1,250
1	3,000	2,000	1,250	1,000	1,250
$\leq 0,25$	3,000	2,000	1,250	0,875	0,750

Die folgende Tabelle 4-12 zeigt den Umrechnungsfaktor ω_{1986} zwischen dem Staudruck nach DIN 1055-4:1977-05 oder DIN 1055-4:1986-08 und dem Geschwindigkeitsdruck nach Eurocode 1.

Tabelle 4-12: Umrechnungsfaktor ω_{1986}

Table 4-12: Factor ω_{1986}

h/d [-]	Umrechnungsfaktor ω_{1986}				
	Bereich A	Bereich B	Bereich C	Bereich D	Bereich E
≥ 5	2,000	1,143	0,714	1,000	1,000
1	1,714	1,143	0,714	1,000	1,000
0,95	1,714	1,143	0,714	0,992	0,973
0,90	1,714	1,143	0,714	0,983	0,947
0,85	1,714	1,143	0,714	0,975	0,920
0,80	1,714	1,143	0,714	0,967	0,933
0,75	1,714	1,143	0,714	0,958	0,867
0,70	1,714	1,143	0,714	0,950	0,840
0,65	1,714	1,143	0,714	0,942	0,813
0,60	1,714	1,143	0,714	0,933	0,787
0,55	1,714	1,143	0,714	0,925	0,760
0,50	1,714	1,143	0,714	0,917	0,733
0,45	1,818	1,212	0,758	0,908	0,707
0,40	1,935	1,290	0,806	0,900	0,680
0,35	2,069	1,379	0,862	0,892	0,653
0,30	2,222	1,481	0,926	0,883	0,627
$\leq 0,25$	2,400	1,600	1,000	0,875	0,600

Zur Berücksichtigung der Gebäudehöhe müssen diese Faktoren mit einem weiteren Faktor ω_h angepasst werden. Der Faktor ω_h kann Tabelle 4-13 entnommen werden.

Tabelle 4-13: Korrekturfaktor ω_h

Table 4-13: Correction factor ω_h

Gebäudehöhe h [m]	Korrekturfaktor ω_h
0 – 8	1,0
8 – 10	0,625
10 – 18	0,8125
18 – 20	0,9375
20 – 25	0,6818

Der folgende Faktor ω_{wz} berücksichtigt die Windzone, in der sich das Bestandsgebäude nun befindet. Der Faktor ω_{wz} ist dabei auch abhängig von der Gebäudehöhe.

Tabelle 4-14: Korrekturfaktor ω_{wz}

Table 4-14: Correction factor ω_{wz}

Windzone und Unterzone		Korrekturfaktor ω_{wz}		
		Gebäudehöhe $h \leq 10 \text{ m}$	Gebäudehöhe $10 \text{ m} < h \leq 18 \text{ m}$	Gebäudehöhe $18 \text{ m} < h \leq 25 \text{ m}$
1	Binnenland	1,0	1,0	1,0
2	Binnenland	1,3	1,23	1,2
	Küste und Inseln der Ostsee	1,7	1,54	1,47
3	Binnenland	1,6	1,46	1,47
	Küste und Inseln der Ostsee	2,1	1,85	1,733
4	Binnenland	1,9	1,77	1,733
	Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	2,154	2,154	2,07
	Inseln der Nordsee	2,8	-	-

Die Umrechnung der Windbelastung w zwischen DIN 1055-1-4:1938-06 und DIN EN 1991-1-4:2010-12 (Eurocode 1-1-4) erfolgt gemäß der folgenden Gleichung:

$$W_{2010} = W_{1938} \cdot \omega_{1938} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz} \quad \text{Gl. 4-17}$$

Die Umrechnung der Windbelastung w zwischen DIN 1055-1-4:1977 oder DIN 1055-1-4:1986 und DIN EN 1991-1-4:2010-12 (Eurocode 1-1-4) erfolgt analog gemäß der folgenden Gleichung:

$$W_{2010} = W_{1986} \cdot \omega_{1986} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz} \quad \text{Gl. 4-18}$$

4.1.5.3 Beispiel Example

Für eine 1990 erbaute Halle mit Grundriss der Halle B aus dem vorangegangenen Abschnitt (siehe Abbildung 4-15) und Gebäudehöhe 7,0 m soll die Änderung der Windlast an der Gebäudeecke (Bereich A) bestimmt werden. Annahme: Das Gebäude steht in Windzone 4 Binnenland.

Bei einem h/d -Verhältnis von
 $7,00 \text{ m} / 20,00 \text{ m} = 0,35$

beträgt der Umrechnungsfaktor ω_{1986} für den Bereich A gemäß Tabelle 4-12

$$\omega_{1986} = 2,069.$$

Da die Gebäudehöhe 7,0 m beträgt, ist

$$\omega_h = 1,0.$$

Für ein Bauwerk in der Windzone 4 Binnenland ergibt sich

$$\omega_{wz} = 1,9.$$

Folglich beträgt die Änderung der Windlast im Bereich A

$$W_{2010} = W_{1986} \cdot \omega_{1986} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz}$$

$$w_{2010} = w_{1986} \cdot 2,069 \cdot 1,0 \cdot 1,9$$

$$w_{2010} = w_{1986} \cdot 3,9311$$

Gl. 4-19

Hier muss die ursprüngliche Windsoglast von - 0,29 kN/m² nach DIN 1055-1-4:1986-08 mit dem Faktor 3,9311 auf - 1,14kN/m² nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 (Eurocode 1-1-4) erhöht werden.

4.1.6 Entwicklung der Schneelastnormen Evolution of snow load standards

4.1.6.1 DIN 1055-5:1936-12 DIN 1055-5:1936-12

In DIN 1055-5:1936-12 [59] wird die anzusetzende Schneelast in Abhängigkeit von der Dachneigung angeben und kann der folgenden Tabelle 4-15 entnommen werden.

Tabelle 4-15: Schneelast S nach [59]
 Table 4-15: Snow load S according to [59]

Dachneigung α [°]	Schneelast S [kg/m ²]
20	75
25	70
30	65
35	60
40	55
45	50
50	45
55	40
60	35
> 60	0

Zusätzlich wird auf die mögliche Gefahr der Schneesackbildung hingewiesen und darauf, dass diese Werte bei Bauwerken, welche in Gebirgen errichtet werden, anzupassen sind. Außerdem müssen die Lastfälle „volle“ - und „einseitige Schneelast“ untersucht werden.

4.1.6.2 DIN 1055-5:1975-06 DIN 1055-5:1975-06

In der Normausgabe von 1975 [63] ändert sich die Einheit der Schneelast von kg/m² in kN/m² (Umrechnung Faktor 10⁻²). Der Rechenwert der Schneelast ergibt sich aus der Regelschneelast s₀ und einem Abminderungsfaktor k_s zu:

$$s = k_s \cdot s_0$$

Gl. 4-20

Der Abminderungsfaktor k_s ist abhängig von der Dachneigung. Dieser kann entweder rechnerisch bestimmt werden mit

$$k_s = 1 - \frac{\alpha - 30^\circ}{40^\circ} \quad \text{Gl. 4-21}$$

oder entsprechenden Tabellen entnommen werden. Der Faktor k_s ist dabei wie folgt beschränkt.

$$0 \leq k_s \leq 1$$

Bei der Untersuchung einseitig angreifender Schneelast ist einseitig keine Schneelast anzusetzen, auf der anderen Seite der halbe Wert der Schneelast. Schneeanhäufungen sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Regelschneelast gibt die Norm in Abhängigkeit der Geländehöhe und der Schneelastzone, in der sich das Bauwerk befindet, an. Die entsprechende Schneelastzonenkarte ist in der Norm angedruckt. Die Regelschneelast nach [63] kann der folgenden Tabelle 4-16 entnommen werden.

Tabelle 4-16: Regelschneelast s_0 nach [63]

Table 4-16: Usually snow load s_0 according to [63]

Geländehöhe des Bauwerkstandorts über NN [m]	Schneelast s_0 [kN/m ²]			
	Schneelastzone			
	I	II	III	IV
≤ 200	0,75	0,75	0,75	1,00
300	0,75	0,75	0,75	1,15
400	0,75	0,75	1,00	1,55
500	0,75	0,90	1,25	2,10
600	0,85	1,15	1,60	2,60
700	1,05	1,50	2,00	3,25
800	1,05	1,85	2,55	3,90
900		2,30	3,10	4,65
1000			3,80	5,50

Eine Überlagerung von Schnee- und Windlast erfolgt durch eine der folgenden Kombinationen. Hierbei ist der größere Wert maßgebend.

$$s + \frac{w}{2} \quad \text{Gl. 4-22}$$

$$\frac{s}{2} + w$$

4.1.6.3 DIN 1055-5:1994-04 DIN 1055-5:1994-04

Im Jahr 1994 wird die Schneelastzonenkarte um die Bereiche der ehemaligen DDR erweitert. Die Schneelastzonen in Westdeutschland werden gegenüber der Normausgabe von 1975 geringfügig verändert. Die entsprechende Schneelastzonenkarte kann [64] entnommen werden.

**4.1.6.4 DIN 1055-5:2001-04
 DIN 1055-5:2001-04**

Im Entwurf der DIN 1055-5:2001-04 [70] wird die Schneezonenkarte unter Berücksichtigung zu diesem Zeitpunkt aktueller Messdaten überarbeitet. In diesem Entwurf wird zwischen „mitteleuropäischen“ und „alpinen“ Regionen unterschieden. Für die „alpinen Regionen“ gibt es eine gesonderte Schneezonenkarte.

Die charakteristische Schneelast auf dem Boden wird in Abhängigkeit von der Geländehöhe und der Schneezone bestimmt. Dabei gibt es für mitteleuropäische und alpine Regionen unterschiedliche Berechnungsansätze:

Mittleuropäische Regionen	$s_k = (0,13 + 0,264 \cdot (Z - 0,5)) \cdot \left[1 + \left(\frac{H_s}{256}\right)^2\right]$	
Alpine Regionen	$s_k = (0,33 + 0,638 \cdot (Z - 0,5)) \cdot \left[1 + \left(\frac{H_s}{723}\right)^2\right]$	Gl. 4-23

Dabei entspricht Z der Schneezone (Wert 1,2,3 oder 4) und H_s der Geländehöhe über NN in m.

Zusätzlich wird dieser Wert mit einem Formbeiwert μ_i multipliziert. Die anzusetzende Schneelast beträgt also:

$$s = \mu_i \cdot s_k \quad \text{Gl. 4-24}$$

Der Formbeiwert μ_i ergibt sich aus der Dachform und nimmt Werte zwischen 0 und 1,6 an.

**4.1.6.5 DIN 1055-5:2004-02
 DIN 1055-5:2004-02**

Im Jahr 2004 wird ein weiterer Normentwurf [71] veröffentlicht. In diesem Entwurf unterscheidet die Schneezonenkarte nur noch drei Schneezonen mit entsprechend veränderten Grenzen. Die charakteristische Schneelast wird, abhängig von der Schneezone, gemäß den folgenden Formeln bestimmt.

Schneezone 1	$s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left[\frac{A + 140}{760}\right]^2$	
Schneezone 2	$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left[\frac{A + 140}{760}\right]^2$	Gl. 4-25
Schneezone 3	$s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left[\frac{A + 140}{760}\right]^2$	

Dabei entspricht A der Geländehöhe über NN. Jeder Schneezone wird zusätzlich ein Mindestwert zugeordnet. Diese betragen:

Schneezone 1	$s_{k,min} = 0,65 \text{ kN/m}^2$	
Schneezone 2	$s_{k,min} = 0,85 \text{ kN/m}^2$	Gl. 4-26
Schneezone 3	$s_{k,min} = 1,10 \text{ kN/m}^2$	

Auch in diesem Normentwurf der Wert s_k mit einem Formbeiwert μ_i multipliziert, der von der Dachform abhängt und unterschiedliche Fälle unterscheidet. Die folgende Tabelle 4-17 gibt Formbeiwerte in Abhängigkeit von der Dachneigung an.

Tabelle 4-17: Formbeiwerte μ_i in Abhängigkeit von der Dachneigung α nach [71]

Table 4-17: Correction factor μ_i depending on roof pitch α according to [71]

Dachneigung α [°]	Formbeiwert μ_1	Formbeiwert μ_2
$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	0,8	$0,8 + 0,8 \cdot \alpha/30^\circ$
$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	$0,8 \cdot (60^\circ - \alpha)/30^\circ$	1,6
$60^\circ < \alpha$	0	1,6

Diese Werte besitzen nach [71] nur Gültigkeit, wenn sichergestellt ist, dass der Schnee ungehindert abrutschen kann.

4.1.6.6 DIN 1055-5:2005-07 DIN 1055-5:2005-07

Nach zwei Entwürfen 2001 und 2004 wird mit DIN 1055-5:2005-07 [58] eine Norm bauaufsichtlich eingeführt. Die Schneezonenkarte des Entwurfs von 2004 wird um die zwei Unterzonen 1a und 2a erweitert, bleibt aber ansonsten unverändert. Auch die Berechnung der charakteristischen Schneelast erfolgt analog zum Entwurf von 2004. Die Mindestwerte der Schneelast und die Formbeiwerte bleiben unverändert, befindet sich ein Bauwerk in Schneezone 1a oder 2a muss die anzusetzende Schneelast um den Faktor 1,25 erhöht werden.

4.1.6.7 DIN EN 1991-1-3:2010-12 DIN EN 1991-1-3:2010-12

Mit DIN EN 1991-1-3:2010-12 [67] wird die erste europäische Schneenorm in Deutschland eingeführt. Die DIN EN 1993-1-3:2010-12 mit dem Nationalen Anhang [65] sowie dem Anhang A1 [68] unterscheidet sich dabei nicht nennenswert von der DIN 1055-5 aus dem Jahr 2005, da diese deutsche Norm bereits an den Eurocode angelehnt ist. In der Schneezonenkarte wird lediglich das Norddeutsche Tiefland ergänzt. In diesem Gebiet kann es zu deutlich höheren Lasten kommen. Den zuständigen Behörden wird in dieser Norm die Möglichkeit gegeben für diesen Fall separate Werte festzulegen, welche als außergewöhnliche Last bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen.

4.1.6.8 TGL 20167 Februar 1964 TGL 20167 February 1964

Gemäß TGL-Standard der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik lässt sich die Schneelast mit folgender Gleichung berechnen:

$$p_n = s_0 \cdot c \quad \text{Gl. 4-27}$$

Dabei ist s_0 die Last der Schneedecke und c ein Beiwert zur Berücksichtigung der Dachform.

Tabelle 4-18: Schneelast s_0 nach [72]

Table 4-18: Snow load s_0 according to [72]

Höhe über NHN [m]	Schneegebiet [-]	Schneelast s_0 [kp/m ²]
	I	50
0 bis 400	II	70
über 400 bis 600	III	100
über 600	IV	150

Bei der Bemessung muss die Schneelast mit dem Faktor 1,4 multipliziert werden. Der Beiwert c beträgt bei Flachdächern 1,0. Bei Satteldächern kann er der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 4-19: Beiwert c nach [72]

Table 4-19: Factor c according to [72]

Dachneigung α [°]	Beiwert c [-]
≤ 25	1
≥ 60	0

Auch nach TGL müssen die Laststellungen Volllast und einseitige Last untersucht werden.

4.1.6.9 TGL 20167 Mai 1971 TGL 20167 Mai 1971

Der Entwurf der TGL 20167 aus dem Jahr 1971 [73] erweitert die Schneegebiete auf sechs zu unterscheidende Kategorien.

Tabelle 4-20: Schneelast s_0 nach [73]

Table 4-20: Snow load s_0 according to [72]

Schneegebiet [-]	Schneelast s_0 [kp/m ²]
I	50
II	70
III	100
IV	150
V	200
VI	250

Ist die Dacheigenlast größer als 150 kp/m² darf die Schneelast aus dem nächstniedrigeren Schneegebiet angesetzt werden. Nur, wenn das Dacheigengewicht kleiner als 50 kp/m² ist muss der volle Wert der Schneelast des entsprechenden Schneegebietes angesetzt werden. Liegt das Dacheigengewicht zwischen diesen Werten darf linear interpoliert werden.

Die c -Beiwerte für Satteldächer bleiben unverändert.

Für die Zuordnung der Schneegebiete enthält der Normentwurf mehrere Karten und im Anhang eine Übersicht der Ortschaften, welche sich im Grenzgebiet befinden.

4.1.6.10 TGL 32274/05 Dezember 1976
TGL 32274/05 Dezember 1976

Im Dezember 1976 wurde die TGL 32274/05 [74], welche nur Schneelasten beinhaltet, veröffentlicht. Die Lasten werden nicht mehr in kp/m^2 sondern in kN/m^2 angegeben.

Die c-Beiwerte für Satteldächer werden um die Faktoren c_2 und c_3 erweitert: Bei Satteldächern mit Dachneigung zwischen 20° und 30° wird die Schneelast auf einer Seite mit dem Faktor $c_2 = 0,75$ reduziert und auf der anderen mit dem Faktor $c_3 = 1,25$ erhöht.

Bei der Bestimmung der Schneelast wird nicht mehr explizit zwischen verschiedenen Schneegebieten unterschieden. Entscheidend für den Grundwert der Schneelast ist die Geländehöhe.

Tabelle 4-21: Schneelast s_0 nach [74]

Table 4-21: Snow load s_0 according to [74]

Höhe über dem Meeresspiegelle [m]		Grundwert s_0 [kN/m^2]
Harz	sonstige DDR	
bis 250	bis 300	0,50
über 250 bis 375	über 300 bis 450	0,70
über 375 bis 475	über 450 bis 575	1,00
über 475 bis 525	über 575 bis 650	1,50
über 525 bis 575	über 650 bis 725	2,00
über 575	über 725	2,50

4.1.7 Auswertung und Zusammenfassung Schneelasten
Evaluation and comparison snow loads

4.1.7.1 Allgemeiner Vergleich
General comparison

Während die Schneelast in der Normausgabe der DIN 1055-5 von 1936 direkt in Abhängigkeit der Dachneigung bestimmt werden konnte, geben die Ausgaben von 1975 und 2005 sowie der Eurocode eine Regelschneelast bzw. eine charakteristische Schneelast an, die abhängig der Dachneigung abgemindert werden muss. Einen Vergleich der Abminderungsfaktoren liefert die folgende Abbildung.

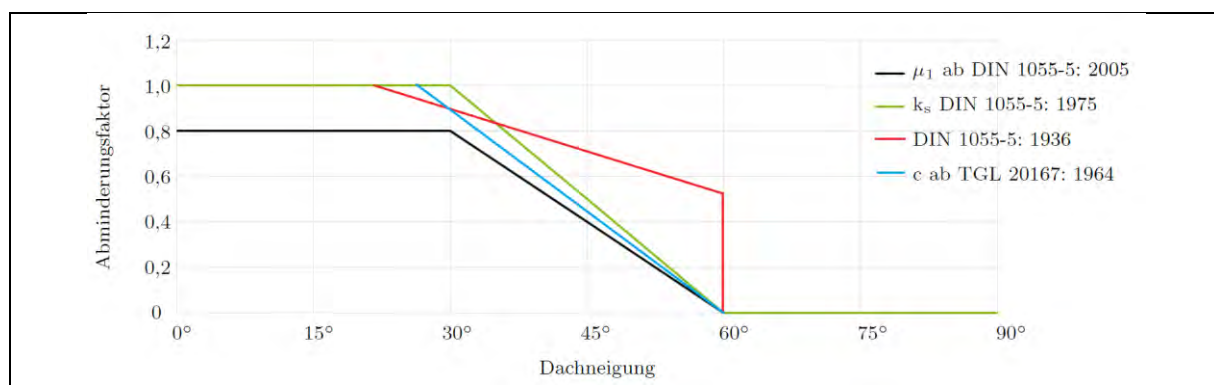


Abbildung 4-49: Vergleich der Abminderungsfaktoren
 Figure 4-49: Comparison of reduction factors

Bei der Normausgabe von 1936 wurde der größte Wert als Referenzwert benutzt und die Schneelasten der anderen Dachneigungen umgerechnet, um einen Vergleich durchführen zu können. Bei der TGL von 1974 ist darauf zu achten, dass bei Dachneigungen zwischen 20° und 30° zusätzlich andere Laststellungen untersucht werden müssen.

Aus dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass ab einer Dachneigung von 60° alle Normen bis auf die DIN-Ausgabe von 1936 keine Schneelasten mehr ansetzen. Nach DIN 1055-5:1936 ist bei 60° eine Last von 0,35 kN/m² zu berücksichtigen. Erst bei Dachneigungen > 60° ist von keiner Schneelast auszugehen. Im flachen Dachneigungsbereich ist die Abminderung nach DIN EN 1991 am größten.

Die Veränderung der charakteristischen Schneelast auf dem Boden s_k (nach DIN 1055-5:2005 und DIN EN 1991-1-3:2010) und der Regelschneelast s_0 (nach DIN 1055-5:1975) in den unterschiedlichen Schneezonen zeigt die folgende Abbildung.

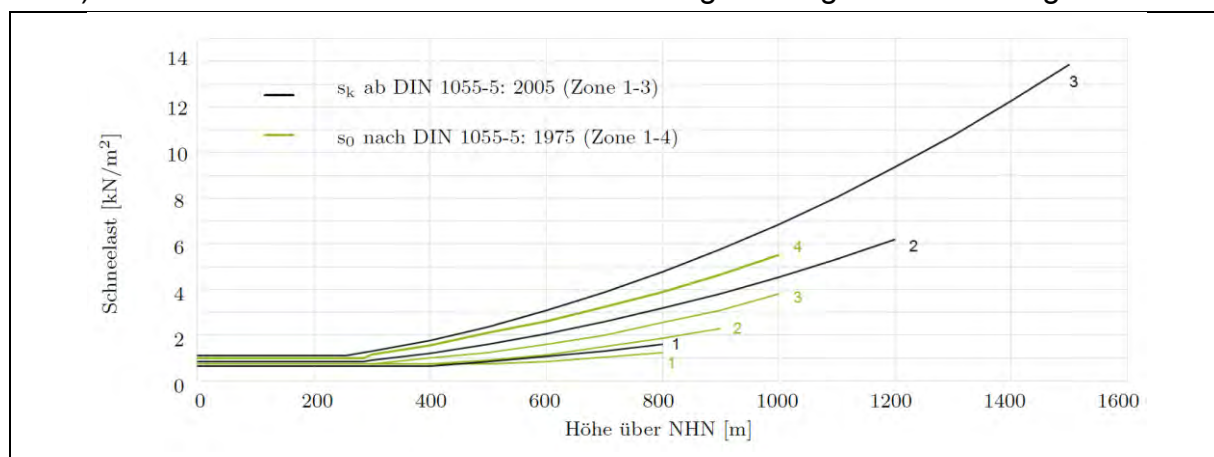


Abbildung 4-50: Lastbild Halle C TGL 1976
 Figure 4-50: Load arrangement Hall C TGL 1976

Die Sockelbeträge bzw. Mindestwerte in den unterschiedlichen Schneezonen betragen nach DIN 1055-5:1975:

- Zone 1: 0,75 kN/m² (bis 500 m über NHN)
- Zone 2: 0,75 kN/m² (bis 400 m über NHN)
- Zone 3: 0,75 kN/m² (bis 300 m über NHN)

Zone 4: 1,00 kN/m² (bis 200 m über NHN)

Und ab 2005:

Zone 1: 0,65 kN/m² (bis 400 m über NHN)

Zone 2: 0,85 kN/m² (bis 285 m über NHN)

Zone 3: 1,10 kN/m² (bis 255 m über NHN)

Für die Zonen 1a und 2a sind die Werte um den Faktor 1,25 zu erhöhen. Bei den anderen Normen ist jeder Schneezone ein fester Wert zugeordnet.

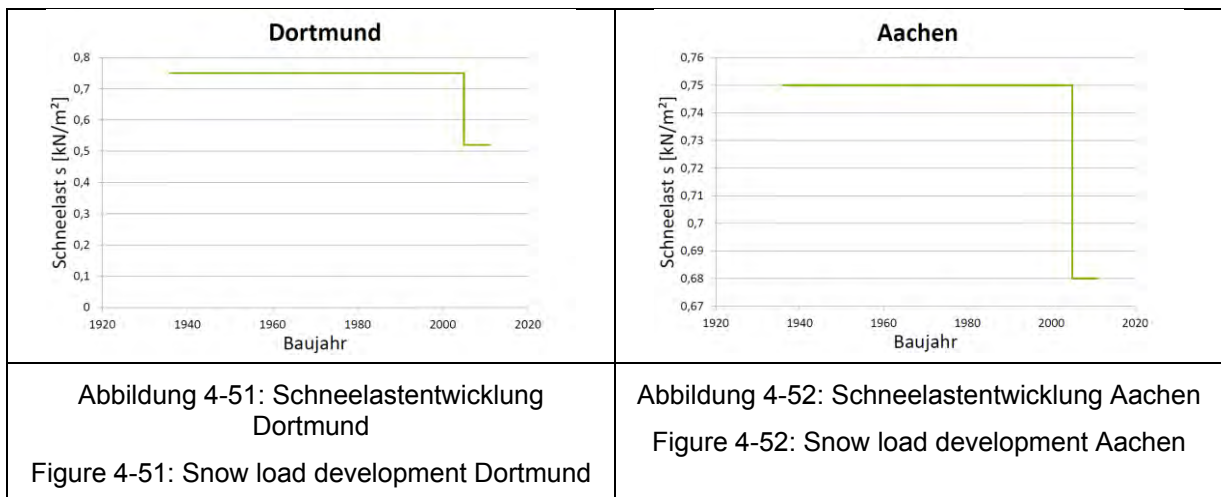
4.1.7.2 Auswertung für Beispielstandorte Evaluation for sample locations

Da ein allgemeiner Vergleich der Schneelasten aufgrund der unterschiedlichen Schneezonenkarten und dem nichtlinearen Verlauf der Regelschneelast schwierig bis unmöglich ist, werden im Folgenden die anzusetzenden charakteristischen Schneelasten für einige Beispielstädte bestimmt. Die Schneelasten werden für übliche Hallenbauten mit geringer Dachneigung bestimmt.

1. Dortmund und Aachen

Dortmund befindet sich ca. 105 m über NHN. Nach der Schneezonenkarte von 1975 befindet sich Dortmund in der Zone 2, in der Karte von 1994 auf der Grenze zwischen den Zonen 1 und 2, und nach dem Eurocode in Zone 1.

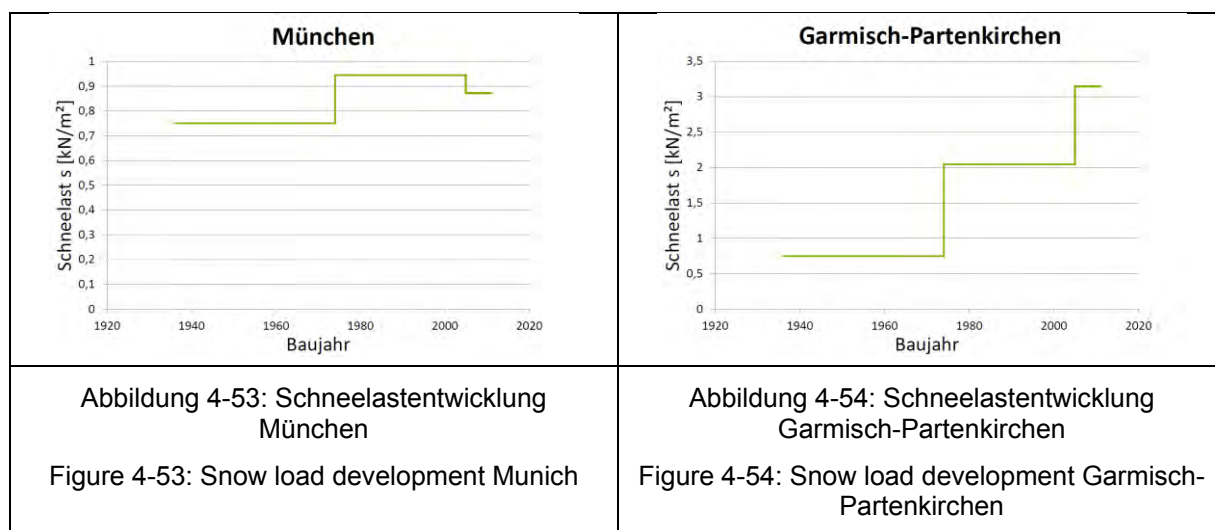
Aachen befindet sich ca. 206 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 befindet sich Aachen in der Zone 1, nach dem Eurocode in Zone 2.



2. München und Garmisch-Partenkirchen

München befindet sich ca. 518 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 befindet sich München in der Zone 2, nach dem Eurocode in Zone 1a.

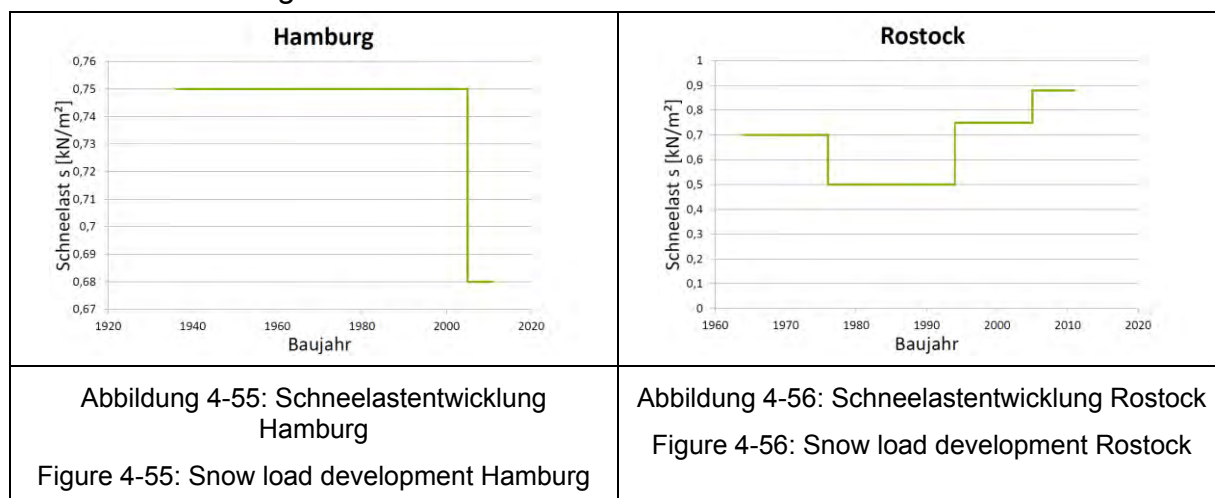
Garmisch-Partenkirchen befindet sich ca. 708 m über NHN. Sowohl nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 als auch nach dem Eurocode befindet sich Garmisch-Partenkirchen in der Zone 3.



3. Hamburg und Rostock

Hamburg befindet sich ca. 6 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 befindet sich Hamburg in der Zone 3, nach dem Eurocode in Zone 2.

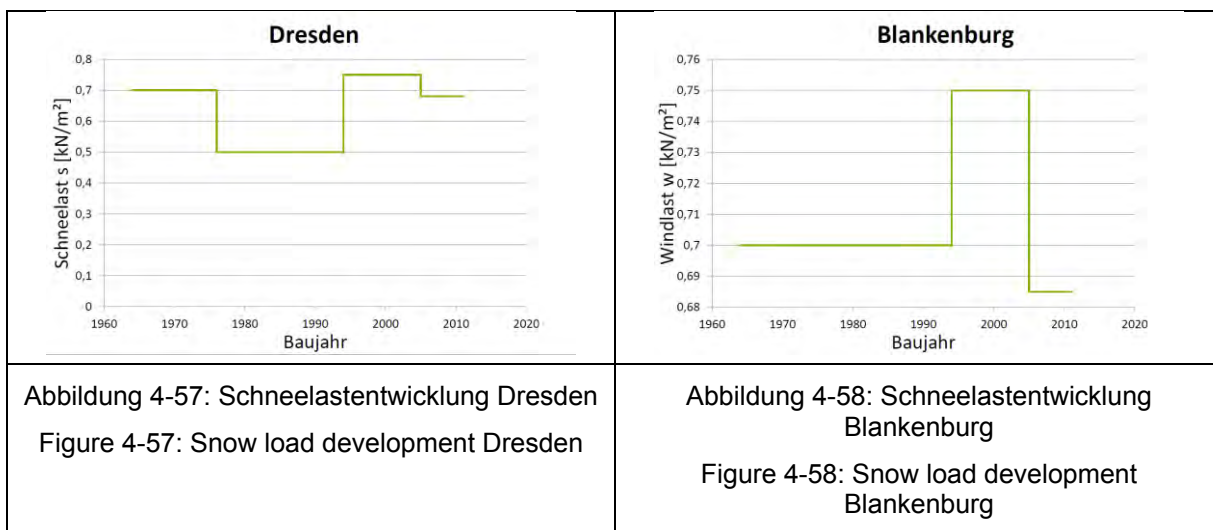
Rostock befindet sich ca. 14 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1994 und des Eurocodes befindet sich Rostock in der Zone 3. Nach der TGL von 1964 befindet sich Rostock aufgrund seiner Höhe im Schneegebiet 2. Nach der TGL von 1976 ist für die Stadt der niedrigste Grundwert anzusetzen.



4. Dresden und Blankenburg

Dresden befindet sich ca. 112 m über NHN. Nach der Schneezonenkarte von 1994 befindet sich Dresden in der Zone 3, nach dem Eurocode in Schneezone 2. Nach der TGL von 1964 befindet sich Dresden aufgrund seiner Höhe im Schneegebiet 2. Nach der TGL von 1976 ist für die Stadt der niedrigste Grundwert anzusetzen.

Blankenburg befindet sich im Harz und liegt ca. 288 m über NHN. Nach der Schneezonenkarte von 1994 befindet sich Blankenburg in der Zone 3, nach dem Eurocode in Schneezone 2. Nach der TGL von 1964 befindet sich Blankenburg aufgrund seiner Höhe im Schneegebiet 2. Nach der TGL von 1976 ist für die Stadt ein Grundwert von 0,7 kN/m² anzusetzen.



4.1.8 Fazit Schneelasten Conclusion snow loads

Es wird bereits an den wenigen dargestellten Standorten deutlich, dass eine tendenzielle Richtung der Schneelastentwicklung nicht zu erkennen ist. Die unterschiedlichen Schneezonenkarten und die unterschiedliche Anzahl an Schneezonen im Laufe der Normentwicklung folgen keinem klaren Trend hinsichtlich einer Erhöhung oder Verringerung der anzusetzenden charakteristischen Schneelast. Die Umstellung von einem Wert je Schneezone hin zu höhenabhängigen Formeln zu Bestimmung der Last, verkomplizieren einen Vergleich. Viele Standorte wechseln zwischen den einzelnen Normen die Schneezone und die an die Zonen geknüpften Werte wurden an neuen Erkenntnissen und auf das neue Sicherheitskonzept angepasst.

4.2 Maßtoleranzen Dimensional deviation

4.2.1 Allgemeines Preface

Moderne Stahlleichtbau-Systeme für Dach und Wand haben teilweise hervorragende Wärmedämmeigenschaften bei hoher Wirtschaftlichkeit und hoher gestalterischer Qualität, siehe Kapitel 2.3.1. Sie sind deshalb in besonderem Maße zur energetischen Sanierung bestehender Gebäude geeignet. Gleichzeitig stellen diese Systeme hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit ihrer Unterkonstruktion und ihrer Montage.

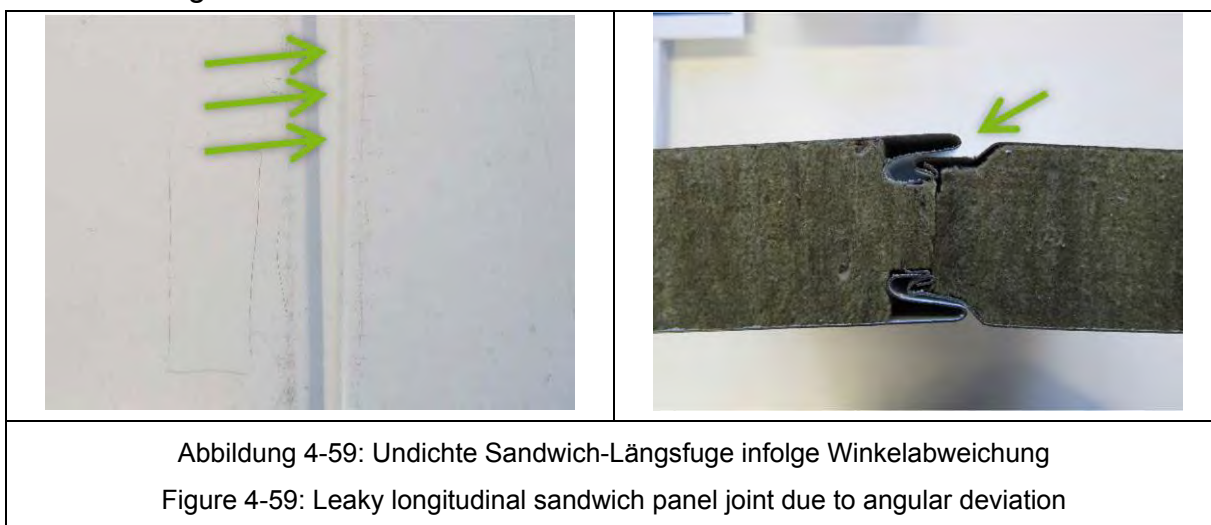
Im Neubau können diese Anforderungen in der Regel durch entsprechende Ausführung der Vorgewerke unproblematisch erfüllt werden, bei der Sanierung bestehender Gebäude ist eine gesonderte Betrachtung erforderlich.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst mögliche Folgen zu hoher Maßabweichungen bei Sandwichelement- und Kassettenprofilfassaden aufgezeigt. Anschließend werden relevante Normen und Regelwerke aufgearbeitet. Beispielhaft wird die Einhaltung dieser Normen an zwei Gebäuden untersucht.

4.2.2 Mögliche Folgen zu großer Maßabweichungen Possible impacts of dimensional deviations

Sandwichelemente oder Kassettenprofile werden mit hoher Präzision gefertigt und haben Blechdicken von nur wenigen Zehntel Millimetern. Entsprechend sorgsam muss die Montage erfolgen.

Die folgende Abbildung 4-59 zeigt, wie bei Sandwichelementen Winkelabweichungen das optische Erscheinungsbild und die bauphysikalische Funktionsfähigkeit beeinträchtigen können. Links dargestellt ist das Aufklaffen der profilierten Längsfuge infolge Winkelabweichung in der Ebene, rechts dargestellt das Aufklaffen der profilierten Längsfuge infolge Winkelabweichung aus der Ebene heraus. In beiden Fällen ist neben der optischen Beeinträchtigung die Luftdichtheit der Fuge nicht mehr ausreichend gewährleistet.



Weitere Probleme können insbesondere bei Mehrfeldträger-Systemen auftreten. Hier können zu große Maßabweichungen der Unterkonstruktion zu Schäden führen, weil die verhältnismäßig weichen Stahlleichtbau-Systeme bei der Montage in die durch die Unterkonstruktion vorgegebene Form gezogen werden. Bei Sandwichelementen kann dies direkt zu Knitterfalten an den Befestigungspunkten führen, oder die Entstehung dieser erheblich begünstigen. Bei Kassettenprofilen können bereits kleine lokale Deformationen an den Auflagern die Tragfähigkeit erheblich reduzieren. Entsprechende Schadensfälle sind jeweils in [17] dokumentiert.

4.2.3 Herstellungstoleranzen für Produkte des Metalleichtbaus Production tolerances for lightweight steel constructions

4.2.3.1 Sandwichelemente Sandwich panels

Für Sandwichelemente werden Herstellungstoleranzen in den jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassungen [45], in DIN EN 14509 [29] und in den „EPAQ-Qualitätsrichtlinien“ [76] angegeben. Dabei fordert die European Association for Panels and Profiles (EPAQ) in ihrer Qualitätsrichtlinie teilweise strengere Werte als die DIN EN 14509. Eine übersichtliche und aktuelle Zusammenstellung aller Toleranzmaße für

Sandwichelemente kann beispielsweise den IFBS-Fachregeln des Metallleichtbaus [78] entnommen werden, siehe Abbildung 4-60.

Kriterium	Quelle	Bild	Zeichen	Toleranzmaß [mm]
Nennblechdicke	-	6.1	t_n	Gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung bzw. Leistungserklärung
Elementdicke	DIN EN 14509	6.3	D	≤ 100 mm: $\pm 2,0$ mm > 100 mm: ± 2 %
Ebenheit	DIN EN 14509	6.11	I	L: 200 400 ≥ 700 t : 0,6 mm 1,0 mm 1,5 mm
	EPAQ			L: ≤ 200 400 ≥ 700 t : 0,4 mm 0,7 mm 1,0 mm (Zwischenwerte sind zu interpolieren)
Höhe des Metallprofils	DIN EN 14509	6.1	h	5 mm $< h \leq 50$ mm $\pm 1,0$ mm
		6.2		50 mm $\leq h \leq 100$ mm $\pm 2,5$ mm
Sickentiefe und Tiefe der leichten Profilierung	DIN EN 14509	6.2	d_s	$d_s \leq 1,0$ mm ± 30 % von d_s
				$1,0$ mm $< d_s \leq 3,0$ mm $\pm 0,3$ mm
				$3,0$ mm $< d_s \leq 5,0$ mm ± 10 % von d_s
Länge des Elements	DIN EN 14509	6.5	l	$l \leq 3.000$ mm $\pm 5,0$ mm
				$l > 3.000$ mm $\pm 10,0$ mm
				EPAQ
Baubreite des Elements ¹⁾	DIN EN 14509	6.4	w	$\pm 2,0$ mm
Abweichung von der Rechtwinkligkeit	DIN EN 14509	6.6	s	$\leq 0,006 \times w$ ($w =$ Baubreite)
	DIN EN 14509			Dach: $= 0,006 \times w$ ($w =$ Baubreite) Wand: $= 0,004 \times w$
Abweichung von der Geradheit (bezogen auf die Länge)	DIN EN 14509	6.7	δ	1,0 mm/m, jedoch nicht mehr als 5,0 mm
Längswölbung	DIN EN 14509	6.8	b	2,0 mm/m Länge; höchstens 10,0 mm
Querwölbung	DIN EN 14509	6.8	b	8,5 mm/m Breite; $h \leq 10,0$ mm 10,0 mm/m Breite; $h > 10,0$ mm
Profilraster	DIN EN 14509	6.3	p	$h \leq 50$ mm $\pm 2,0$ mm
	EPAQ			$h > 50$ mm $\pm 3,0$ mm $\pm 1,5$ mm
Obergurtbreite	DIN EN 14509	6.1, 6.3	b_1	$\pm 1,0$ mm
Untergurtbreite	DIN EN 14509	6.3	b_2	$\pm 2,0$ mm
Ausrichten der Deckschichten	EPAQ	6.10	Δe	$+ 3,0$ mm
Höhendifferenz benachbarter Elemente an der Fuge ¹⁾	EPAQ	6.12	ΔD	$\leq 2,0$ mm
Länge der Längsrandaufkantung	EPAQ	6.9	h_u	$h_u \geq 10,0$ mm
Randwelligkeit	EPAQ	6.9	W	$\pm 2,0$ mm auf 500 mm Messlänge

¹⁾ Prüfung im zusammengeschobenen Zustand.

Abbildung 4-60: Herstellertoleranzen für Sandwichelemente [45]

Figure 4-60: Production tolerances for sandwich panels [45]

Für die Bauausführung im Bestand relevant sind Ebenheitsabweichungen sowie Längs- und Querwölbungen. Mögliche Abweichungen in Länge und Breite können bei der Montage in der Regel ausgeglichen werden. Gemäß DIN EN 14509 [29] beträgt die zulässige Abweichung von der Ebenheit 1,5 mm bei einem Messpunktabstand von mehr als 700 mm. Gemäß EPAQ-Richtlinie [76] darf diese Abweichung nur 1,0 mm betragen. Die Sickentiefe leicht profilierter Elemente ($\leq 5,0$ mm) darf maximal 10 % (also maximal 0,5 mm) abweichen. Die zulässige Krümmung in Längsrichtung wird gemäß [76] auf ein Stichmaß von 2,0 mm/m, maximal 10 mm begrenzt. In Querrichtung

wird die zulässige Wölbung bei einer Profiltiefe $\leq 10,0$ mm auf 8,5 mm/m begrenzt, ansonsten gilt ein Stichmaß von 10,0 mm.

4.2.3.2 Kassettenprofile Liner trays

Die Herstellungstoleranzen für Kassettenprofile mit Sicken wurden bis zur Einführung der Eurocodes im Dezember 2010 im Rahmen der Normenreihe DIN 18807 festgelegt. Der Eurocode 3 verweist für die Toleranzen der Blechdicken auf EN 10143 [83], weitere Toleranzanforderungen werden in prEN 1090-4 [86] (zur Zeit in Bearbeitung) und in den EPAQ-Richtlinien [76] festgelegt. Auch für Kassettenprofile gibt es in den IFBS-Fachregeln des Metalleichtbaus [45] eine tabellarische Zusammenstellung der Toleranzanforderungen der unterschiedlichen Quellen, siehe Abbildung 4-61.

Kriterium	Quelle	Bild	Zeichen	Toleranzmaß [mm]
Nennblechdicke	EN 10143	4.1	t_N	Klasse (S) oder (N)
Tafellänge	prEN 1090-4 *)	4.3	l	$l \leq 3.000$ mm + 10 mm; - 5,0 mm $l > 3.000$ mm + 20 mm; - 5,0 mm
Profilhöhe	prEN 1090-4 *)	4.1	h	$h \leq 50$ mm $\pm 1,0$ mm $50 \text{ mm} < h \leq 100$ mm $\pm 1,5$ mm $h > 100$ mm $\pm 2,0$ mm
Baubreite	prEN 1090-4 *)	4.1	$w_{1,2}$	$h \leq 50$ mm $\pm 5,0$ $h > 50$ mm $\pm 0,1 \times h \leq 15,0$ mm
Baubreitenunterschied	prEN 1090-4 *)	4.9	w_3	$(w_1 + w_2) / 2 - \text{Toleranz} \leq w_3$ $w_3 \leq (w_1 + w_2) / 2 + \text{Toleranz}$
Obergurtbreite	prEN 1090-4 *)	4.1	b_o	+ 4,0 mm; - 1,0 mm
Untergurtbreite	prEN 1090-4 *)	4.1	b_u	+ 4,0 mm; - 1,0 mm
Innenradien	prEN 1090-4 *)	4.1	r_o, r_u	$\pm 2,0$ mm
Gurtsicken	prEN 1090-4 *)	4.1	b_{ky}, h_r	Bzgl. Lage: $\pm 3,0$ Bzgl. Höhe: + 3,0; - 1,0
Stegsicken	prEN 1090-4 *)	4.1	v_s, h_{sa}, h_b, h_{sb}	Bzgl. Lage: $\pm 3,0$ Bzgl. Versatz: + 2,0; - 0,15 $\times v \leq 1,0$
Randwelligkeit des Längsstoßes	prEN 1090-4 *)	4.5	D	$D \leq \pm 2,0$ mm auf 500 mm Messlänge
Abweichung von der Geradheit	prEN 1090-4 *)	4.7	δ, f_s	2,0 pro m Tafellänge $\leq 10,0$
Querwölbung +	EPAQ	4.2	f_q	+ 0,02 $\times b \leq 10,0$ mm - 0,01 $\times b < 10,0$ mm
Gurtsäbeligkeit	EPAQ	4.6	f_s	$l / 300 \leq 20$ mm
Eckwinkel Gurt / Steg	EPAQ	4.4	φ	$\pm 3^\circ$
Längsrandaufkantung	EPAQ	4.1	s	- 2,0 mm (falls s angegeben ist); ≥ 10 mm
Längswelligkeit +	EPAQ	4.2	f_w	b: 400 500 600 l: $\pm 2,0$ $\pm 3,0$ $\pm 5,0$

+ Prüfung in eingebaute Zustand
 *) in Vorbereitung
 Bei Kassettenprofilen muss der überdeckende Steg mindestens so hoch sein wie der zu überdeckende Steg zzgl. der Blechdicke

Abbildung 4-61: Herstellertoleranzen für Kassettenprofile mit Sicken [45]

Figure 4-61: Production tolerances for liner trays with beads [45]

Relevant für die folgenden Betrachtungen sind bei Kassettenprofilen die zulässigen Querwölbungen, die gemäß EPAQ-Richtlinien auf + 0,02 $\cdot b \leq 10$ mm bzw. - 0,01 $\cdot b < 10$ mm beschränkt werden.

4.2.3.3 Weitere Stahlleichtbauprofile Other lightweight steel profiles

Trapezprofile werden in selbsttragende und tragende Trapezprofile unterschieden. Selbsttragende Trapezprofile, beispielsweise auf Pfetten aufliegende Dachdeckungen, werden nach DIN EN 14782 [84] hergestellt und entsprechende Herstellungstoleranzen können DIN EN 508-1 [82] entnommen werden. Lastabtragende Trapezprofile, also Profile, die neben dem Abtrag von Eigengewicht und Wind- und Schneelasten auch zur Gesamtstabilität eines Tragwerks beitragen, unterliegen den Toleranzanforderungen der Normenreihe DIN EN 1090 [86]. Auch für Trapezprofile sind die Herstelltoleranzanforderungen in den IFBS-Fachregeln des Metallleichtbaus [76] zusammengestellt, siehe Abbildung 4-62 und Abbildung 4-63.

Kriterium	Bild	Zeichen	Selbsttragende Anwendung nach DIN EN 14782 Produkte aus Stahl		Tragende Anwendung Produkte aus Stahl
			Toleranzmaß nach DIN EN 508-1 [mm] Profile ohne Sicken	Toleranzmaß nach DIN EN 508-1 [mm] Profile ohne Sicken	Toleranzmaß nach prEN 1090-4* [mm]
Nennblechdicke	3.2	t_n	Grenzabmaße nach DIN EN 508-1: Klasse 1, 2, 3 oder 4		Grenzabmaße nach DIN 10143: Klasse (S) oder (N)
Tafellänge	3.4	l	$l \leq 3.000$ $l > 3.000$	$l \leq 3.000$ $l > 3.000$	$l \leq 3.000$ $l > 3.000$
Profilhöhe	3.3	h	$h \leq 50$ $50 < h \leq 100$ $h > 100$	$h \leq 50$ $50 < h \leq 100$ $h > 100$	$h \leq 50$ $50 < h \leq 100$ $h > 100$
Baubreite	3.4	b, w	$h < 50$ $h > 50$	$h \leq 50$ $h > 50$	$h \leq 50$ $h > 50$
Baubreiten- unterschied	3.4	$w_3, \Delta b$	$(w_1 + w_2) / 2 - \text{Toleranz} \leq w_3$ $w_3 \leq (w_1 + w_2) / 2 + \text{Toleranz}$	$(w_1 + w_2) / 2 - \text{Toleranz} \leq w_3$ $w_3 \leq (w_1 + w_2) / 2 + \text{Toleranz}$	$(w_1 + w_2) / 2 - \text{Toleranz} \leq w_3$ $w_3 \leq (w_1 + w_2) / 2 + \text{Toleranz}$
Obergurtbreite	3.2	b_{og}, b, b_i	$+2,0; -1,0$	$+4,0; -1,0$	$+4,0; -1,0$
Untergurtbreite	3.2	b_{un}, b, b_i	$+2,0; -1,0$	$+4,0; -1,0$	$+4,0; -1,0$
Abweichung von der Geradheit	3.7	δ, f_s	2,0 pro m Tafellänge $\leq 10,0$	2,0 pro m Tafellänge $\leq 10,0$	2,0 pro m Tafellänge $\leq 10,0$
Abweichung von der Rechtwink- ligkeit	3.8	s	$s \leq 0,005 \times w$	-	-
Innenradien	3.2	r, r_{ca}, r_u	$+2,0; 0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$
Gurtsicken	3.2	b_{gr}, h, h_r	-	Bzgl. Höhe: $+3,0; -1,0$	Bzgl. Lage: $\pm 3,0$ Bzgl. Höhe: $+3,0; -1,0$
Stegsicken	3.2	$h_{st}, h_{st},$ $h_{st}, h_{st},$ $v_{st}, v_{st},$ v_{st}	-	Bzgl. Versatz: $+2,0; -0,15 \times v \leq 1,0$	Bzgl. Lage: $\pm 3,0$ Bzgl. Versatz: $+2,0; -0,15 \times v \leq 1,0$
Randwelligkeit des Längstoßes	3.10	D	$D \leq \pm 2,0$ auf 500 mm Messlänge	$D \leq \pm 2,0$ auf 500 mm Messlänge	$D \leq \pm 2,0$ auf 500 mm Messlänge
Profilabstand / Rippenabstand	3.6	p	$h \leq 50$ $50 \leq h \leq 100$ $h \geq 100$	$\pm 2,0$ $\pm 3,0$ $\pm 4,0$	-

Abbildung 4-62: Herstellertoleranzen für Trapezprofile aus Stahl [45]
 Figure 4-62: Production tolerances for trapezoidal profiles [45]

Kriterium	Quelle	Bild	Zeichen	Toleranzmaß [mm]
Obergurtwölbung	EPAQ	3.2	h_e	$\pm 3,0$
Gurtsicken	EPAQ	3.2	b_{gr}, h, h_r	Bzgl. Lage: $\pm 3,0$
Längsrand- aufkantung	EPAQ	3.2	h_u	≥ 10 mm wenn h_u definiert ist: $+5,0; -2,0$
Längsrandbreite	EPAQ	3.2	b_{uf}	$b_u \leq 30:$ $b_u / 2 + 5,0 \leq b_{uf} \leq b_u - 5,0$ $b_u > 30:$ $20,0 \leq b_{uf} \leq b_u - 5,0$

Abbildung 4-63: Herstellertoleranzen für Trapezprofile aus Stahl nach EPAQ [45]
 Figure 4-63: Production tolerances for trapezoidal profiles according to EPAQ [45]

Auch für Wellprofile, Wandpaneele und Kantprofile sind die Herstelltoleranzanforderungen in den IFBS-Fachregeln des Metallleichtbaus [45] zusammengestellt.

Bei allen für das Bauen im Bestand relevanten Stahlleichtbausystemen werden ähnliche Toleranzanforderungen an die Herstellung gestellt. Die für Aluminiumbauteile geltenden Normen DIN 18807-9, DIN EN 485 und DIN EN 508-2 werden im Rahmen dieses Berichtes nicht weiter erläutert.

4.2.4 Toleranzanforderungen an die Ausführung Tolerance demands for construction

Zulässige Toleranzen für den Hochbau werden in DIN 18202 und den drei Teilen der DIN 18203 (-1, -2, -3) festgelegt. Dabei sind beim Bauen im Bestand die zum Zeitpunkt der Errichtung der Gebäude gültigen normativen Anforderungen relevant.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden alle verfügbaren Ausgaben dieser Normen betrachtet und ausgewertet [77]. Neben den Normen der Reihen DIN 18202 und DIN 18203 wurden auch die Normen der bis Oktober 2005 gültigen Reihe DIN 18201 betrachtet. DIN 18201 enthält allgemeine Grundlagen, wie Definitionen und Festlegungen von Begriffen, die ab 2005 in DIN 18202 übernommen wurden.

Die folgende Tabelle 4-22 zeigt alle betrachteten Normausgaben. Dabei sind Entwürfe blau dargestellt. Aktuell gültig sind DIN 18203-3:2008-08 [81] und DIN 18202:2013-04 [79].

Tabelle 4-22: In [77] betrachtete Normausgaben

Table 4-22: In [77] considered standard issues

Datum	Name	Titel
Nov 56	DIN 18201	Maßtoleranzen im Hochbau; Allgemeine Begriffe und Zahlenwerte
Nov 58	DIN 18201	Maßtoleranzen im Hochbau; Begriffe, Grundtoleranzen, Anwendung, Prüfung
Feb 59	DIN 18202-1	Maßtoleranzen im Hochbau; Fenster- und Türöffnungen, Treppenlöchern, Geschoß- und Podesthöhen
Mrz 69	DIN 18202 Blatt 1	Maßtoleranzen im Hochbau; Zulässige Abmaße für die Bauausführung, Wand- und Deckenöffnungen, Nischen, Geschoß- und Podesthöhen
Jan 72	DIN 18201	Maßtoleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung
Jun 74	DIN 18201	Maßtoleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung
Jun 74	DIN 18202 Blatt 4	Maßtoleranzen im Hochbau; Abmaße für Bauwerksabmessungen
Jun 74	DIN 18202 Blatt 2	Maßtoleranzen im Hochbau; Ebenheitstoleranzen für Oberflächen von Wänden, Deckenunterseiten und Bauteilen
Jun 74	DIN 18203-1	Maßtoleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Beton und Stahlbeton
Apr 76	DIN 18201	Maßtoleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung

Aug 77	Beiblatt 1 zu DIN 18202 Teil 4	Maßtoleranzen im Hochbau; Abmaße für Bauwerksabmessungen, Erläuterung zum Bezugsverfahren
Mai 79	DIN 18203-2	Maßtoleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Stahl
Okt 79	DIN 18202 Teil 5	Maßtoleranzen im Hochbau; Ebenheitstoleranzen für Flächen von Decken und Wänden
Nov 80	DIN 18201	Maßtoleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung
Nov 80	DIN 18201 Beiblatt 1	Maßtoleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung – Messpunkte für die Prüfung am Bauwerk
Jun 81	DIN 18203-3	Maßtoleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Holz und Holzwerkstoffen
Apr 82	DIN 18202-4	Maßtoleranzen im Hochbau; Maßtoleranzen für die Bauausführung
Apr 82	DIN 18203-1	Maßtoleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
Aug 84	DIN 18203 Teil 3	Toleranzen im Hochbau; Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen
Dez 84	DIN 18201	Toleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung
Dez 84	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke
Dez 84	DIN 18203-2	Maßtoleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Stahl
Feb 85	DIN 18203 Teil 1	Toleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
Mai 86	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke
Mai 86	DIN 18203 Teil 2	Toleranzen im Hochbau; Vorgefertigte Teile aus Stahl
Apr 97	DIN 18201	Toleranzen im Bauwesen; Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung
Apr 97	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke
Apr 97	DIN 18203 Teil 1	Toleranzen im Hochbau – Teil 1; Vorgefertigte Teile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
Nov 04	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke
Nov 04	DIN 18203-2	Toleranzen im Hochbau – Teil 2; Vorgefertigte Teile aus Stahl

Okt 05	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke
Aug 06	DIN 18203-2	Toleranzen im Hochbau – Teil 2; Vorgefertigte Teile aus Stahl
Mai 07	DIN 18203-3	Toleranzen im Hochbau – Teil 3; Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen
Aug 08	DIN 18203-3	Toleranzen im Hochbau – Teil 3; Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen
Jun 12	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke
Apr 13	DIN 18202	Toleranzen im Hochbau; Bauwerke

In der folgenden Abbildung 4-64 ist beispielhaft der zeitliche Verlauf der Toleranzanforderungen an die Maßabweichungen einer Wand mit Nennmaß 10 m dargestellt. In Abbildung 4-65 ist der zeitliche Verlauf der Toleranzanforderungen an die Ebenheitsabweichung einer Wand mit Nennmaß 10 m dargestellt. Es wird jeweils zwischen oberflächenfertig und nicht oberflächenfertig unterschieden. Diesen Abbildungen kann entnommen werden, dass diese für das Bauen im Bestand relevanten normativen Anforderungen im Laufe der Jahre häufig nahezu unverändert geblieben sind.

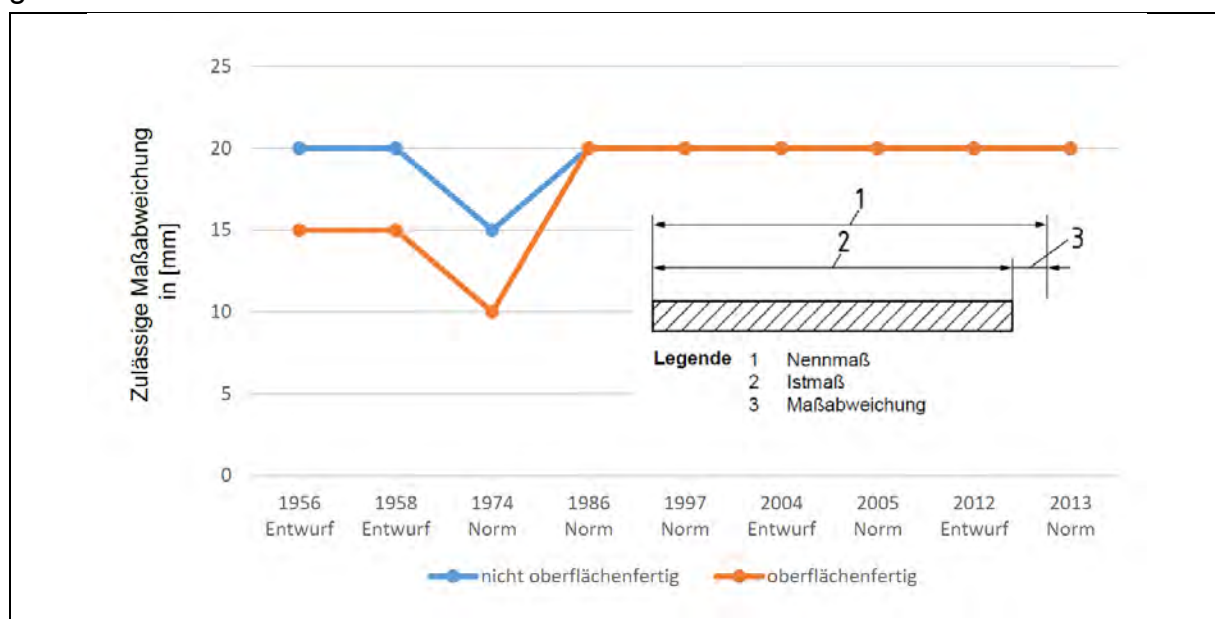
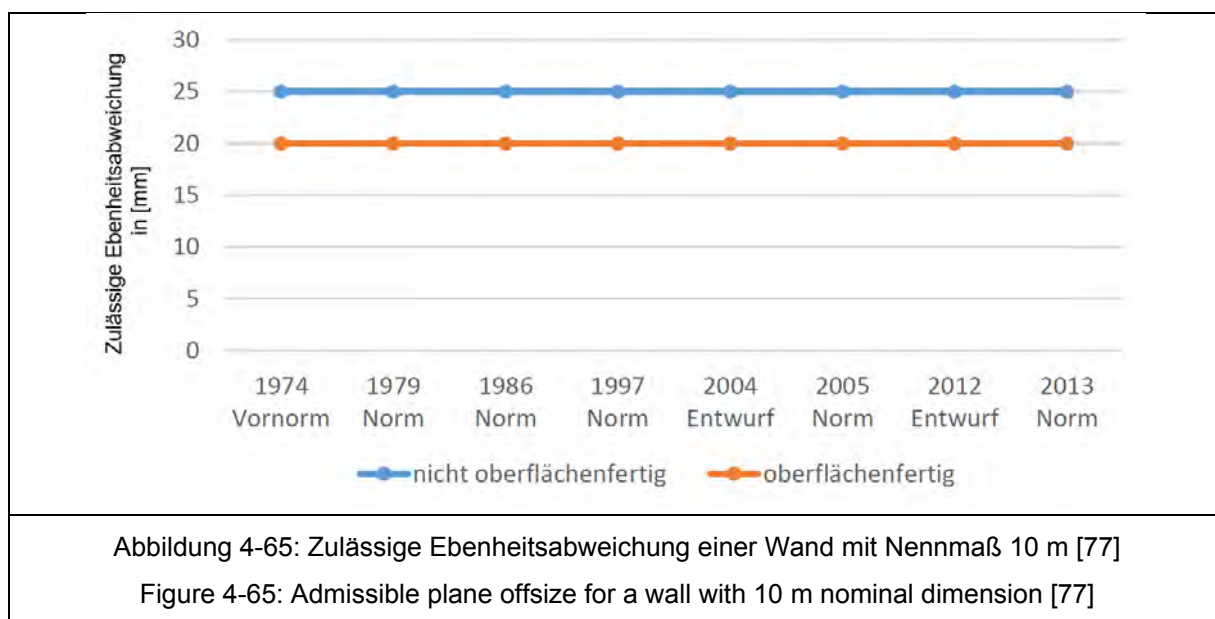


Abbildung 4-64: Zulässige Maßabweichung einer Wand mit Nennmaß 10 m [77]
 Figure 4-64: Admissible offsize for a wall with 10 m nominal dimension [77]



4.2.5 Zu erwartende Toleranzen beim Bauen im Bestand Expected tolerances for existing buildings

4.2.5.1 Vorbemerkungen Preface

Wird davon ausgegangen, dass die zum Zeitpunkt der Errichtung eines Bauwerks gültigen normativen Vorgaben eingehalten wurden, sind abhängig von der Bauweise die im Folgenden dargestellten Toleranzen zulässig.

Beispielhaft wird von einer Fassade mit 15,00 m Breite, 6,00 m Höhe und einem Achsabstand der Stützen von 5,00 m ausgegangen. Für die Montage eines Stahlleichtbau-Sanierungssystems sind Winkelabweichungen in der vertikalen Ebene, Ebenheitsabweichungen und Fluchtabweichungen von Stützen relevant.

4.2.5.2 Sandwichelementfassade Sandwich panel façade

Tabelle 4-23: Zulässige Abweichungen Sandwichelementfassade [77]

Table 4-23: Admissible deviation sandwich panel façade [77]

Kategorie	Messpunkt- abstand	DIN 18202		
		2013-04	Blatt 2 1974-06	Blatt 4 1974-06
Ebenheitsabweichung (oberflächenfertig)	15 m	25 mm	A: 25 mm	-
		erhöhte Anf.: 20 mm	B: 20 mm	
Winkelabweichung (vertikal)	6 m	12 mm	-	B: 8 mm
				C: 5 mm
Fluchtabweichung Stütze	10 m	16 mm	-	B: 10 mm
				C: 5 mm

4.2.5.3 Kassettenprofilfassade
Liner tray façade

Tabelle 4-24: Zulässige Abweichungen Kassettenprofilfassade [77]

Table 4-24: Admissible deviation liner tray façade [77]

Kategorie	Messpunkt- abstand	DIN 18202		
		2013-04	Blatt 2 1974-06	Blatt 4 1974-06
Ebenheitsabweichung (oberflächenfertig)	15 m	nicht flächenfertig: 30 mm	A, nicht ober- flächenfertig: 30 mm	-
		flächenfertig: 25 mm	A, ober- flächenfertig: 25 mm	
		erhöhte Anf.: 20 mm	B, ober- flächenfertig: 20 mm	
Winkelabweichung (vertikal)	6 m	12 mm	-	B: 8 mm
				C: 5 mm
Fluchtabweichung Stütze	10 m	16 mm	-	B: 10 mm
				C: 5 mm

4.2.5.4 Sichtbetonfassade
Exposed concrete façade

Tabelle 4-25: Zulässige Abweichungen Sichtbetonfassade [77]

Table 4-25: Admissible deviation exposed concrete façade [77]

Kategorie	Messpunkt- abstand	DIN 18202		
		2013-04	Blatt 2 1974-06	Blatt 4 1974-06
Ebenheitsabweichung (oberflächenfertig)	15 m	nicht flächenfertig: 30 mm	A, nicht ober- flächenfertig: 30 mm	-
		flächenfertig: 25 mm	A, ober- flächenfertig: 25 mm	
		erhöhte Anf.: 20 mm	B, ober- flächenfertig: 20 mm	
Winkelabweichung (vertikal)	6 m	12 mm	-	A: 10 mm
				B: 8 mm
				C: 5 mm
Fluchtabweichung Stütze	-	-	-	-

4.2.5.5 Porenbetonfassade
Cellular concrete façade

Tabelle 4-26: Zulässige Abweichungen Porenbetonfassade [77]

Table 4-26: Admissible deviation cellular concrete façade [77]

Kategorie	Messpunkt- abstand	DIN 18202		
		2013-04	Blatt 2 1974-06	Blatt 4 1974-06
Ebenheitsabweichung (oberflächenfertig)	15 m	30 mm	30 mm	-
Winkelabweichung (vertikal)	6 m	12 mm	-	A: 10 mm
				B: 8 mm
				C: 5 mm
Fluchtabweichung Stütze	-	-	-	-

4.2.5.6 Mauerwerksfassade Brickwork façade

Tabelle 4-27: Zulässige Abweichungen Mauerwerkfassade [77]

Table 4-27: Admissible deviation brickwork façade [77]

Kategorie	Messpunkt- abstand	DIN 18202		
		2013-04	Blatt 2 1974-06	Blatt 4 1974-06
Ebenheitsabweichung (oberflächenfertig)	15 m	nicht flächenfertig: 30 mm	A, nicht ober- flächenfertig: 30 mm	-
		flächenfertig: 25 mm	A, ober- flächenfertig: 25 mm	
		erhöhte Anf.: 20 mm	B, ober- flächenfertig: 20 mm	
Winkelabweichung (vertikal)	6 m	12 mm	-	A: 10 mm
				B: 8 mm
				C: 5 mm
Fluchtabweichung Stütze	-	-	-	-

4.2.6 Messung bestehender Gebäude Measurement of existing buildings

4.2.6.1 Vorbemerkungen Preface

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden exemplarisch die Fassaden zweier Beispielgebäude vermessen (ein Gebäude mit massiver Fassade, ein Gebäude mit Stahlleichtbaufassade). Unter der Annahme, dass mögliche Sanierungsmaßnahmen an den bestehenden Fassaden montiert werden sollen, wurden Maß-, Winkel-, und Ebenheitsabweichungen erfasst und mit den normativen Vorgaben verglichen.

Zur Messung wurden ein selbstnivellierender Kreuzlinienlaser mit einer Genauigkeit von 1,0 mm / 5,0 m und ein Laser-Entfernungsmesser mit einer Genauigkeit von 1,0 mm / 80,0 m verwendet. Zur Messung der Ebenheit und der Winkelabweichungen wurde mit dem Kreuzlinienlaser eine Ebene parallel zur Fassade aufgespannt. In einem vorgegebenen Raster wurde anschließend der Abstand zwischen dieser Ebene und der Fassade gemessen. Durch Projektion zweier senkrecht zu einander stehender Ebenen in den Gebäudeecken konnten die Winkelabweichungen in den Gebäudeecken erfasst werden.

Hinweis: Aus den durchgeführten Messungen lässt sich nicht ableiten, inwieweit die normativen Vorgaben zu einem früheren Zeitpunkt erfüllt wurden. Der Einfluss

zeitabhängiger Faktoren auf die gemessenen Werte wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht.

4.2.6.2 Gebäude mit massiver Fassade **Building with solid façade**

Das erste untersuchte Gebäude wurde ca. 1965 errichtet. Das dreistöckige Gebäude hat einen Grundriss von ca. 30 x 30 m. Die Außenwände sind mit Waschbetonplatten verkleidet.



Abbildung 4-66: Beispielgebäude mit massiver Fassade [77]

Figure 4-66: Example building with solid façade [77]

Die Maßabweichungen dieses Gebäudes im Grundriss sind in der folgenden Tabelle 4-28 dargestellt. Die Maßabweichungen werden mit den Grenzmaßen nach aktuell gültiger DIN 18202:2013-04 [77] und dem Entwurf der DIN 18201 von 1958 [85] verglichen. Rot markierte Werte überschreiten dabei die zulässigen Grenzwerte.

Der Sollwinkel der Gebäudeecken beträgt 90° . Hier wurden Abweichungen von $0,037^\circ$ an der westlichen Gebäudeecke und $0,144^\circ$ an der nördlichen Gebäudeecke gemessen. In DIN 18202:2013-04 werden Winkelabweichungen als Stichmaß auf ein Nennmaß bezogen angegeben. Unter der Annahme, dass die Abweichung nur auf einer der beiden Seiten der Gebäudeecke vorliegt, beträgt das Stichmaß an der Südwestseite 3,3 mm bei einer Strecke von 5,10 m. Hier wären 12 mm zulässig. An der nördlichen Gebäudeecke weicht die Nordwestfassade 55 mm bei 21,94 m Länge von der Bezugsebene ab und die Nordostfassade 22 mm bei 8,69 m Länge. Diese Werte übersteigen die theoretisch zulässigen Werte von 20 mm bzw. 16 mm.

Tabelle 4-28: Maßabweichungen Gebäude mit massiver Fassade [77]

Table 4-28: Offsize example building with solid façade [77]

	Nennmaß [m]	Istmaß [m]	Maßabweichung [mm]	korrigierte Maßabweichung [mm]	Grenzmaß DIN 18202:2013-04 [mm]	Grenzmaß DIN 18201:1958-11 Entwurf [mm] (Rund/Genau)
Länge Fassade Nordwest Abschnitt 1	9	3,97	- 100	0	16	15/12,5
Länge Fassade Nordwest Abschnitt 2	25,37	25,47	+ 100	0	24	15/16
Länge Fassade Nordwest insgesamt	29,44	29,44	0	0	24	15/16
Länge Fassade Nordost Abschnitt 1	8,72	8,69	- 30	- 30	20	15/12,5
Länge Fassade Nordost Abschnitt 2	14,40	14,41	+ 10	+ 10	20	15/16
Länge Fassade Nordost Abschnitt 3	8,72	8,69	- 30	- 30	20	15/12,5
Länge Fassade Nordost insgesamt	31,84	31,79	- 50	- 50	30	15/16
Länge Fassade Südost Abschnitt 1	25,37	25,47	+ 100	+ 10	24	15/16
Länge Fassade Südost Abschnitt 2	4,07	3,96	- 90	0	16	15/12,5
Länge Fassade Südost insgesamt	29,44	29,43	- 10	- 10	24	15/16

Die Ebenheitsabweichungen der Fassade wurden an drei Seiten des Gebäudes ermittelt und sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 4-29: Ebenheitsabweichungen Fassade Südwest [77]

Table 4-29: Flatness offset façade southwest [77]

Messwerte [cm]			Korrigierte Werte [cm]			
Horizontale	Vertikale		Horizontale	Vertikale		Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 148 cm Nennmaß
	0	148		0	148	
0	6,0	5,5	0	0,00	0,50	0,5
210	5,2	4,5	210	1,01	1,71	0,7
510	6,5	6,7	510	0,00	- 0,20	0,2
$\alpha = \arctan (0,5 / 510) = 0,056^\circ$						Zulässig: 8 mm

Tabelle 4-30: Ebenheitsabweichungen Fassade Nordost [77]

Table 4-30: Flatness offset façade northeast [77]

Messwerte [cm]			Korrigierte Werte [cm]			
Horizontale	Vertikale		Horizontale	Vertikale		Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 148 cm Nennmaß
	0	148		0	148	
0	14,5	13,7	0	0,00	0,80	0,8
200	14,7	13,2	200	0,38	1,88	0,5
390	15,5	14,7	390	0,12	0,92	0,8
394	15,0	15,0	394	0,63	0,63	0,0
594	14,7	13,9	594	1,51	2,31	0,8
869	17,0	15,5	869	0,00	1,50	1,5
$\alpha = \arctan (2,5 / 869) = 0,165^\circ$						Zulässig: 8 mm

Tabelle 4-31: Ebenheitsabweichungen Fassade Nordwest [77]

Table 4-31: Flatness offset façade northwest [77]

Messwerte [cm]			Korrigierte Werte [cm]			
Horizontale	Vertikale		Horizontale	Vertikale		Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 148 cm Nennmaß
	0	148		0	148	
0	4,60	4,70	0	0,00	- 0,01	0,1
30	4,80	5,00	30	- 0,21	- 0,41	0,2
35	5,00	5,20	35	- 0,41	- 0,61	0,2
200	4,40	4,50	200	0,17	0,07	0,6
391	4,60	4,90	391	- 0,07	- 0,37	0,3
397	4,80	4,80	397	- 0,27	- 0,27	0,0
577	4,30	4,20	577	0,19	0,29	0,1
749	4,20	4,50	749	0,25	- 0,05	0,2
754	4,30	4,60	754	0,15	- 0,15	0,0
933	3,50	3,80	933	0,91	0,61	0,3
1113	4,50	4,80	1113	- 0,13	- 0,43	0,3
1117	4,50	4,70	1117	- 0,14	- 0,34	0,2
1296	3,80	3,80	1296	0,52	0,52	0,0
1472	4,00	4,00	1472	0,28	0,28	0,0
1476	4,10	4,20	1476	0,18	0,08	0,1
1656	3,50	3,50	1656	0,74	0,74	0,0
1831	3,70	3,70	1831	0,50	0,50	0,0
1835	3,80	3,70	1835	0,40	0,50	0,1
2015	3,00	3,00	2015	1,16	1,16	0,0
2190	3,80	4,10	2190	0,32	0,02	0,3
2194	3,50	4,00	2194	0,62	0,12	0,5
2375	3,59	3,59	2375	0,49	0,49	0,0
2549	4,39	3,99	2549	- 0,35	0,05	0,4
2553	4,89	4,19	2553	- 0,85	- 0,15	0,7
2733	3,79	3,89	2733	0,21	0,11	0,1
2910	3,98	4,18	2910	- 0,02	- 0,22	0,2
2914	4,28	4,28	2914	- 0,32	- 0,32	0,0
2944	3,95	4,15	2944	0,00	- 0,02	0,2
$\alpha = \arctan (0,65 / 2944) = 0,013^\circ$						Zulässig: 8 mm

Die normativen Vorgaben an der Fassade Nordost werden an einer Stelle nicht eingehalten. Das Oberflächenprofil dieses Fassadenabschnitts ist in der folgenden Abbildung 4-67 dargestellt.

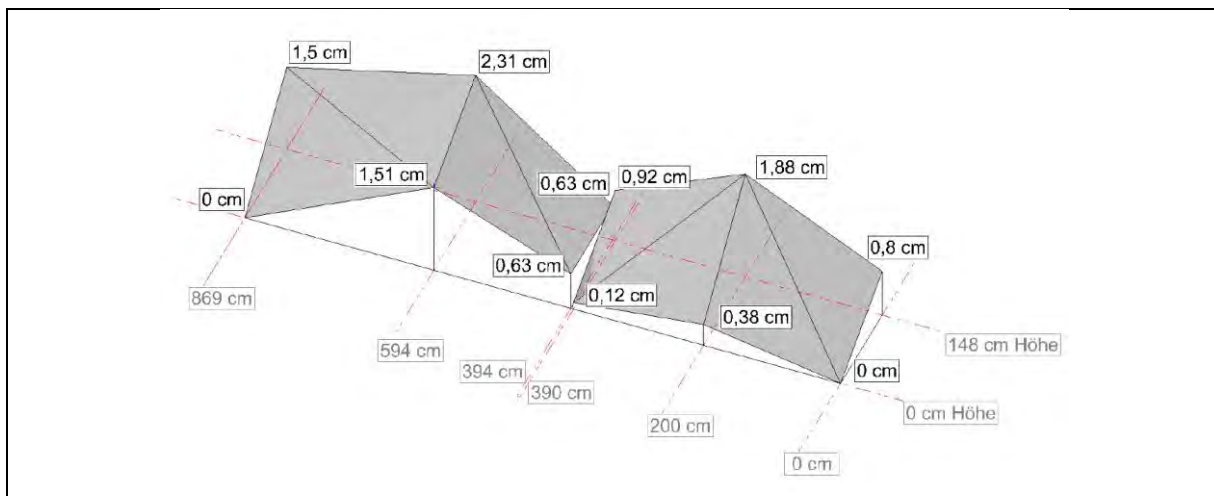


Abbildung 4-67: Ebenheitsabweichungen Fassade Nordost [77]

Figure 4-67: Flatness offset façade northeast [77]

Zusammenfassend wird festgestellt, dass bei diesem Gebäude die normativen Anforderungen an Maßabweichungen, Winkelabweichungen und Ebenheitsabweichungen nach DIN 18202:2013-04 [77] nicht eingehalten werden. Auch die Vorgaben des zum Zeitpunkt der Errichtung aktuellen Entwurfs der DIN 18201:1958-11 [85] werden zumindest heute nicht mehr eingehalten.

4.2.6.3 Gebäude mit Stahleleichtbaufassade Building with lightweight steel façade

Bei dem zweiten untersuchten Gebäude handelt es sich um eine Stahlhalle mit Sandwichelement-Fassade. Die Stahlhalle ist 15,50 m breit und 30,5 m lang und wurde 1999 erbaut. Die Sandwichelemente der Fassade wurden vertikal verlegt und an einer Unterkonstruktion aus C-Profilen befestigt.



Abbildung 4-68: Beispielgebäude mit Sandwichelement-Fassade [77]

Figure 4-68: Example building with sandwich panel façade [77]

Die Maßabweichungen dieses Gebäudes im Grundriss sind in der folgenden Tabelle 4-32 dargestellt. Die Maßabweichungen werden mit den Grenzmaßen nach aktuell gültiger DIN 18202:2013-04 [77] und nach der zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen DIN 18202:1997-04 [79] verglichen. Hier gibt es zwischen DIN 18202:2013-04 und DIN 18202:1997-04 keine Unterschiede. Rot markierte Werte überschreiten die zulässigen Grenzwerte.

Tabelle 4-32: Maßabweichungen Gebäude mit Sandwichelement-Fassade [77]

Table 4-32: Offsize example building with sandwich panel façade [77]

	Nennmaß [m]	Nennmaß korrigiert [m]	Istmaß [m]	Maßabweichung [mm]	Grenzmaß DIN 18202:2013-04 [mm]	Grenzmaß DIN 18202:1997-04 [mm]
Länge Fassade Süd linker Teil	6,41	6,53	6,49	40	20	20
Länge Fassade Süd rechter Teil	18,41	18,53	18,51	20	24	24
Länge Fassade Süd insgesamt	30,32	30,56	30,55	10	30	30
Länge Fassade West	15,32	15,56	15,55	10	24	24
Länge Fassade Nord	30,32	30,56	30,55	10	30	30
Länge Fassade Ost linker Teil	k. A.	-	5,77	-	16	16
Länge Fassade Ost insgesamt	15,32	15,56	15,56	0	24	24

Der Sollwinkel der Gebäudeecken beträgt 90°. Hier wurden Abweichungen von 0,052° an der südwestlichen Gebäudeecke und 0,056° an der südöstlichen Gebäudeecke gemessen. Unter der Annahme, dass die Abweichung nur auf einer der beiden Seiten der Gebäudeecke vorliegt, beträgt das Stichmaß an der Westseite 26 mm bei einer Strecke von 15,35 m. Bei dieser Strecke sind nach 18202:2013-04 nur 20 mm zulässig. An den anderen Gebäudeecken wurden die zulässigen Winkelabweichungen eingehalten.

Die Ebenheitsabweichungen der Fassade wurden an drei Seiten des Gebäudes ermittelt und sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 4-33: Ebenheitsabweichungen Fassade Ost [77]

Table 4-33: Flatness offset façade east [77]

Messwerte [cm]			Korrigierte Werte [cm]			
Horizontale	Vertikale		Horizontale	Vertikale		Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 50 cm Nennmaß
	0	50		0	50	
10	12,2	12,0	10	0,00	0,20	0,2
100	12,2	12,3	100	0,05	- 0,05	0,1
200	11,8	12,0	200	0,50	0,30	0,2
300	12,2	12,2	300	0,15	0,15	0,0
400	12,0	12,3	400	0,40	0,10	0,3
500	12,0	12,2	500	0,46	0,26	0,2
567	12,5	12,7	567	0,00	- 0,20	0,2
$\alpha = \arctan (0,3 / 557) = 0,031^\circ$						Zulässig: 3 mm (1997) 6 mm (2013)

Tabelle 4-34: Ebenheitsabweichungen Fassade Süd Abschnitt 1 [77]

Table 4-34: Flatness offset façade south section 1 [77]

Messwerte [cm]				Korrigierte Werte [cm]				
Horizontale	Vertikale			Horizontale	Vertikale			Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 200 cm Nennmaß
	0	100	200		0	100	200	
10	11,0	10,4	10,9	10	- 0,60	0,00	- 0,50	0,1
45	10,6	10,6	10,6	45	- 0,23	- 0,23	- 0,23	0,0
145	10,4	10,6	10,8	145	- 0,11	- 0,31	- 0,51	0,4
245	9,7	10,5	10,8	245	0,51	- 0,29	- 0,59	1,1
345	9,3	10,5	10,8	345	0,83	- 0,37	- 0,67	1,5
445	9,2	10,4	10,8	445	0,86	- 0,34	- 0,74	1,6
545	9,3	10,3	10,7	545	0,68	- 0,32	- 0,72	1,4
644	9,1	9,9	10,2	644	0,80	- 0,00	- 0,30	1,1
$\alpha = \arctan (0,5 / 644) = 0,045^\circ$								Zulässig: 8 mm

Tabelle 4-35: Ebenheitsabweichungen Fassade Süd Abschnitt 2 [77]

Table 4-35: Flatness offset façade south section 2 [77]

Messwerte [cm]				Korrigierte Werte [cm]				
Horizontale	Vertikale			Horizontale	Vertikale			Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 200 cm Nennmaß
	0	100	200		0	100	200	
10	20,5	20,5	20,5	10	0,00	0,00	0,00	0,0
100	21,0	21,0	21,0	100	- 0,42	- 0,42	- 0,42	0,0
200	21,0	20,8	20,9	200	- 0,32	- 0,12	- 0,22	0,1
300	20,6	20,7	20,7	300	0,17	0,07	0,07	0,1
400	20,7	20,9	21,0	400	0,16	- 0,04	- 0,14	0,3
500	20,9	21,2	21,4	500	0,05	- 0,25	- 0,45	0,5
600	21,2	21,5	21,6	600	- 0,15	- 0,45	- 0,55	0,4
700	21,0	21,3	21,5	700	0,14	- 0,16	- 0,36	0,5
800	20,9	21,0	21,5	800	0,33	0,23	- 0,27	0,6
900	20,8	21,0	21,4	900	0,52	0,32	- 0,08	0,6
1000	21,7	21,2	21,4	1000	- 0,28	0,22	0,02	0,3
1100	20,8	21,3	21,8	1100	0,71	0,21	- 0,29	1,0
1200	21,0	21,5	22,0	1200	0,60	0,10	- 0,40	1,0
1300	21,0	21,5	22,0	1300	0,69	0,19	- 0,31	1,0
1400	21,0	21,5	22,0	1400	0,79	0,29	- 0,21	1,0
1500	21,0	21,5	22,0	1500	0,88	0,38	- 0,12	1,0
1600	21,5	22,0	22,2	1600	0,47	- 0,03	- 0,23	0,7
1700	21,5	22,0	22,5	1700	0,56	0,06	- 0,44	1,0
1800	22,0	22,4	22,6	1800	0,16	- 0,24	- 0,44	0,6
1846	22,0	22,2	22,6	1846	0,20	0,00	- 0,40	0,6
$\alpha = \arctan (1,7 / 1836) = 0,053^\circ$								Zulässig: 8 mm

Tabelle 4-36: Ebenheitsabweichungen Fassade West [77]

Table 4-36: Flatness offset façade south west [77]

Messwerte [cm]				Korrigierte Werte [cm]				
Horizontale	Vertikale			Horizontale	Vertikale			Stichmaß vertikale Winkelabweichung bei 200 cm Nennmaß
	0	100	200		0	100	200	
10	15,9	15,5	15,3	10	- 0,40	0,00	0,20	0,6
76	16,1	16,1	16,0	76	- 0,49	- 0,49	- 0,39	0,1
176	16,0	16,1	16,4	176	- 0,22	- 0,32	- 0,62	0,4
276	16,0	16,2	16,5	276	- 0,05	- 0,25	- 0,55	0,5
376	16,1	16,6	16,8	376	0,01	- 0,49	- 0,69	0,7
476	16,2	16,5	16,8	476	0,09	- 0,21	- 0,51	0,6
576	16,3	16,9	17,0	576	0,16	- 0,44	- 0,54	0,7
667	16,4	16,8	17,1	667	0,23	- 0,17	- 0,47	0,7
776	16,1	17,0	17,1	776	0,70	- 0,20	- 0,30	1,0
876	16,5	17,1	17,5	876	0,47	- 0,13	- 0,53	1,0
976	16,7	17,2	17,5	976	0,44	- 0,06	- 0,36	0,8
1076	17,1	17,5	17,6	1076	0,20	- 0,20	- 0,30	0,5
1176	17,4	17,6	18,0	1176	0,07	- 0,13	- 0,53	0,6
1276	17,6	17,7	18,2	1276	0,04	- 0,06	- 0,56	0,6
1376	17,7	17,4	18,5	1376	0,11	0,41	- 0,69	0,8
1476	18,1	18,6	18,6	1476	- 0,12	- 0,62	- 0,62	0,5
1545	1,81	18,1	18,0	1545	0,00	0,00	0,10	0,1
$\alpha = \arctan (2,6 / 1535) = 0,097^\circ$								Zulässig: 8 mm

Zusammenfassend wird festgestellt, dass auch bei diesem Gebäude die normativen Anforderungen an Maßabweichungen, Winkelabweichungen und Ebenheitsabweichungen nach DIN 18202:2013-04 vereinzelt nicht eingehalten werden. Auch die Vorgaben der zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen DIN 18202:1997-04 werden vereinzelt nicht eingehalten.

4.2.7 Zusammenfassung Summary

Moderne Stahlleichtbausysteme für Dach und Wand, wie beispielsweise Sandwichelemente oder Kassettenprofile werden mit hoher Präzision gefertigt und stellen hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit ihrer Unterkonstruktion.

Unberücksichtigte Toleranzen der Unterkonstruktion können das optische Erscheinungsbild beeinträchtigen und zu Bauschäden führen. Beim Bauen im Bestand

in Stahlleichtbauweise haben die Toleranzen der Bestandskonstruktion daher eine besondere Bedeutung.

An zwei Beispielgebäuden konnte gezeigt werden, dass normative Vorgaben nicht als durchgehend erfüllt angenommen werden dürfen. Stattdessen sollte eine individuelle Bestandsaufnahme erfolgen. Sanierungsmaßnahmen müssen so geplant werden, dass vorhandene Toleranzen ausgeglichen werden können.

4.3 Sanierung von Stahlleichtbaufassaden **Refurbishment of lightweight steel construction façades**

4.3.1 Allgemeines **Preface**

Als Stahlleichtbaufassaden werden in diesem Bericht Fassaden mit dünnwandiger Stahl-Tragschale verstanden. Bislang wurden diese Fassaden im Industrie- und Gewerbebau fast ausschließlich aus Sandwichelementen und Kassettenkonstruktionen hergestellt.

In diesem Abschnitt werden die aus statischer Sicht relevanten Aspekte zur energetischen Sanierung von Sandwichelement- und Kassettenprofilfassaden vorgestellt und erörtert.

4.3.2 Veränderte Lastannahmen **Changed load assumptions**

Bei der Sanierung müssen unmittelbar von der Änderung berührte Bauteile mit aktuellen Lastannahmen erneut statisch nachgewiesen werden, vgl. Kapitel 2.3.2. Dies betrifft bei Fassaden zunächst Windlastannahmen. Hierbei müssen häufig in den Eckbereichen der Gebäude deutlich erhöhte Windsoglasten berücksichtigt werden. Auch in anderen Bereichen kann der statische Nachweis der Bestandsbauteile mit erhöhten Windlastannahmen erforderlich sein. Mit den in Kapitel 4.1 vorgestellten Arbeitshilfen (Diagramme und Berechnungsverfahren) kann die Änderung der Windlastannahmen einfach bestimmt werden.

Zusätzlich muss bei Sanierungen mit Sandwichelementen der Lastfall Temperatur berücksichtigt werden. Dieser Lastfall kann insbesondere bei Mehrfeldträgersystemen bemessungsmaßgebend sein, siehe dazu Kapitel 4.3.5.3.3.

4.3.3 Maßtoleranzen **Dimensional tolerances**

Stahlleichtbausysteme werden mit hoher Präzision gefertigt und haben hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit ihrer Montage, siehe Kapitel 4.2.3. Bereits geringe Maßabweichungen können bei Sandwichelementen dazu führen, dass die profilierten Längsfugen undicht werden und die Montage an unebenen Unterkonstruktionen kann insbesondere bei Mehrfeldträgersystemen zu Vorschädigungen der Deckschichten führen. Lokale Verformungen infolge der Montage an unebenen Tragstrukturen können auch bei Kassettenprofilen die Tragfähigkeit erheblich reduzieren.

Folglich sollte bei der Sanierung von Stahlleichtbaufassaden eine genaue Bestandsaufnahme unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte erfolgen:

- Ist die bestehende Fassade technisch (noch) voll funktionsfähig?
- Genügt die bestehende Fassade den Toleranzanforderungen der geplanten Sanierungsmaßnahme?

4.3.4 Sanierung von Sandwichelementfassaden Refurbishment of sandwich panel façades

Bestehende Sandwichelementfassaden können für die energetische Sanierung der Gebäudehülle einfach zurückgebaut und durch neue Sandwichelemente mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften ersetzt werden. Genügt die Unterkonstruktion den statischen Anforderungen unter Berücksichtigung der aktuellen Lastannahmen, kann diese erneut verwendet werden. Dies ist im Einzelfall zu prüfen.

Alternativ kann das neue Sandwichelement an die statischen Erfordernisse angepasst werden. Eine horizontale Verlegung mit direkter Befestigung an der primären Tragstruktur ist im Industriebau häufig möglich, eine vertikale Verlegung stark profilierter Sandwichelemente erlaubt hohe Spannweiten, die häufig vom Sockel zur Traufe reichen. Andernfalls kann eine neue Unterkonstruktion aus Stahlleichtbauprofilen einfach ausgebildet werden.

Wegen ihrer monolithischen Bauart ist die Entsorgung von alten Sandwichelementen aufwendig und steht einer ganzheitlichen, ressourcenschonenden Nutzung entgegen. Zusätzlich ist eine Entsorgung mit hohen Kosten verbunden, sodass geprüft werden sollte, ob die bestehenden Sandwichelemente als „zusätzliche“ Dämmung ohne statische Funktion im Wandaufbau verbleiben können. Dazu muss zunächst geprüft werden, in welchem Zustand sich die Sandwichelemente befinden. Genügt der Zustand den Anforderungen an eine weitere Nutzung, kann eine Erweiterung mit zusätzlichen Sandwichelementen geplant werden. Dabei sollten die neuen Sandwichelemente an einer zusätzlichen Unterkonstruktion, die direkt an den primären Tragstrukturen befestigt ist, montiert werden. Zur Ermöglichung einer freien Verformung infolge Temperaturdifferenz und zur Vermeidung von Spaltkorrosion sollten die neuen Sandwichelemente nicht direkt an den bestehenden Elementen anliegen. Dies ist bei sichtbar befestigten Bestandselementen (im Bestand weit verbreitet) wegen der vorhandenen Schraubenköpfe ohnehin nicht möglich. Die durch eine zusätzliche Außenschale veränderten Außenabmessungen sind bei freistehenden Gebäuden unproblematisch, bei dichter Bebauung müssen bei der Planung einer Sanierung die vorgeschriebenen Abstandsflächen überprüft werden.

Die Befestigung von modularen Sanierungssystemen an der Außenschale vorhandener Sandwichelemente ist technisch grundsätzlich möglich, aber wegen fehlenden bauaufsichtlichen Zulassungen bauaufsichtlich nur bedingt umsetzbar.

4.3.5 Sanierung von Kassettenprofilfassaden **Refurbishment of liner tray façades**

4.3.5.1 Allgemeines **Preface**

Kassettenprofilfassaden eignen sich wegen ihres modularen Aufbaus hervorragend für eine energetische Sanierung ohne vollständigen Rückbau, bei dem Ressourcen geschont und Kosten eingespart werden können. Bleiben die innenliegenden Kassettenprofile erhalten, kann das Gebäude in der Regel während der Sanierung weiter genutzt werden, was eine Sanierung für Bauherren deutlich attraktiver macht. Zusätzlich entfallen die Kosten für Rückbau und Entsorgung.

Es wird davon ausgegangen, dass das größte Sanierungspotential bei älteren Kassettenprofilfassaden mit Dämmdicken von ca. 80 bis 120 mm und direkt montierter Außenschale vorliegt.

Bei der Sanierung von Kassettenprofilfassaden müssen einige statische Besonderheiten beachtet werden, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Es werden die folgenden Varianten zur energetischen Sanierung von Kassettenprofilfassaden vorgestellt und erörtert:

- Rückbau der Außenschale und Montage zusätzlicher Dämmung mit einer an Distanzbefestigern befestigten Außenschale
- Rückbau der Außenschale und Montage einer Außenschale aus vertikal verlegten Sandwichelementen
- Rückbau der Außenschale und Montage einer Außenschale aus horizontal verlegten Sandwichelementen
- Montage einer zusätzlichen Außenschale aus Sandwichelementen ohne Rückbau der bestehenden Kassettenprofilfassade

4.3.5.2 Sanierung mit Distanzbefestigern **Refurbishment with distance fasteners**

Kassettenprofilfassaden können aus statischer Sicht einfach durch Montage zusätzlicher Dämmung und Befestigung der Außenschale mit Distanzbefestigern energetisch saniert werden, siehe Abbildung 4-69, wenn ein erneuter statischer Nachweis der Kassettenprofile mit aktuellen Windlastannahmen möglich ist. Dies kann mit den in Kapitel 4.1 vorgestellten Arbeitshilfen überprüft werden.



Abbildung 4-69: Sanierung einer Kassettenprofilfassade mit Distanzbefestigern [41]

Figure 4-69: Refurbishment of liner tray façade with distance fasteners [41]

Die Überdämmung der schmalen Kassettenurte mit 40 bis 80 mm Mineralwolle (mit Distanzbefestigern derzeit maximal möglich) führt zu einer erheblichen Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften. Genügt dies nicht den bauphysikalischen Anforderungen, muss ein alternatives Sanierungskonzept gewählt werden.

4.3.5.3 Sanierung mit vertikal verlegten Sandwichelementen **Refurbishment with vertically mounted sandwich panels**

4.3.5.3.1 Allgemeines **Preface**

Kassettenprofilfassaden sind sehr gut für eine energetische Sanierung mit marktüblichen Sandwichelementen geeignet. Dazu wird die bestehende Außenschale zurückgebaut und durch Sandwichelemente ersetzt. So können die Kassettenprofile und die bestehende Dämmung weiterverwendet werden, was die Kosten für Demontage und Entsorgung erheblich reduziert und den finanziellen Anreiz für eine energetische Sanierung erhöht. Ein weiterer Vorteil dieser „Hybridbauweise“ ist, dass die Gebäudehülle bei der Sanierung durchgehend geschlossen bleibt und daher die Gebäudenutzung nicht über einen längeren Zeitraum erheblich eingeschränkt wird. Bauartbedingt erlauben Sandwichelemente sehr kurze Bauzeiten. So können auch die Fassaden größerer Gebäude innerhalb weniger Wochen vollständig saniert werden.

Wegen der unterschiedlichen Baubreiten von Kassettenprofilen (in der Regel ca. 600 mm) und Sandwichelementen (in der Regel ca. 1000 mm) ist bei heute üblicher, verdeckter Befestigung der Sandwichelemente in den Längsfugen nur die vertikale Verlegung der Sandwichelemente direkt auf den Kassettenprofilen möglich, siehe Abbildung 4-70.

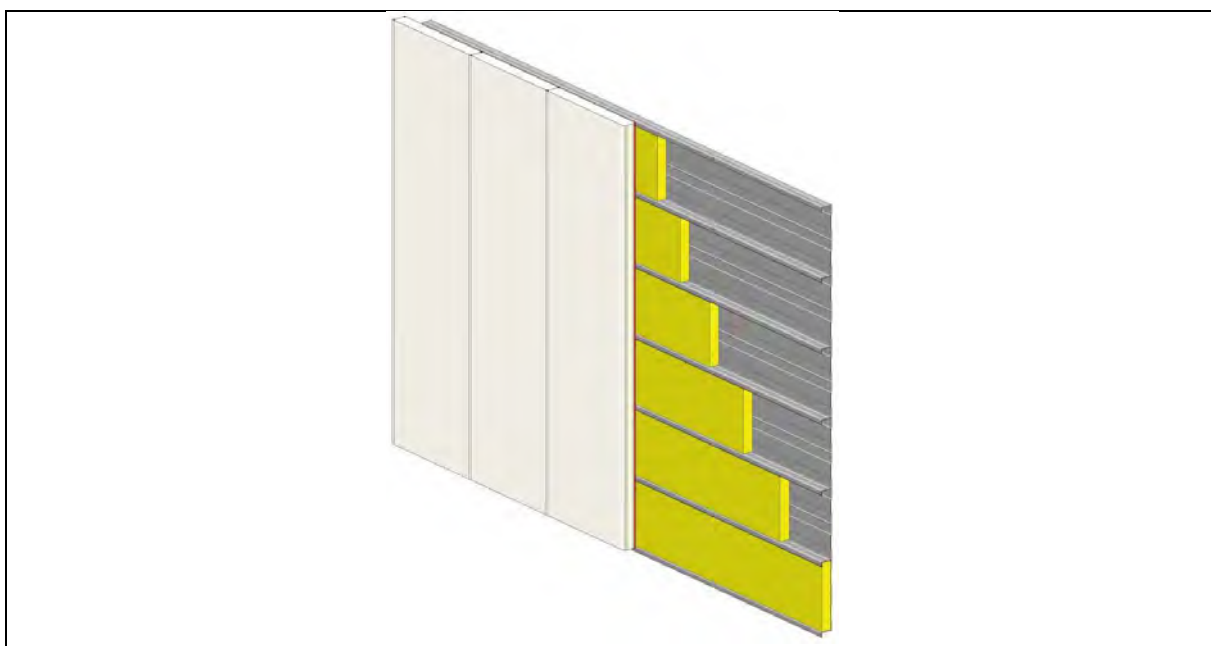


Abbildung 4-70: „Hybridsanierung“ einer Kassettenprofilfassade mit vertikal verlegten Sandwichelementen

Figure 4-70: “Hybrid refurbishment” of a liner tray façade with vertically mounted sandwich panels

Hier können Befestigungsmittel in den Kreuzungspunkten der Längsfugen der Sandwichelemente mit den schmalen Kassettengurten angeordnet werden. Im üblichen Industrie- und Gewerbebau (bis ca. 20,00 m Gebäudehöhe) können die Sandwichelemente ohne Querstoß vom Sockel bis zur Traufe verlegt werden.

Auf die baustatischen Besonderheiten von Hybridfassaden mit vertikal verlegten Sandwichelementen wird in diesem Abschnitt näher eingegangen.

4.3.5.3.2 Seitliche Halterung der schmalen Kassettengurte *Lateral support for small liner tray flanges*

Die schmalen Gurte der Kassettenprofile sind bauartbedingt stabilitätsgefährdet und müssen gegen seitliches Ausweichen gehalten werden. Dazu ist eine schubsteife Außenschale erforderlich, die in regelmäßigem Abstand mit den Gurten verbunden wird, siehe Kapitel 2.3.1.3.5.

Bei einer Hybrid-Sanierung mit vertikal verlegten Sandwichelementen muss folglich die Sandwich-Außenschale die Kassettenprofile gegen seitliches Ausweichen stabilisieren. Die ansetzbare Schubsteifigkeit der Sandwichelemente zur Stabilisierung der schmalen Kassettengurte hängt dabei maßgebend von der Steifigkeit der Verbindungen ab. Sind je Sandwichelement und Kassettenprofil mindestens zwei Befestigungspunkte vorhanden, wird das seitliche Ausweichen der schmalen Kassettengurte behindert. Bei mit nur einem Befestigungsmittel verdeckt in der Längsfuge befestigten Sandwichelementen ist zur Behinderung seitlichen Ausweichens der Kassettengurte eine Kopplung mit einem Festpunkt erforderlich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens [89] wurden die Verdreh- und Verschiebungsbehinderung von schmalen Kassettengurten durch vertikal verlegte Sandwichelemente berechnet:

In [92] wird ein Verfahren zur Ermittlung der Schubsteifigkeit von Sandwichelementen vorgestellt, das -auf der sicheren Seite liegend- die Schubkraftübertragung in den Längsstößen der Sandwichelemente vernachlässigt. Für ein Sandwichelement mit Deckschichten aus Stahl S320 und einer Nennblechdicke von 0,5 mm kann nach [92] konservativ eine Verbindungssteifigkeit von $k_v = 2,5 \text{ kN/mm}$ angesetzt werden. Die Kerndicke kann dabei zunächst vernachlässigt werden. Bei sichtbar befestigten Sandwichelementen werden Verdrehungen der zu stabilisierenden schmalen Kassettengurte gemäß Abbildung 4-71 behindert.

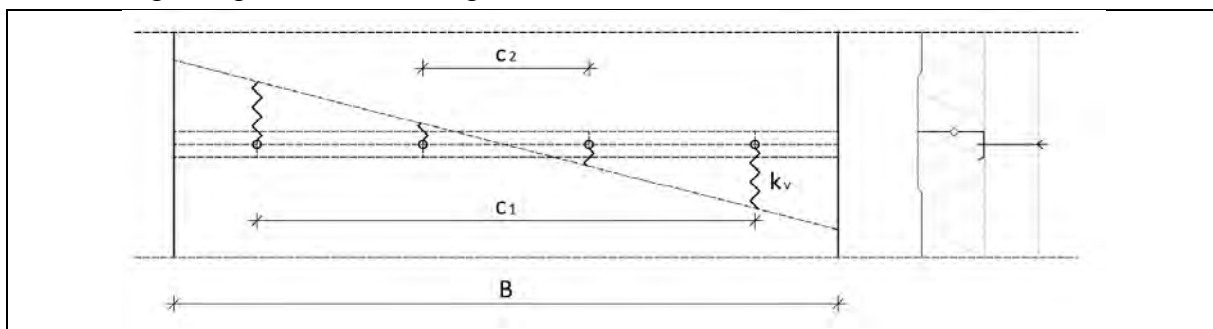


Abbildung 4-71: Verdrehbehinderung durch ein Sandwichelement [89]

Figure 4-71: Torsion obstruction due to a sandwich panel [89]

Die Schubsteifigkeit der Sandwichelemente lässt sich nach [92] wie folgt ableiten.

$$s = k_v / (2 \cdot B) \cdot \sum c_k^2 \quad \text{Gl. 4-28}$$

Eine Kopplung mit einem Festpunkt behindert die Verschiebung der schmalen Kassettengurte in Spannrichtung der Sandwichelemente. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung der Schubsteifigkeit und ermöglicht auch die Stabilisierung mit nur einem Befestigungsmittel verdeckt in der Längsfuge befestigten Sandwichelementen. Die Sandwichelemente sollten nach [91] über eine querkraftbeanspruchte Schraube mit dem Festpunkt gekoppelt werden: Eine direkte Auflagerung würde zwar die Steifigkeit weiter erhöhen, ist jedoch wegen von der Schnittkante der Deckschichten ausgehender Korrosionsgefahr nicht empfehlenswert.

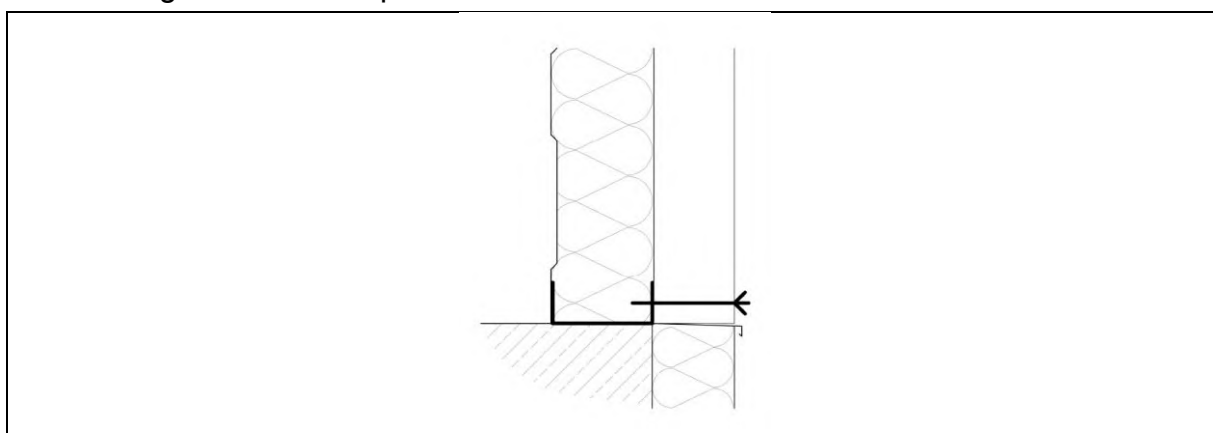


Abbildung 4-72: Fußpunkt als Festpunkt [89]

Figure 4-72: Base point as fixed point [89]

Bedingt durch das querkraftbeanspruchte Verbindungsmittel besitzt der Auflagerpunkt Nachgiebigkeit. Nach [91] ergibt sich je Befestigungspunkt die folgende effektive Verbindungssteifigkeit.

$$\bar{k}_v = 1/(k_v + m/k_{v,1}) \quad \text{Gl. 4-29}$$

mit k_v Steifigkeit der Verbindung mit dem zu stabilisierenden Bauteil
 $k_{v,1}$ Steifigkeit der Verbindung mit dem starren Auflager
 m Anzahl der zu stabilisierenden Bauteile

Über eine verschmierte Federsteifigkeit K_v kann nach [91] die aus der Verschiebungsbehinderung resultierende Stabilisierungswirkung ausgedrückt und in eine virtuelle Schubsteifigkeit ΔS umgerechnet werden.

$$\Delta S = K_v \cdot \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 = \frac{n_f}{B} \cdot \bar{k}_v \cdot \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 \quad \text{Gl. 4-30}$$

Die Schubsteifigkeit der Sandwichelemente setzt sich zusammen aus dem Anteil der Verdrehbehinderung S_i und dem Anteil der Verschiebungsbehinderung ΔS_i . Um von einer Unverschieblichkeit der seitlichen Halterung ausgehen zu können, muss die errechnete Schubsteifigkeit größer sein als die Mindestschubsteifigkeit.

In Abschnitt 10.1.1. des Eurocode 3 Teil 1-3 [54] wird eine Mindestschubsteifigkeit angegeben, die eine Außenschale für die Annahme einer seitlichen Halterung der Gurte in Verbindungsstellen erfüllen muss.

$$S \geq (EI_w \cdot \frac{\pi^2}{L^2} + GI_T + EI_z \cdot \pi^2/L^2 \cdot 0,25 \cdot h^2) \cdot 70/h^2 \quad \text{Gl. 4-31}$$

Diese Gleichung wurde für biegedrillknickgefährdete Pfetten hergeleitet, die im Ganzen seitlich ausweichen und verdrehen können. Da Kassettenprofile lediglich im Bereich der schmalen Gurte ausweichen und verdrehen können ist fraglich, ob die Grenzs Schubsteifigkeit für Kassettenprofile mit diesem Ansatz berechnet werden sollte. [89] Ein alternativer Ansatz zur Berechnung der Grenzs Schubsteifigkeit für die Annahme einer seitlichen Halterung wird in [90] vorgestellt.

$$S \geq 10,18 \cdot \frac{M_{pl,y}}{h} - 4,31 \cdot EI_z/L^2 \left(-1 + \left(1 + 1,86 \cdot \frac{c^2}{h^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \quad \text{Gl. 4-32}$$

$$\text{mit } c^2 = \pi^2 \cdot EI_w + GI_T \cdot L^2/(EI_z)$$

Diese Grenzs Schubsteifigkeit setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Auf der sicheren Seite liegend kann sie unter Vernachlässigung der Eigensteifigkeiten des Trägers (EI_z , EI_w , GI_T) berechnet werden.

Alternativ, oder wenn die Grenzs Schubsteifigkeit durch das verwendete Sandwichelement nicht erreicht werden kann, kann nach [7] gemäß der folgenden Formel die teilweise vorhandene Verschiebungsbehinderung als elastische Bettung bei der Berechnung der idealen Verzweigungslast wie folgt berücksichtigt werden.

$$N_{cr} = (\pi/L)^2 \cdot EI + \Delta S_i + S_i \quad \text{Gl. 4-33}$$

Die Schubsteifigkeiten der Sandwichelemente in einer Hybridfassade mit vertikal verlegten Sandwichelementen wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens [89] gemäß Gl. 4-28 und Gl. 4-30 für ein typisches Hallenbauwerk bestimmt, siehe

Abbildung 4-73 und Abbildung 4-74. Es wird davon ausgegangen, dass je Sandwichelement bei einer Baubreite von 1000 mm maximal fünf Befestigungsmittel (im Abstand von 200 mm) angeordnet werden. Bei einer Höhe von 9000 mm müssen 15 schmale Kassettengurte stabilisiert werden. Die Spannweite der Kassettenprofile beträgt hier 4800 mm.

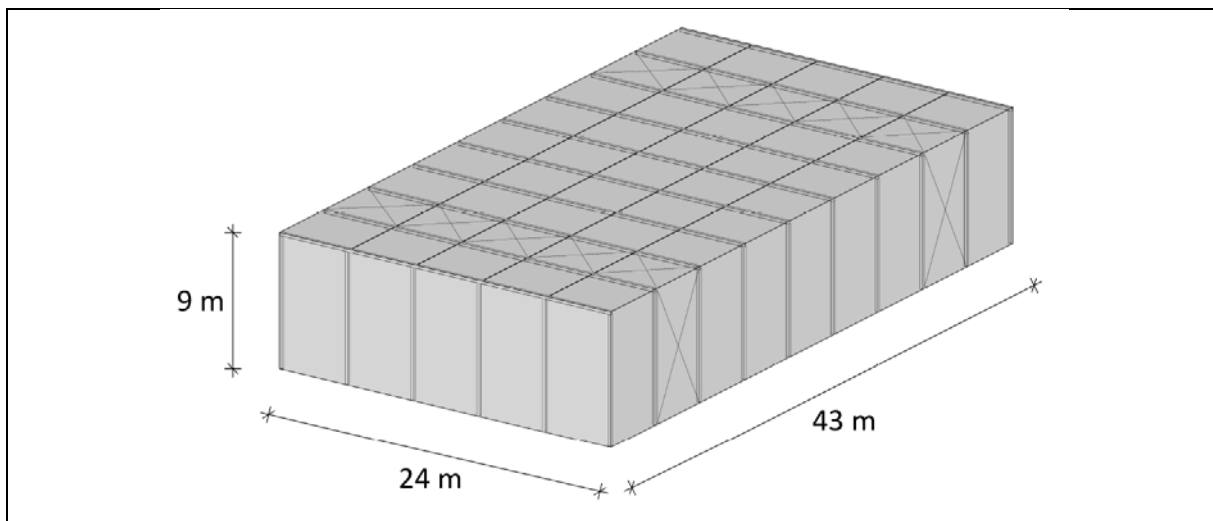


Abbildung 4-73: Beispielgebäude zur Bestimmung der Schubsteifigkeit [89]

Figure 4-73: Sample building for determination of shear stiffness [89]

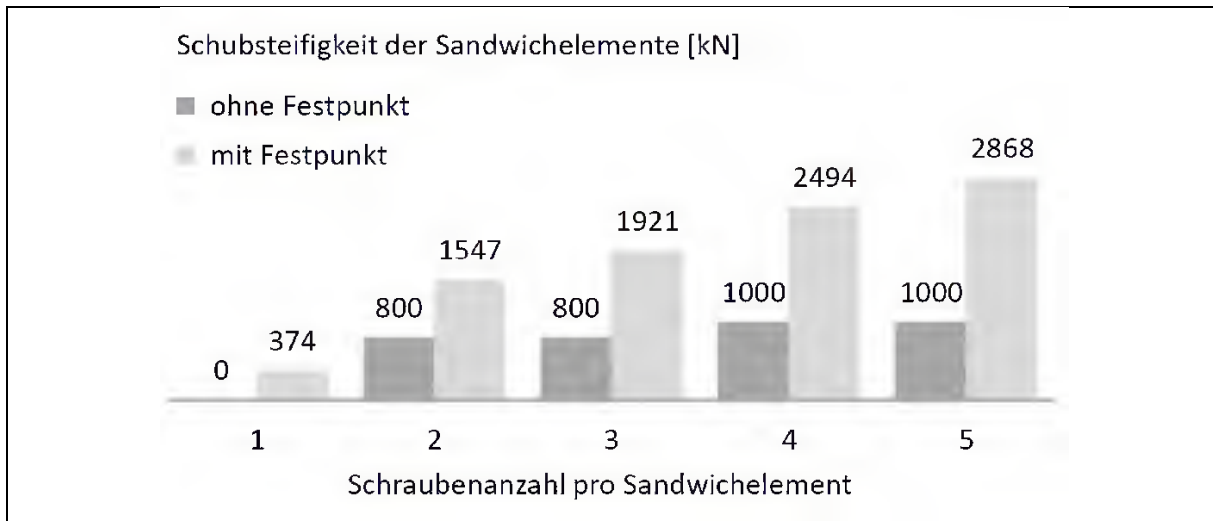


Abbildung 4-74: Schubsteifigkeit der Sandwichelemente in Abhängigkeit von der Schraubenzahl [89]

Figure 4-74: Shear stiffness of sandwich panels depending on fixations count [89]

Wird die geringe Eigensteifigkeit der biegeknickgefährdeten schmalen Gurte der Kassettenprofile vernachlässigt, ist nach Gl. 4-32 die Grenzschersteifigkeit für die Annahme einer seitlichen Halterung bei verdeckter Befestigung in der Längsfuge mit $S = 374$ kN (siehe Abbildung 4-74) eingehalten, wenn die Momentenbeanspruchbarkeit des Kassettenprofils für andrückende Lasten kleiner ist als

$$M_{Rd} = 374 \text{ kN} \cdot 0,0995 \text{ m} / 10,81 = 3,44 \text{ kNm.}$$

Vergleicht man diesen Wert mit den Widerstandswerten aus den bauaufsichtlichen Zulassungen üblicher Kassettenprofile, ist dies für das gewählte Beispiel bei einer Steghöhe von 100 mm bis zu einer Nennblechdicke von $t_N = 1,13$ mm erfüllt.

Ob verdeckt befestigte Sandwichelemente für Kassettenprofile ein Festlager gegen seitliches Ausweichen darstellen können, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auch numerisch untersucht. Dazu wurde für ein Kassettenprofil mit Breite 600 mm und Höhe 100 mm ein FE-Modell erstellt. Das Modell wurde mit der Software „ANSYS“ erstellt. Gemäß Eurocode 3 Teil 1-5 [95] Anhang C wurde ein bilineares Materialmodell gewählt, siehe Abbildung 4-75.

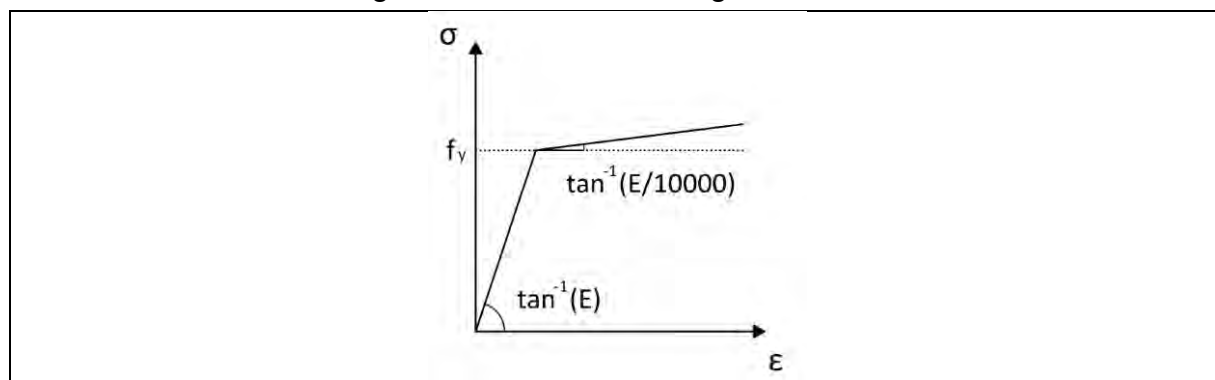


Abbildung 4-75: Bilineares Materialmodell für FE-Untersuchungen [89]

Figure 4-75: Bilinear material model for FE-research [89]

Das Tangentenmodul verfügt über eine geringe Steigung ($E/10000$), um bei der Berechnung Konvergenzprobleme zu vermeiden. Das Modell für die numerischen Berechnungen besteht aus einem ganzen und zwei halben Kassettenprofilen, die in vorgegebenem Abstand in ihren Längsfugen miteinander verbunden werden, siehe Abbildung 4-76.

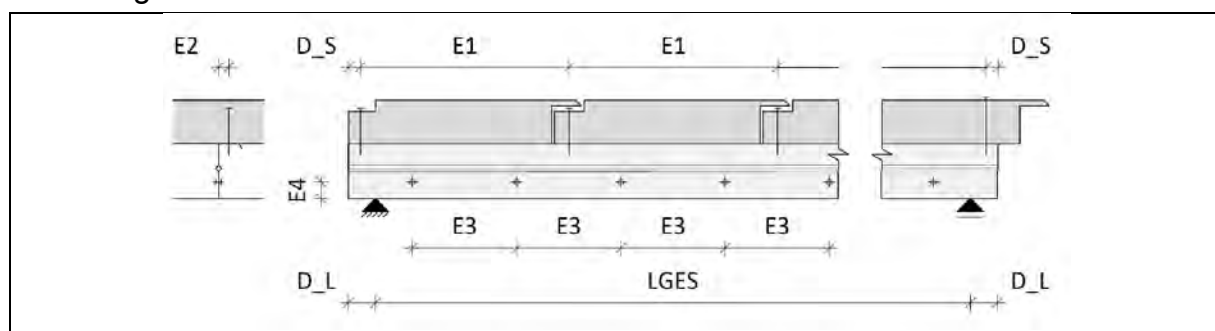


Abbildung 4-76: Geometrieparameter der Schraubenabstände [89]

Figure 4-76: Geometry parameters of bolt spacing [89]

„Shell181“ verwendet. Das Modell wurde an 2012/2013 am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt durchgeführten experimentellen Untersuchungen [93], [94] kalibriert.

Nach Gleichung (4-2) ergibt sich bei verdeckter Befestigung (Kopplung der Sandwichelemente mit einem Festpunkt) für das in Abbildung 4-73 dargestellte Beispielgebäude die Federsteifigkeit der quasi-starren Kopplung mit der Außenschale zu $k_v = 160$ N/mm. In den numerischen Untersuchungen wurde das Tragverhalten der Kassettenprofile bei seitlicher Halterung als Festlager, mit $k_v = 160$ N/mm und als

Referenzwert mit $k_v = 0,01 \text{ N/mm}$ vergleichend betrachtet. Für die Spannweite 4800 mm wurde der Lastfall Winddruck eines üblichen Kassettenprofils mit Höhe 100 mm und Nennblechdicke 0,75 mm abgebildet. Die folgenden Abbildung 4-77 und Abbildung 4-78 zeigen die Verformungsfiguren bei unterschiedlicher Steifigkeit der seitlichen Halterung. Bei zu geringer Steifigkeit weichen die schmalen Gurte erwartungsgemäß seitlich aus, was die Tragfähigkeit erheblich reduziert.

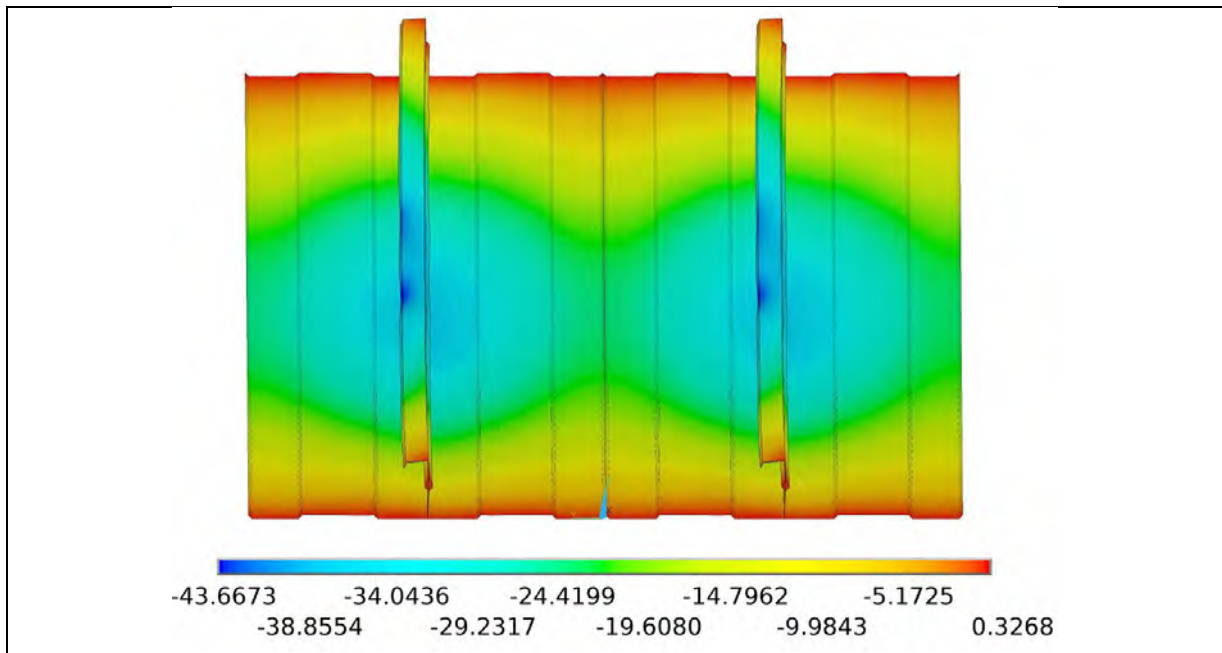


Abbildung 4-77: Verformungsfigur seitliches Ausweichen bei $k = 160 \text{ N/mm}$ [89]

Figure 4-77: Deformed shape longitudinal displacement with $k = 160 \text{ N/mm}$ [89]

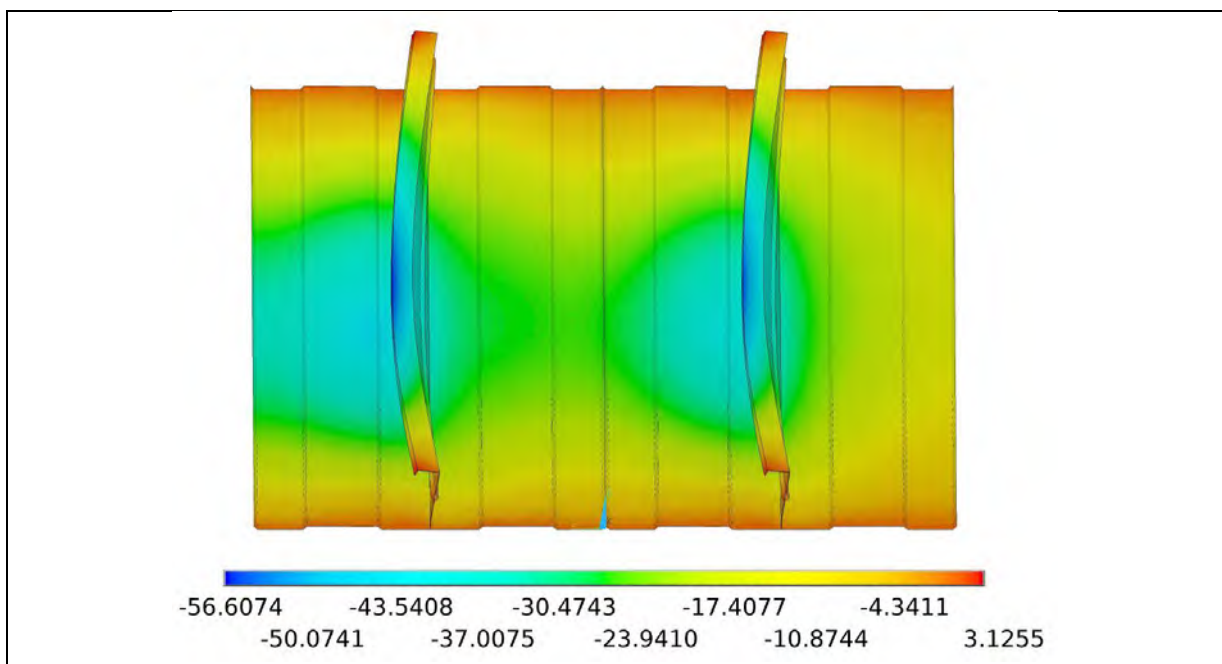
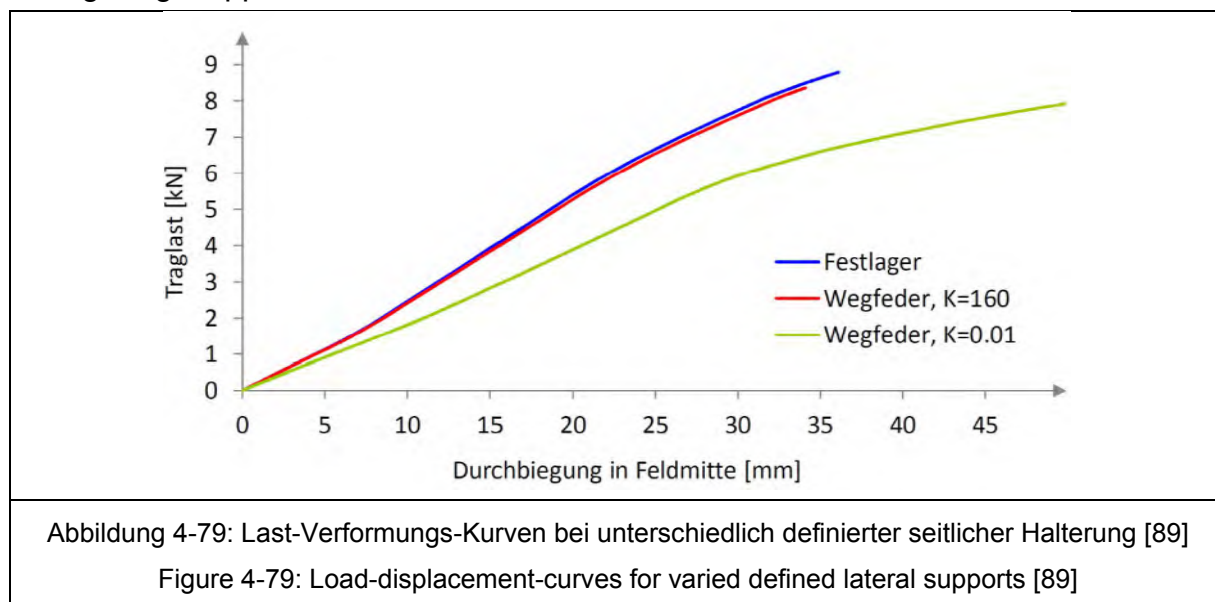


Abbildung 4-78: Verformungsfigur seitliches Ausweichen bei $k = 0,01 \text{ N/mm}$ [89]

Figure 4-78: Deformed shape longitudinal displacement with $k = 0,01 \text{ N/mm}$ [89]

Die folgende Abbildung 4-79 zeigt die zugehörigen Last-Verformungs-Kurven. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Tragverhaltens mit $k = 160 \text{ N/mm}$ und einer starren seitlichen Halterung. Folglich können unter üblichen Randbedingungen auch verdeckt in der Längsfuge befestigte Sandwichelemente eine starre seitliche Lagerung für die schmalen Kassettengurte darstellen, wenn sie über einen Festpunkt mit den Auflagern gekoppelt sind.

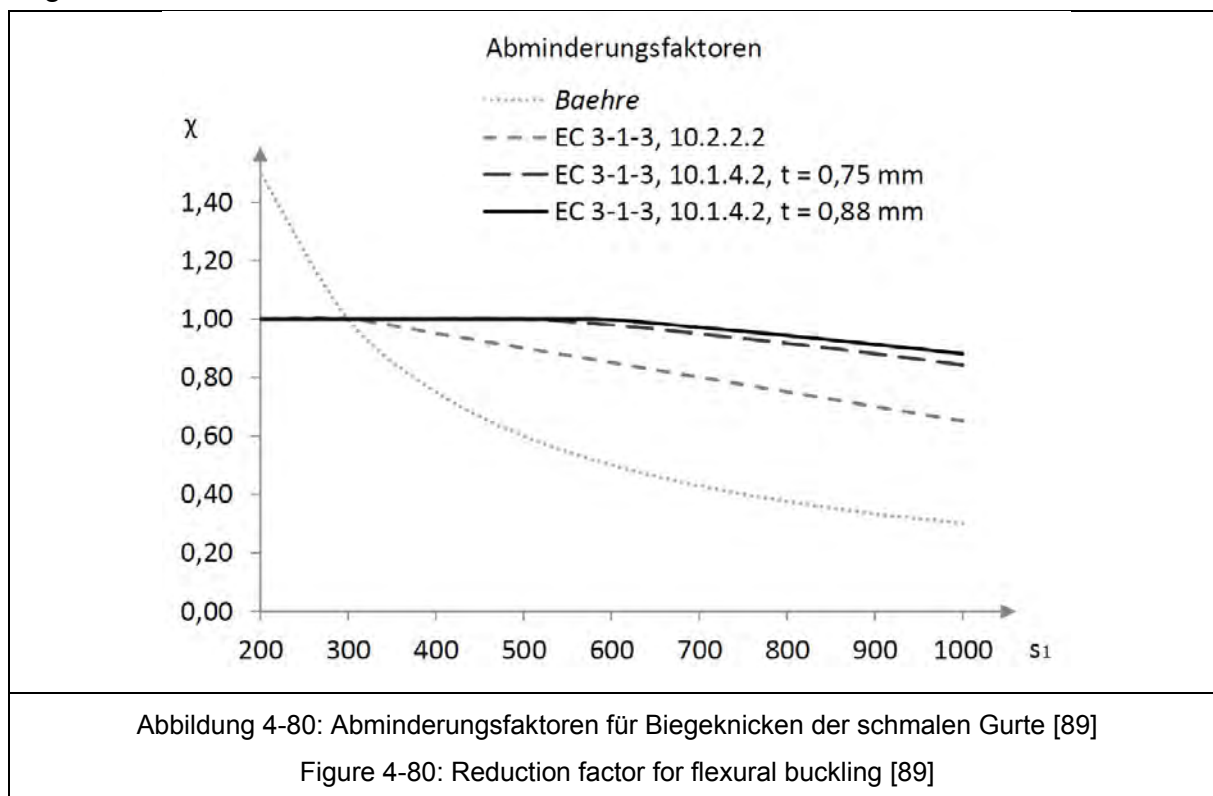


Sind die schmalen Kassettengurte druckbeansprucht und somit biegeknickgefährdet, kann der Abstand der seitlichen Halterungen einen Einfluss auf die Momententragfähigkeit haben. Dies wurde anhand von experimentellen Untersuchungen bereits Anfang der 1980er Jahre in [87] gezeigt. Baehre beschreibt in [87] die Abnahme der Tragfähigkeit mit einer hyperbolischen Funktion. Die Abminderung erfolgt ab einem Abstand der seitlichen Halterung von 300 mm. Auch nach aktuell gültigem Eurocode 3 Teil 1-3 [54] Abschnitt 10.2.2.2 ist die Momententragfähigkeit ab einem Abstand der Befestigungspunkte von 300 mm mit einem Korrelationsfaktor β_b abzumindern.

Zusätzlich beschreibt der Eurocode 3 Teil 1-3 [54] in Abschnitt 10.1.4.2 ein Verfahren, mit dem die Knickbeanspruchbarkeit von freien Gurten bestimmt werden kann. Dieser Abschnitt bezieht sich zwar auf kaltgeformte Pfetten, das Verfahren kann jedoch auch für Kassettenprofile angewendet werden [89].

Für zwei beispielhaft ausgewählte Kassettenprofile eines bestimmten Herstellers mit Breite 600 mm, Höhe 100 mm und Nennblechdicken von 0,75 mm bzw. 0,88 mm wurden die Abminderungsfaktoren der Momententragfähigkeit in Abhängigkeit vom Abstand der seitlichen Halterung nach allen drei Ansätzen bestimmt und im folgenden Diagramm gegenübergestellt. Nach [87] und Eurocode 3 Teil 1-3 [54] Abschnitt 10.2.2.2 wird die Tragfähigkeit bereits ab einem Abstand der seitlichen Halterung von 300 mm abgemindert. Bei dem Verfahren nach Eurocode 3 Teil 1-3 [54] in Abschnitt 10.1.4.2 erfolgt die Abminderung Blechdickenabhängig erst ab einem Abstand von 500 mm ($t = 0,75 \text{ mm}$) bzw. 600 mm ($t = 0,88 \text{ mm}$). In einer Hybridfassade mit vertikal verlegten Sandwichelementen, die verdeckt in ihrer Längsfuge befestigt werden beträgt der Abstand der seitlichen Halterung der Kassettenprofile in der Regel ca. 1000 mm,

siehe oben. Nach Eurocode 3 Teil 1-3 [54] Abschnitt 10.2.2.2 beträgt die Abminderung bei diesem Abstand ca. 35 %, wird das Verfahren nach Eurocode 3 Teil 1-3 [54] in Abschnitt 10.1.4.2 angewendet beträgt die Abminderung hier nur 12 % ($t = 0,88$ mm) bzw. 16 % ($t = 0,75$ mm). Folglich sollte bei analytischer Berechnung der Tragfähigkeit der Kassettenprofile in Hybridfassaden das Verfahren nach Abschnitt 10.1.4.2 angewendet werden.



Die analytische Berechnung der Tragfähigkeit von Kassettenprofilen führt, aufgrund der Komplexität ihrer Querschnittsgeometrie, auch mit heutigen Berechnungsansätzen teilweise zu einer deutlichen Unterschätzung der Widerstandswerte. Die in den bauaufsichtlichen Zulassungen vieler im Bestand verbauter Kassettenprofile ausgewiesenen Tragfähigkeiten basieren deshalb auf experimentellen Untersuchungen. Hier wird die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von einem maximal zulässigen Abstand der seitlichen Halterung ausgewiesen. Dieser Abstand ist in der Regel kleiner als 1000 mm (was dem Abstand in einer Hybridfassade mit vertikal verlegten, verdeckt befestigten Sandwichelementen entspricht).

Bei vielen im Bestand verbauten Kassettenprofilen beträgt der maximal zulässige Abstand der seitlichen Halterung 732 mm, was bei üblichen Trapezprofilaußenschalen einer Befestigung in jeder vierten Tiefsicke entspricht. Bei horizontal verlegten Außenschalen stabilisieren vertikal zwischen Innen- und Außenschale verlegte Hut- oder Z-Profile die schmalen Kassettenurte im zulässigen Abstand. In wie weit die Vergrößerung des Abstandes der seitlichen Halterung von 732 mm auf 1000 mm einen Einfluss auf experimentell ermittelte Tragfähigkeiten hat wird in Kapitel 4.3.5.3.4 untersucht.

4.3.5.3.3 Lastfall Temperatur
 Load case temperature

Wird eine bestehende Kassettenprofilfassade mit einer Außenschale aus Sandwichelementen saniert, muss neben den Windlasten der zusätzliche Lastfall Temperatur berücksichtigt werden. Durch die sehr guten Wärmedämmeigenschaften der Kernmaterialien der Sandwichelemente können zwischen innerer und äußerer Deckschicht hohe Temperaturgradienten auftreten, was zu unterschiedlichen Dehnungen führt. Bei Zwei- und Mehrfeldträgersystemen führt dies zu äußeren Zwangsschnittgrößen, die bei der statischen Bemessung der Unterkonstruktion berücksichtigt werden müssen. Die bei der Bemessung anzusetzenden Oberflächentemperaturen sind für den Lastfall Sommer abhängig von der Farbe der äußeren Deckschicht und werden in drei Farbgruppen unterteilt. Der folgenden Tabelle 4-37 können die nach DIN EN 14509 [29] und den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für Sandwichelemente (z. B. [45]) anzusetzenden Oberflächentemperaturen für die äußere Deckschicht entnommen werden.

Tabelle 4-37: Oberflächentemperatur für die äußere Deckschicht [29]

Table 4-37: Surface temperature outside cover sheet [29]

Jahreszeit	Sonnen-einstrahlung	Grenzzustand der Tragfähigkeit T_1 [°C]	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit		
			Farbgruppe	T_1 [°C]	
Winter	-	- 20	alle	- 20	
	-	0	alle	0	
Sommer	Direkt	+ 80	I	+ 55	
			II	+ 65	
			III	+ 80	
			I = sehr hell	II = hell	III = dunkel

An der Innenseite ist nach [29], [45] im Regelfall eine Temperatur T_2 von 20 °C im Winter und 25 °C im Sommer anzusetzen. Folglich ergibt sich im ungünstigsten Fall (Sommer, Farbgruppe III) eine Temperaturdifferenz $\Delta T = 55$ °C.

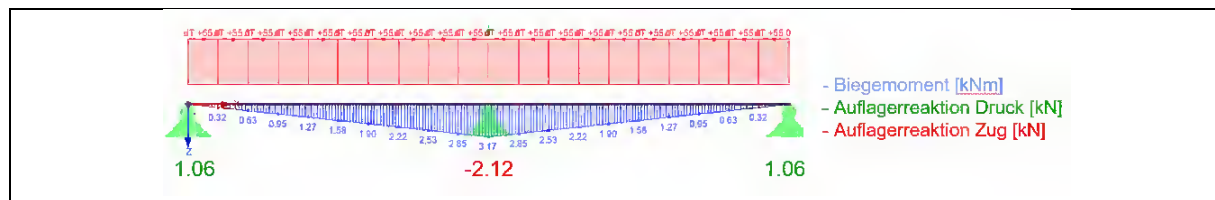


Abbildung 4-81: Biegemoment und Auflagerreaktionen Sandwichelement 2 x 3000 mm

Figure 4-81: Bending moment and support reactions sandwich panel 2 x 3000 mm

Beispielhaft zeigt die folgende Abbildung 4-81 das (für die Biegebemessung des Sandwichelementes maßgebende) Biegemoment, sowie die (für die Bemessung der Unterkonstruktion maßgebenden) Auflagerreaktionen für den Lastfall Temperatur Sommer (mit $\Delta T = 55$ °C) eines beliebig gewählten Sandwichelementes mit 120 mm PUR/PIR-Kern. Die Spannweite beträgt hier 2 x 3000 mm, was einem üblichen

Zweifeldträgersystem entspricht. Aus Gleichgewichtsgründen beträgt die Summe der Auflagerreaktionen Null.

Werden Sandwichelemente in einer Hybridfassade vertikal verlegt, und direkt an den Kassettenprofilen befestigt, müssen sie zur Stabilisierung der schmalen Kassettengurte gegen seitliches Ausweichen in den Kreuzungspunkten mit jedem schmalen Kassettengurt verbunden werden (siehe Kapitel 4.3.5.2). Folglich ergibt sich für die Sandwichelemente ein Mehrfeldträgersystem mit einer Spannweite, die in der Regel 600 mm (übliche Breite der Kassettenprofile) beträgt.

Die folgende Abbildung 4-82 zeigt das Biegemoment und die Auflagerreaktionen des beispielhaft gewählten Sandwichelementes für den Lastfall Temperatur Sommer eines Mehrfeldträgers (10 Felder) mit Spannweite 600 mm. Bei gleicher Gesamtlänge von 6000 mm reduziert sich das für die Biegebemessung der Sandwichelemente maßgebende Biegemoment, die Auflagerreaktionen konzentrieren sich, trotz deutlich kleinerer Spannweite, in ähnlicher Größenordnung wie bei dem zuvor betrachteten Zweifeldträger, an den Endauflagern. Zusätzlich folgt aus statischen Gleichgewichtsbedingungen in diesem Bereich ein Vorzeichenwechsel. Bei Montage der Sandwichelemente ohne zusätzliche Profile im Trauf- und Sockelbereich werden die Kassettenprofile dort also torsionsbeansprucht.

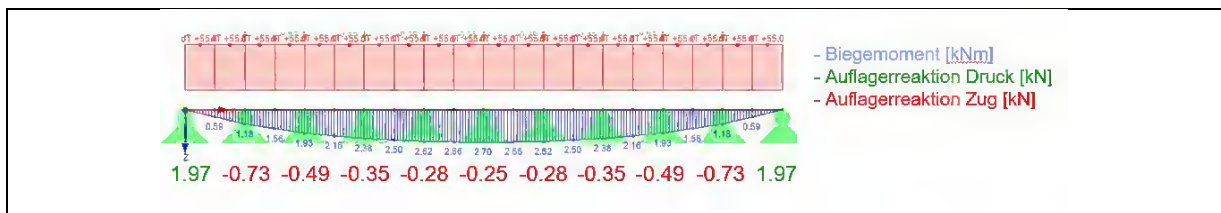


Abbildung 4-82: Biegemoment und Auflagerreaktionen Sandwichelement 10 x 600 mm
 Figure 4-82: Bending moment and support reactions sandwich panel 10 x 600 mm

Mit zunehmender Elementlänge vergrößern sich die Auflagerreaktionen am Elementanfang und -ende. Vergleichend zeigt Abbildung 4-83 einen Mehrfeldträger mit nur 5 Feldern (bei gleicher Spannweite).

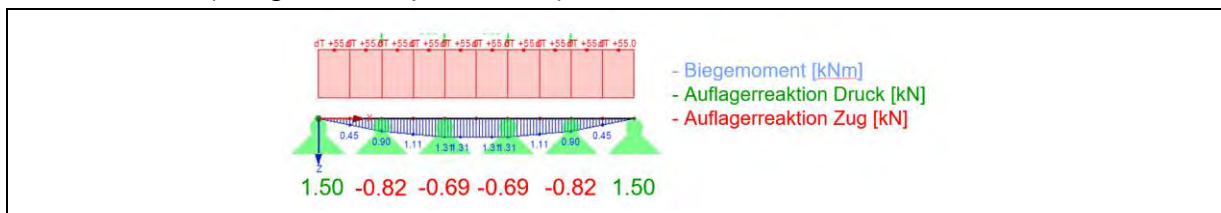


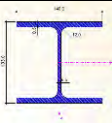
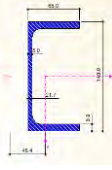
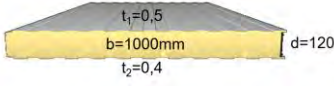
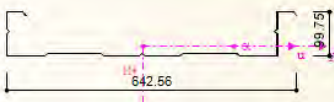
Abbildung 4-83: Biegemoment und Auflagerreaktionen Sandwichelement 10 x 600 mm
 Figure 4-83: Bending moment and support reactions sandwich panel 10 x 600 mm

Der statische Nachweis der Sandwichelemente in Hybridfassaden kann wegen der geringen Spannweite in der Regel erfolgreich geführt werden. Erfolgt die Bemessung der Kassettenprofile einer Hybridfassade unter der Annahme, dass es sich bei den schmalen Kassettengurten um starre Auflager für den Lastfall Temperatur bei der Sandwichelementbemessung handelt, ist der statische Nachweis der Kassettenprofile im Sockel- und Traufbereich wegen zu hoher Querkraft- und Momentenbeanspruchung häufig nicht möglich.

Gegenüber Sandwichelementen und deren üblichen Unterkonstruktionen haben Kassettenprofile eine deutlich geringere Biegesteifigkeit, siehe beispielhaft Tabelle 4-38.

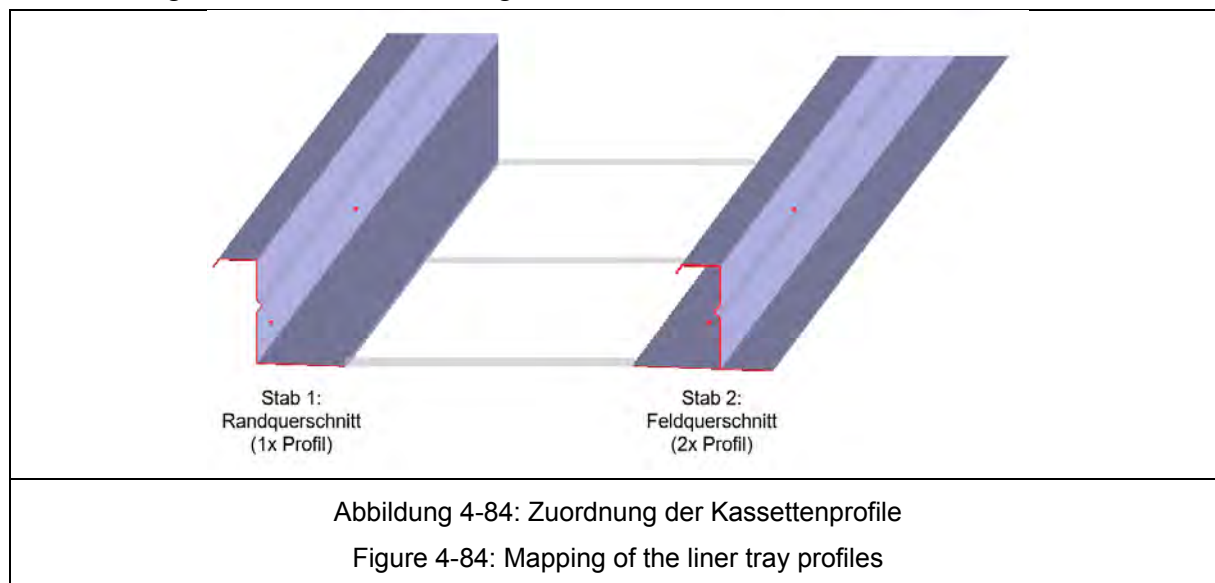
Tabelle 4-38: Vergleich von Flächenträgheitsmomenten

Table 4-38: Comparison of area moments of inertia

Profiltyp		Flächenträgheitsmoment 2. Grades
HEA 120		1030 cm ⁴
UPE 140		600 cm ⁴
Sandwichelement PUR d = 120 mm		303 cm ⁴
Kassettenprofil 600/100 t=0,75mm		82 cm ⁴ (Brutto-QS)

Um den Einfluss der Biegeweichheit der Kassettenprofile auf die tatsächlich auftretenden Zwangskräfte für den Lastfall Temperaturdifferenz in einer Hybridfassade zu untersuchen, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein dreidimensionales Stabwerksmodell entwickelt.

Es werden jeweils zwei halbe Kassettenprofile im Bereich ihrer Stege zu einem Stab zusammengefasst, siehe Abbildung 4-84.



Die Sandwichelemente werden unter Vernachlässigung möglicher Eigensteifigkeiten der Deckschichten modelliert. Die folgende Abbildung zeigt das Stabwerksmodell für einen Fassadenabschnitt von 6000 x 6000 mm. Die Kassettenprofile (hier grau)

spannen horizontal zwischen den primären Tragstrukturen (hier grün). Auf den vertikal verlegten Sandwichelementen (hier blau) wird die Temperaturdifferenz (hier rot) aufgebracht.

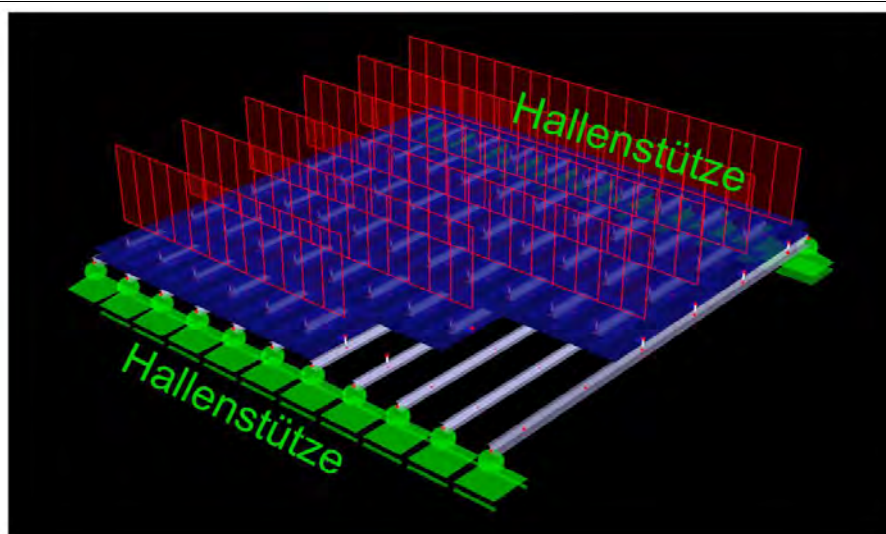


Abbildung 4-85: Stabwerksmodell Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm
 Figure 4-85: Framework simulation façade section 6000 x 6000 mm

Werden beispielhaft die in Tabelle 4.3.4.3.5 gezeigten Querschnitte gewählt, ergibt sich für den in Abbildung 4-85 gezeigten Fassadenabschnitt bei einer Temperaturdifferenz $\Delta T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ die in der folgenden Abbildung 4-86 gelb dargestellte Verformungsfigur.

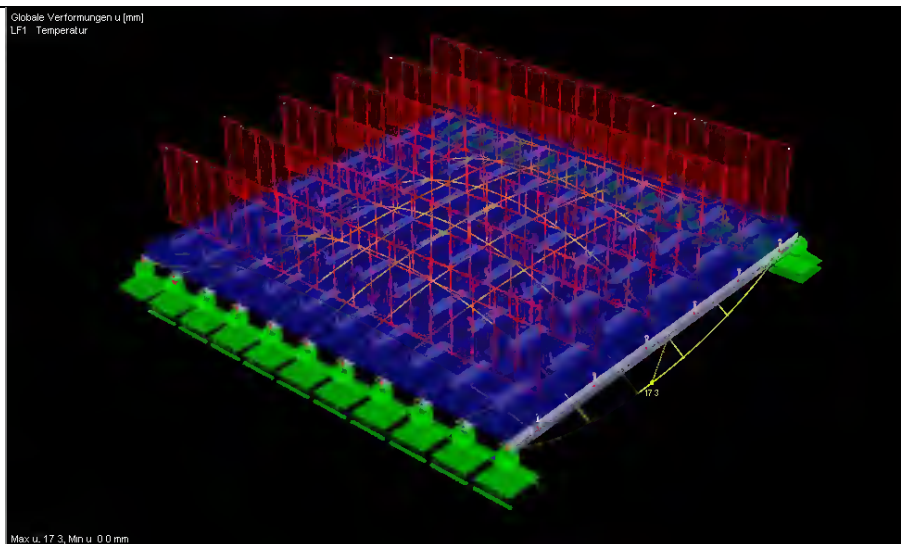


Abbildung 4-86: Verformungsfigur Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm
 Figure 4-86: Deformed shape façade section 6000 x 6000 mm

Die zugehörigen Biegemomente in den Sandwichelementen sind in der folgenden Abbildung 4-87 dargestellt. Sie belegen, dass sich die Sandwichelemente für dieses Beispiel mittig zwischen der primären Tragstruktur nahezu zwangungsfrei verformen können. Lediglich in der Nähe der primären Tragstruktur stellen sich größere Zwangsbeanspruchungen ein. Diese können mit denen bei einer festen Lagerung verglichen werden, siehe dazu Abbildung 4-82.

Erwartungsgemäß werden auch bei dieser Betrachtung die Kassettenprofile im Sockel- und Traufbereich am höchsten beansprucht. Abbildung 4-87 zeigt den zugehörigen Querkraftverlauf.

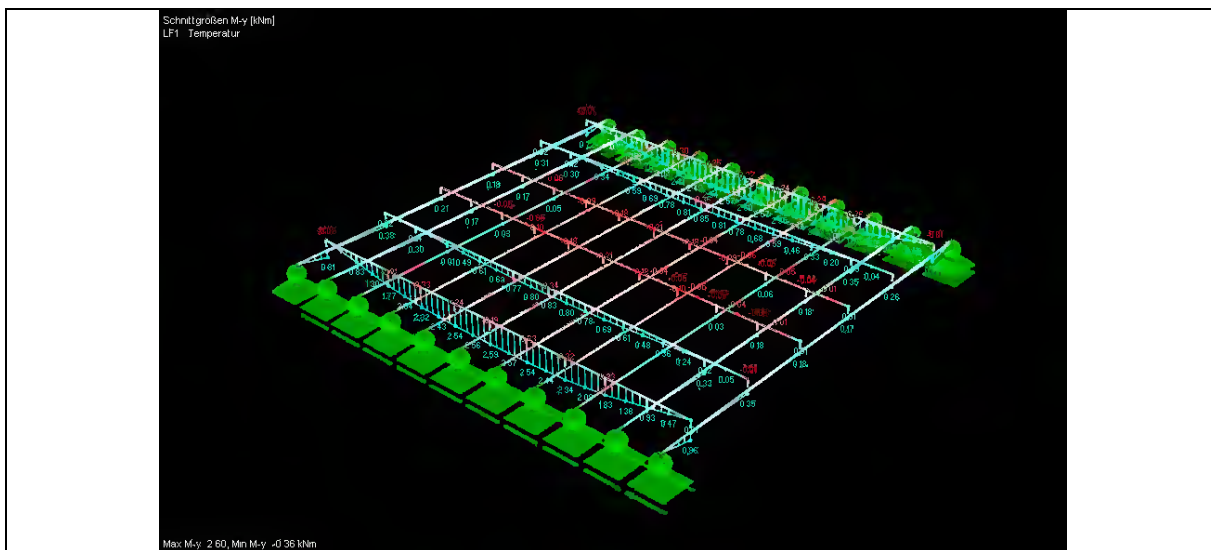


Abbildung 4-87: Querkraft Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Figure 4-87: Shear force façade section 6000 x 6000 mm

Durch zusätzliche Profile im Sockel- und Traufbereich können die Kassettenprofile für den Lastfall Temperatur weiter entlastet werden. Die folgende Abbildung 4-88 zeigt den gewählten Fassadenabschnitt mit zusätzlichen Profilen vom Typ UPE 140 nach Tabelle 4.3.4.3.5 im Sockel- und Traufbereich.

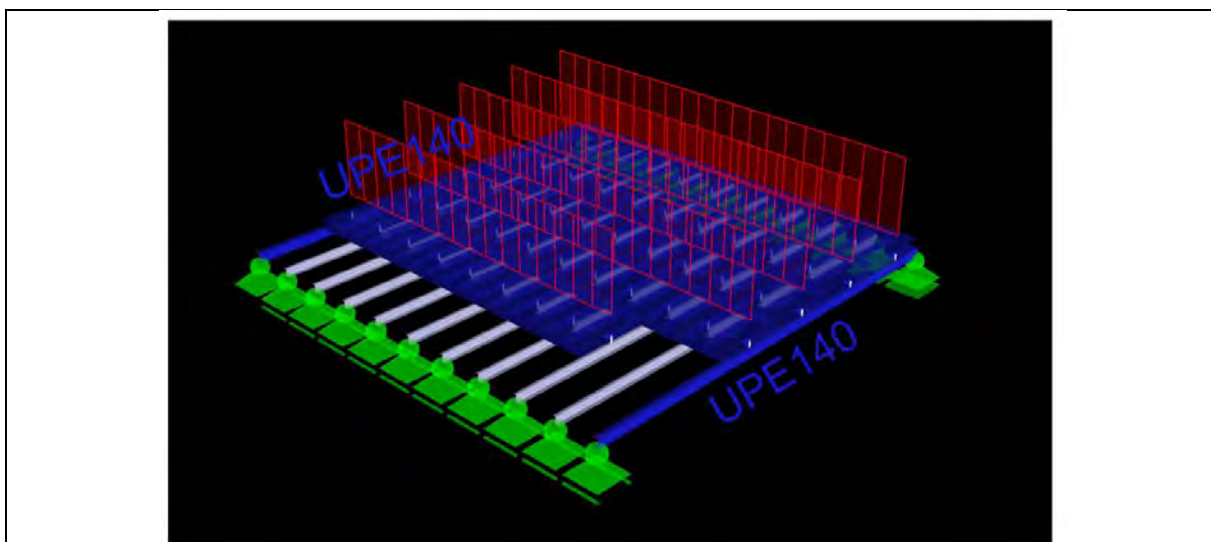


Abbildung 4-88: Stabwerksmodell Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm mit UPE 140 im Sockel- und Traufbereich

Figure 4-88: Framework simulation façade section 6000 x 6000 mm with UPE 140 in plinth and eave area

Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen führen die zusätzlichen Profile im Sockel- und Traufbereich für den Lastfall Temperatur zu einer leichten Erhöhung der Biegemomentbeanspruchung in den Sandwichelementen (ca. 10 %), was mit der

höheren Systemsteifigkeit begründet werden kann, die Kassettenprofile werden jedoch deutlich entlastet. Die Biege- und Querkraftbeanspruchung der Kassettenprofile reduziert sich hier um mehr als 30 %. Die folgende Abbildung 4-89 zeigt die zugehörige Verformungsfigur. Hier liegt die maximale Verformung des Gesamtsystems in der Mitte des Abschnitts. In beiden Fällen beträgt sie etwa $L/350$ (ca. 17 mm).

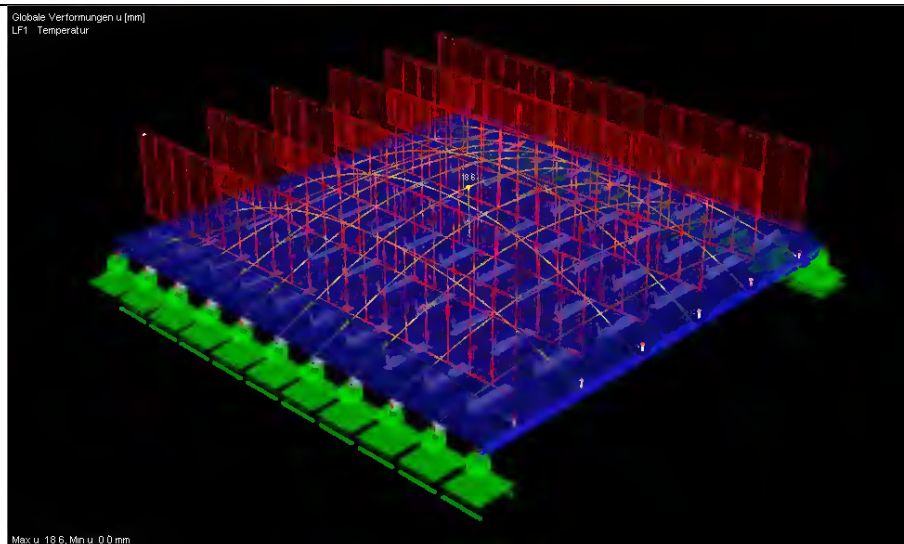


Abbildung 4-89: Verformungsfigur Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm mit UPE 140 im Sockel- und Traufbereich

Figure 4-89: Deformed shape façade section 6000 x 6000 mm with UPE 140 in plinth and eave area

Häufig werden Kassettenprofile in der Praxis als Zwei- bzw. Mehrfeldträger verlegt. Dies führt zu einer höheren Steifigkeit im Bereich der Zwischenaufleger, die sich für den Lastfall Temperaturdifferenz in Hybridfassaden ungünstig auswirkt. Die folgende Abbildung 4-90 zeigt die zugehörige Verformungsfigur eines Zweifeldträgers.

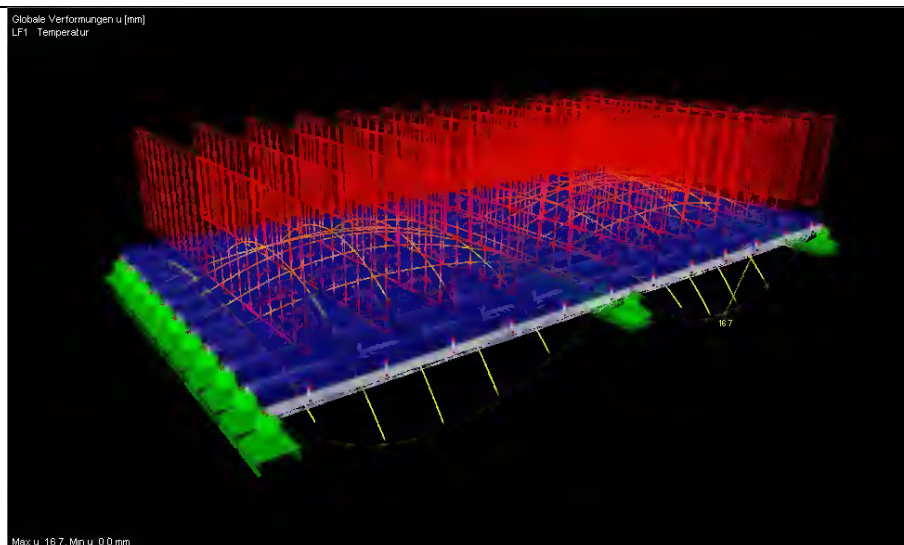


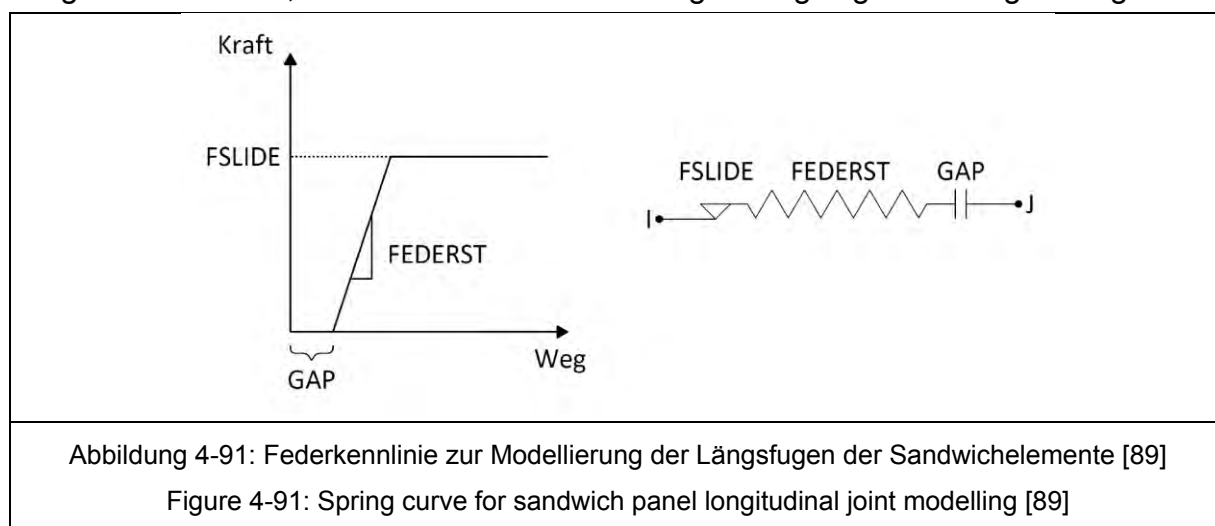
Abbildung 4-90: Verformungsfigur Fassadenabschnitt Zweifeldträger 12000 x 6000 mm

Figure 4-90: Deformed shape façade section two span 12000 x 6000 mm

Bei gleicher Spannweite der Einzelfelder bleibt die maximale Gesamtverformung nahezu unverändert. Die Biegemomente in den Sandwichelementen erhöhen sich im

Bereich des Mittelaufalers jedoch um ca. 20 %. Die Biegemomente in den Kassettenprofilen erhöhen sich unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen um ca. 35 %, die Querkräfte in den Kassettenprofilen um bis zu 45 %. Folglich erfordert die Planung von Hybridfassaden mit Mehrfeldträger-Kassettenprofilen eine gesonderte Betrachtung.

Für eine detailliertere Analyse des Tragverhaltens von Hybridfassaden wurde das Stabwerksmodell anhand von experimentellen und numerischen Untersuchungen kalibriert. Dabei zeigte sich, dass vertikal verlegte Sandwichelemente bei andrückenden Lasten auch in horizontaler Richtung einen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit haben. Die profilierten Längsfugen wurden dabei gemäß der folgenden Abbildung 4-91 als Wegfedern mit einem Spalt abgebildet. Maßgebend für dieses Verhalten sind Montageteranzen und die Dichtbänder in den Längsfugen. Da die Längsfugen von Sandwichelementen herstelllerspezifisch sehr unterschiedlich ausgebildet werden, sind hier zunächst keine allgemeingültigen Aussagen möglich.



Die folgende Abbildung 4-92 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der in Kapitel 4.3.5.3.2 betrachteten Literaturversuche [93], [94] und des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstellten FE-Modells bei gleichen Randbedingungen. Der Anstieg der Steifigkeit ab ca. 30 % der Traglast kann auf das Tragverhalten der Längsfugen der Sandwichelemente bei Belastung quer zur Spannrichtung zurückgeführt werden.

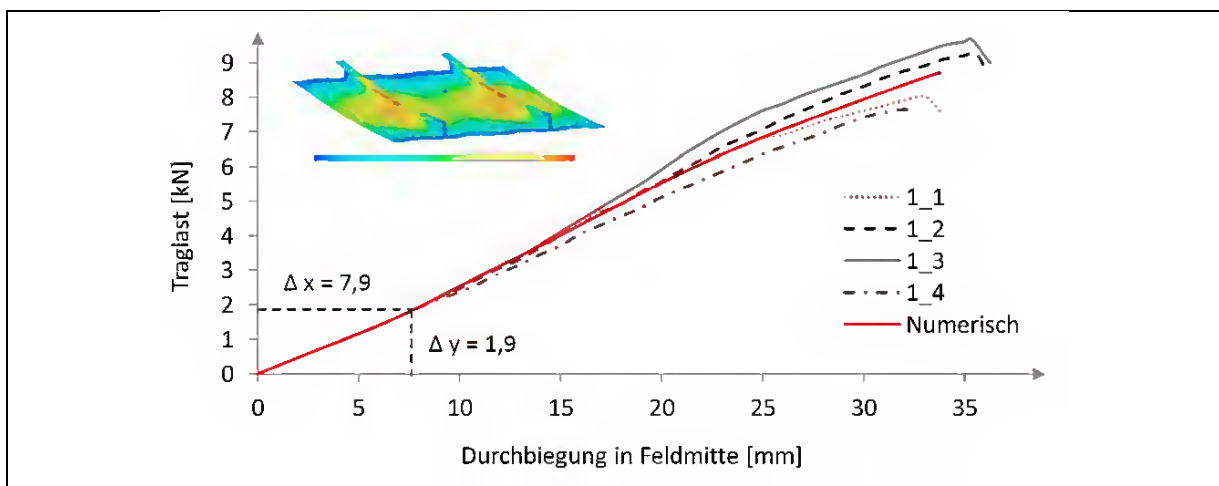
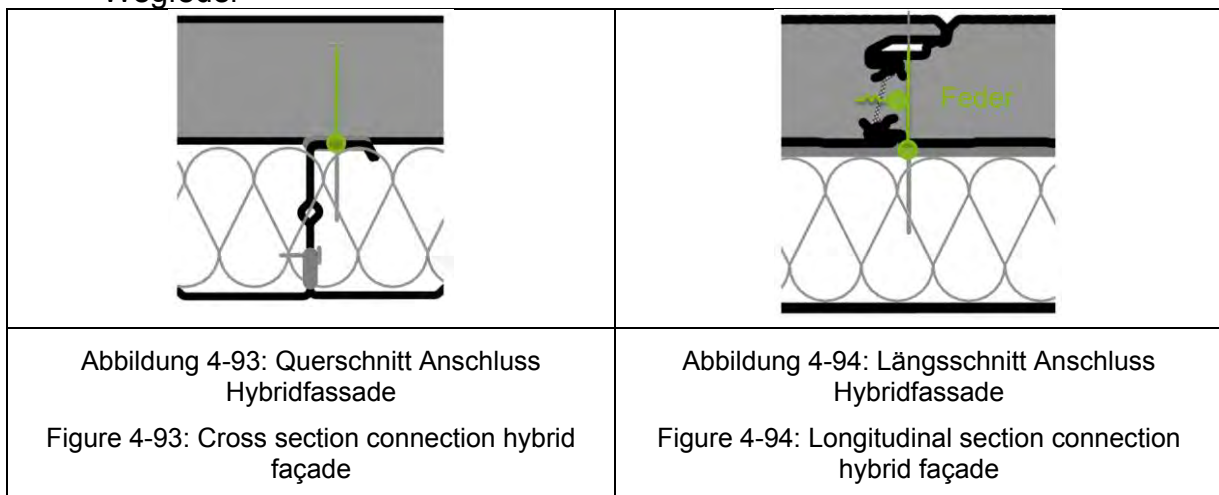


Abbildung 4-92: Last-Verformungs-Kurven Referenzversuche und FE-Modell [89], [93], [94]

Figure 4-92: Load-displacement-curves reference tests and FE model [89], [93], [94]

Zur realitätsnahen Abbildung einer Hybridfassade mit vertikal verlegten, verdeckt in den Längsfugen befestigten Sandwichelementen wurde das Stabwerksmodell wie folgt angepasst:

- Das Verbindungsmittel (als kurzer Stab zwischen den Schwerelinien von Kassettenprofil und Sandwichelement) wird starr mit dem federprofilierten Sandwichelement gekoppelt
- Das Verbindungsmittel wird an die Kassettenprofile mit einer Drehfedersteifigkeit angeschlossen
- Der Anschluss des nutprofilierten Sandwichelementes erfolgt gelenkig mit einer Wegfeder



Beispielhaft wurde für zwei Fassadenabschnitte mit dem kalibrierten Stabwerksmodell der Einfluss des Lastfalls Temperatur auf die Gesamtbemessung unter Berücksichtigung aller einwirkenden Lasten bestimmt. Untersucht wurden Fassadenabschnitte mit den Abmessungen 6000 x 6000 mm und 4000 x 4200 mm (zunächst ohne zusätzlichen Randträger). In beiden Abschnitten sind die Kassettenprofile horizontal als Einfeldträger verlegt, die Sandwichelemente werden vertikal verlegt. Die Windlasten wurden für die Windzone 1 bestimmt (Winddruck (Bereich D nach [69]) 0,37 kN/m² und Windsog (Bereich A nach [69]) 0,60 kN/m²). Der Lastfall Temperatur wird für die Farbgruppen I bis III nach [29], [45] berücksichtigt. Für

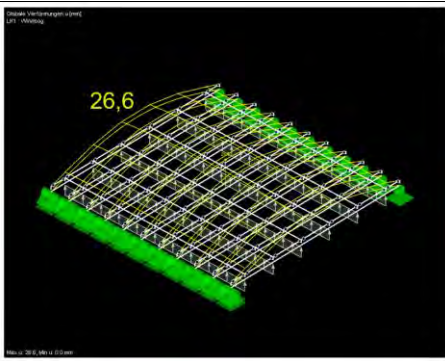
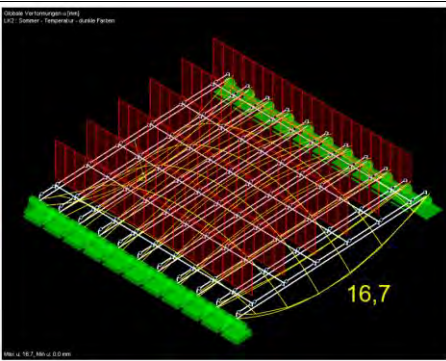
die Berechnung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit und des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit ergeben sich insgesamt 44 Lastkombinationen, siehe Tabelle 4-39.

Tabelle 4-39: Lastfallkombinationen Stabwerksmodell

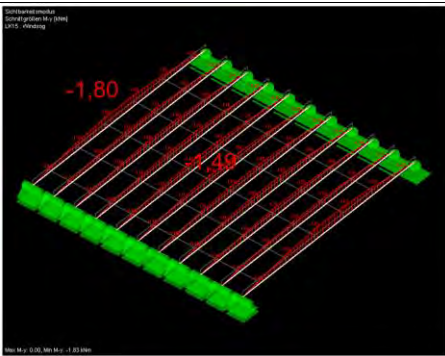
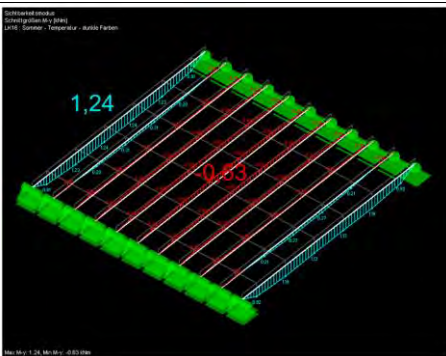
Table 4-39: Load combination framework model

Bezeichnung	GZG	GZT
Windsog	LK1	LK15
Winddruck	LK5	LK19
Temp. Sommer FG I	LK9	LK23
Temp. Sommer FG II	LK12	LK26
Temp. Sommer FG III	LK2	LK16
Temp. Winter	LK6	LK20
Windsog (LE) + Temp. FG III	LK3	LK17
Windsog + Temp. FG III (LE)	LK4	LK18
Windsog (LE) + Temp. FG II	LK13	LK27
Windsog + Temp. FG II (LE)	LK14	LK28
Windsog (LE) + Temp. FG I	LK10	LK24
Windsog + Temp. FG I (LE)	LK11	LK25
Windsog (LE) + Temp. Winter	LK37	LK39
Windsog + Temp. Winter (LE)	LK38	LK40
Winddruck (LE) + Temp. Winter	LK7	LK21
Winddruck + Temp. Winter (LE)	LK8	LK22
Winddruck (LE) + Temp. FG III	LK29	LK31
Winddruck + Temp. FG III (LE)	LK30	LK32
Winddruck (LE) + Temp. FG II	LK41	LK43
Winddruck + Temp. FG II (LE)	LK42	LK44
Winddruck (LE) + Temp. FG I	LK33	LK35
Winddruck + Temp. FG I (LE)	LK34	LK36

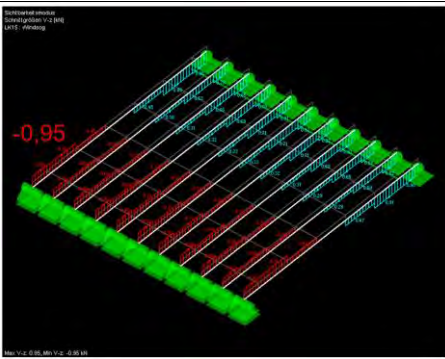
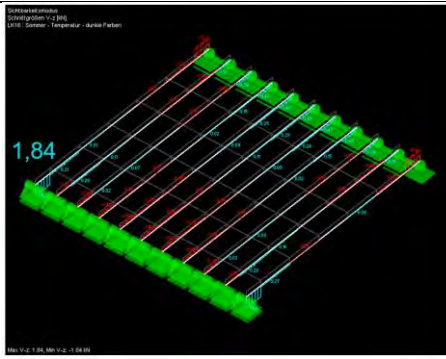
In den folgenden Abbildung 4-95 und Abbildung 4-96 werden die Verformungen des Fassadenabschnitts 6000 x 6000 mm für die Lastfälle Windsog und Temperaturdifferenz Sommer FG III am kalibrierten Stabwerksmodell vergleichend gegenübergestellt. Der Lastfall Windsog bewirkt deutlich größere Verformungen.

	
<p>Abbildung 4-95: Verformungsfigur Lastfall Windsog 6000 x 6000 mm Figure 4-95: Deformed shape load case wind suction 6000 x 6000 mm</p>	<p>Abbildung 4-96: Verformungsfigur Lastfall Temperatur Sommer FG III 6000 x 6000 mm Figure 4-96: Deformed shape load case temperature summer CG III 6000 x 6000 mm</p>

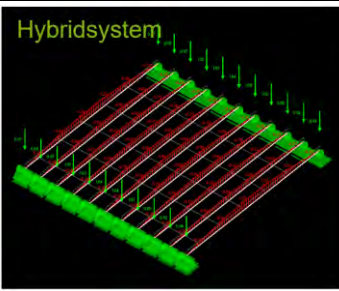
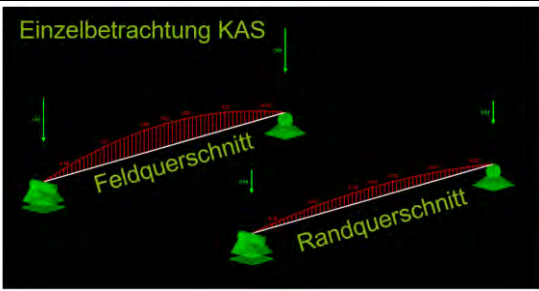
Die folgenden Abbildung 4-97 und Abbildung 4-98 zeigen die zugehörigen Biegemomente in den Kassettenprofilen. Der Lastfall Windsog bewirkt auch größere Biegemomente als der Lastfall Temperaturdifferenz Sommer FG III.

	
<p>Abbildung 4-97: Biegemoment Kassettenprofile Lastfall Windsog 6000 x 6000 mm Figure 4-97: Bending moment load case wind suction 6000 x 6000 mm</p>	<p>Abbildung 4-98: Biegemoment Kassettenprofile Lastfall Temperatur Sommer FG III 6000 x 6000 mm Figure 4-98: Bending moment load case temperature summer CG III 6000 x 6000 mm</p>

Die folgenden Abbildung 4-99 und Abbildung 4-100 zeigen die Querkraftverläufe in den Kassettenprofilen. Hier werden die Kassettenprofile in den Eckbereichen durch den Lastfall Temperaturdifferenz deutlich stärker beansprucht.

	
<p>Abbildung 4-99: Querkraft Kassettenprofile Lastfall Windsog 6000 x 6000 mm Figure 4-99: Shear force load case wind suction 6000 x 6000 mm</p>	<p>Abbildung 4-100: Querkraft Kassettenprofile Lastfall Temperatur Sommer FG III 6000 x 6000 mm Figure 4-100: Shear force load case temperature summer CG III 6000 x 6000 mm</p>

Es ist zu beachten, dass die Sandwichelemente durch ihre Eigensteifigkeit in (Längs- und Querrichtung) in Hybridfassaden die Biegebeanspruchung und die Durchbiegung der Kassettenprofile reduzieren. Zusätzlich bewirken die Sandwichelemente eine homogenere Querkraftbeanspruchung, siehe Abbildung 4-101.

	
<p>Abbildung 4-101: Einfluss der Sandwichelemente in ihrer Längsrichtung Figure 4-101: Influence of the sandwich panels lengthwise</p>	

In der folgenden Tabelle 4-40 ist der Einfluss des zusätzlichen Lastfalls Temperaturdifferenz auf die Bemessung der Kassettenprofile für den Beispielabschnitt 6000 x 6000 mm unter den exemplarisch gewählten Randbedingungen am kalibrierten Stabwerksmodell dargestellt. Wird der (ohne Temperaturdifferenz maßgebende) Lastfall Windsog als Referenzgröße gewählt, ergeben sich die dargestellten betragsmäßigen Abweichungen. Werden Windlast und Temperaturdifferenz überlagert, kann die Temperaturdifferenz auch günstig wirken.

Es zeigt sich, dass die Betragsmäßig größten Veränderungen der Bemessungslasten in den Kassettenprofilen durch den zusätzlichen Lastfall Temperatur am Rand des betrachteten Fassadenabschnitts, also im Sockel- bzw. Traufbereich vorliegen (hier rot dargestellt).

Tabelle 4-40: Relative Veränderung infolge zusätzlicher Temperaturbeanspruchung Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Table 4-40: Relative change due to additional load case Temperature façade section 6000 x 6000 mm

Relative Abweichung [%]							
von	nach	Verformungen		Biegemomente		Querkraft	
		Feldmitte	Sockel / Traufe	Feldmitte	Sockel / Traufe	Feldmitte	Sockel / Traufe
Windsog	FG I	-76,32	-57,08	-77,33	-63,39	-71,74	+5,26
	FG III	-56,39	-21,23	-58,00	-32,24	-47,83	+93,68
	Winter	-48,78	-6,92	-50,54	-20,35	-38,60	+127,12
	WS + FG I	-10,90	-48,58	+14,00	-20,22	+17,39	-51,58
	WS + FG III	+3,38	-65,57	+25,33	-37,16	+31,52	+35,79
	WD + Winter	+10,98	-57,69	+29,03	-44,25	+36,84	+69,49
	WD + FG I	-67,67	-20,28	-52,00	-17,49	-91,30	+42,11
	WD + FG III	-78,95	+15,57	-63,33	+3,38	-69,57	+129,47
	WS + Winter	-43,61	+16,98	-18,00	+27,87	-22,83	+100,00
(-) Reduktion der Verformung bzw. Bemessungslast (+) Erhöhung der Verformung bzw. Bemessungslast							

In der folgenden Tabelle 4-41 sind die für die Nachweise der Kassettenprofile maßgebenden betraglichen Veränderungen dargestellt. Unter den gegebenen Randbedingungen zeigt sich eine signifikante Zunahme vorwiegend bei den Querkraften im Randbereich.

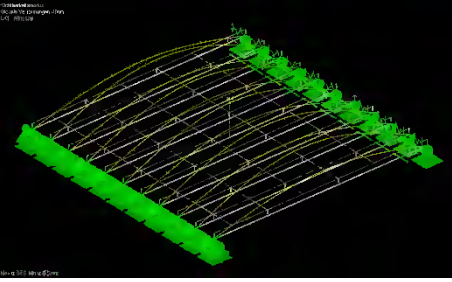
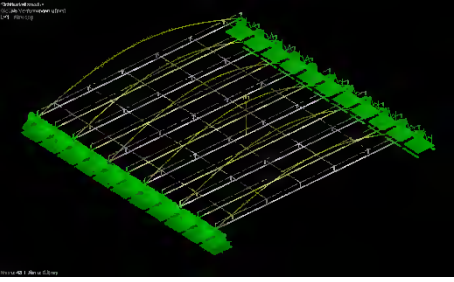
Tabelle 4-41: Für Nachweis maßgebende Veränderung infolge zusätzlicher Temperaturbeanspruchung Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Table 4-41: Decisive value change due to additional load case Temperature façade section 6000 x 6000 mm

Relative Abweichung für Nachweise maßgebend [%]				
von	nach	Verformungen	Biegemomente	Querkraft
Windsog	WS + FG I	-10,90	-6,56	+13,68 *
	WS + FG III	+3,38	+2,73	+35,79 *
	WD + Winter	-31,58	-34,43	+5,26
	WD + FG I	-36,47	-17,59	+42,11 *
	WD + FG III	-7,89	+3,83	+129,47 *
	WS + Winter	-6,77	+27,87 *	+100,00 *
(-) Reduktion der Verformung bzw. Bemessungslast (+) Erhöhung der Verformung bzw. Bemessungslast * im First- und Traufbereich				

Grundsätzlich ist es möglich, durch Reduktion der Anzahl der Verbindungsmittel die infolge Temperaturdifferenz auftretenden Zwangskräfte zu reduzieren. Für vertikal verlegte, verdeckt in den Längsfugen befestigte Sandwichelemente wurden im

Rahmen dieses Forschungsvorhabens die in den folgenden Abbildung 4-102 und Abbildung 4-103 dargestellten Varianten untersucht.

	
<p>Abbildung 4-102: Versetzte Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt 6000 x 6000 mm Figure 4-102: Offset mount on every second liner tray flange 6000 x 6000 mm</p>	<p>Abbildung 4-103: Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt 6000 x 6000 mm Figure 4-103: Mount on every second liner tray flange 6000 x 6000 mm</p>

Werden die Sandwichelemente versetzt an jedem zweiten Kassettengurt befestigt, reduzieren sich die infolge Temperaturdifferenz auftretenden Verformungen und Zwangskräfte um ca. 10 %, siehe Tabelle 4-42. Gleichzeitig erhöhen sich die Verformungen und Beanspruchungen der Kassettenprofile infolge Windsog um bis zu 78 %.

Tabelle 4-42: Relative Veränderung versetzte Befestigung der Sandwichelemente an jedem zweiten Kassettengurt Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Table 4-42: Relative change offset sandwich panel mount on every second liner tray flange façade section 6000 x 6000 mm

Relative Abweichung [%]				
von	nach *	Verformungen	Biegemomente	Querkraft
FG I	FG I	-9,89	-5,97	-9,00
FG III	FG III	-10,18	-7,26	-9,78
Winter	Winter	-9,92	-6,67	-10,45
Windsog	Windsog	+29,70	+10,93	+77,89
WS + FG I	WS + FG I	+25,74	+30,41	+57,41
WS + FG III	WS + FG III	+20,36	+27,66	+49,61
WD + Winter	WD + Winter	+18,13	+26,67	+25,00
WD + FG I	WD + FG I	+12,43	-30,46	+8,15
WD + FG III	WD + FG III	-6,94	-2,63	-5,05

(-) Reduktion der Verformung bzw. Bemessungslast
 (+) Erhöhung der Verformung bzw. Bemessungslast
 * bei versetzter Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt

Betrachtet man die für den statischen Nachweis der Kassettenprofile maßgebenden Lastfallkombinationen, so zeigt sich, dass unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen die versetzt angeordnete Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt einen negativen Einfluss hat, siehe Tabelle 4-43.

Tabelle 4-43: Für statischen Nachweis maßgebende Veränderung durch versetzt angeordnete Befestigung Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Table 4-43: Relative change due to offset mount on every second liner tray flange façade section 6000 x 6000 mm

versetzte Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt	
maßgebende Durchbiegung u	+ 25,5 %
maßgebendes Biegemoment M_y	+ 2,6 %
maßgebende Querkraft V_z	+ 3,2 %

Werden die Sandwichelemente ohne Versatz an jedem zweiten Kassettengurt befestigt, reduzieren sich die infolge Temperaturdifferenz auftretenden Querkräfte in den Kassettenprofilen um ca. 12 %, siehe Tabelle 4-44. Gleichzeitig erhöhen sich die Verformungen und Beanspruchungen der Kassettenprofile infolge Windsog um bis zu 84 %.

Tabelle 4-44: Relative Veränderung versetzte Befestigung der Sandwichelemente an jedem zweiten Kassettengurt Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Table 4-44: : Relative change sandwich panel mount on every second liner tray flange façade section 6000 x 6000 mm

Relative Abweichung [%]				
von	nach *	Verformungen	Biegemomente	Querkraft
FG I	FG I	-1,10	-1,49	-12,00
FG III	FG III	-1,80	-2,42	-12,50
Winter	Winter	-0,83	-2,22	-12,69
Windsog	Windsog	+80,83	+74,32	+84,21
WS + FG I	WS + FG I	+73,00	+73,68	+85,19
WS + FG III	WS + FG III	+64,36	+69,68	+72,09
WD + Winter	WD + Winter	+58,79	+68,33	+42,00
WD + FG I	WD + FG I	+33,73	+54,30	+16,30
WD + FG III	WD + FG III	+22,45	+40,00	+2,29
(-) Reduktion der Verformung bzw. Bemessungslast				
(+) Erhöhung der Verformung bzw. Bemessungslast				
* bei versetzter Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt (ohne Versatz)				

Betrachtet man die für den statischen Nachweis der Kassettenprofile maßgebenden Lastfallkombinationen, so zeigt sich, dass unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen auch die Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt ohne Versatz einen negativen Einfluss hat, siehe Tabelle 4-45.

Folglich kann unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen durch Optimierung der Anordnung der Befestigungsmittel keine Verbesserung des Tragverhaltens erzielt werden. Beide untersuchten Varianten führen zu einer Zunahme der maßgebenden Biege- und Querkraftbeanspruchungen in den Kassettenprofilen. Auch die Verformungen des gesamten Fassadenabschnitts erhöhen sich in beiden Fällen.

Tabelle 4-45: Für statischen Nachweis maßgebende Veränderung durch Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt Fassadenabschnitt 6000 x 6000 mm

Table 4-45: Relative change due to offset mount on every second liner tray flange façade section 6000 x 6000 mm

versetzte Befestigung an jedem zweiten Kassettengurt	
maßgebende Durchbiegung u	+ 74,9 %
maßgebendes Biegemoment M_y	+ 57,3 %
maßgebende Querkraft V_z	+ 9,6 %

Berücksichtigt man, dass der Abstand der seitlichen Halterung der schmalen Kassettengurte einen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Kassettenprofile hat, wird empfohlen, vertikal verlegte Sandwichelemente in Hybridfassaden bei nicht sichtbarer Befestigung in den Längsfugen grundsätzlich in jedem Kreuzungspunkt mit den Kassettengurten zu verbinden. Siehe dazu auch Kapitel 4.3.5.3.2.

Wird die Systemgröße des betrachteten Abschnitts von 6000 x 6000 mm auf 4000 x 4200 mm reduziert, erhöht sich der Einfluss der Temperaturdifferenz. Die folgende Tabelle 4-46 zeigt die relative Veränderung der Verformungen, des Biegemomentes und der Querkraft in den Kassettenprofilen. Diese Tabelle kann mit Tabelle 4-40 verglichen werden.

Tabelle 4-46: Relative Veränderung infolge zusätzlicher Temperaturbeanspruchung Fassadenabschnitt 4000 x 4200 mm

Table 4-46: Relative change due to additional load case Temperature façade section 4000 x 4200 mm

Relative Abweichung [%]							
von	nach	Verformungen		Biegemomente		Querkraft	
		Feldmitte	Sockel / Traufe	Feldmitte	Sockel / Traufe	Feldmitte	Sockel / Traufe
Windsorg	FG I	-53,85	-9,09	-72,50	-51,81	-67,09	-16,67
	FG III	-15,38	+65,91	-23,75	33,73	-11,39	+129,17
	Winter	0,00	+96,30	-8,16	+58,82	+4,08	+172,73
	WS + FG I	+3,08	-45,45	+25,00	-43,37	+29,11	-34,72
	WS + FG III	+41,54	+22,73	+46,25	-25,30	+54,43	+69,44
	WD + Winter	+57,50	+51,85	+55,10	0,00	+65,31	+113,64
	WD + FG I	-76,92	-4,55	-63,75	+9,64	-67,09	+62,50
	WD + FG III	-49,23	+97,73	-60,00	+69,88	-48,10	+166,67
	WS + Winter	-58,46	+75,00	-33,75	+56,63	-37,97	+126,39
(-) Reduktion der Verformung bzw. Bemessungslast							
(+) Erhöhung der Verformung bzw. Bemessungslast							

In der folgenden Tabelle 4-47 sind die für die Nachweise der Kassettenprofile maßgebenden betraglichen Veränderungen dargestellt. Unter den gegebenen Randbedingungen zeigen sich bei dem kleineren Fassadenabschnitt auch maßgebende Zunahmen für die Kassettenprofile in Feldmitte.

Tabelle 4-47: Für Nachweis maßgebende Veränderung infolge zusätzlicher Temperaturbeanspruchung
 Fassadenabschnitt 4000 x 4200 mm

Table 4-47: Decisive value change due to additional load case Temperature façade section 4000 x
 4200 mm

Relative Abweichung für Nachweise maßgebend [%]				
von	nach	Verformungen	Biegemomente	Querkraft
Windsog	WS + FG I	+3,08	+20,48	+29,11
	WS + FG III	+41,54 **	+40,96 **	+54,43
	WD + Winter	-36,92	-8,43	+18,99
	WD + FG I	-35,38	+9,64	+48,10
	WD + FG III	+33,85	+69,88 *	+143,04 *
	WS + Winter	+18,46	+56,63	+106,33

(-) Reduktion der Verformung bzw. Bemessungslast
 (+) Erhöhung der Verformung bzw. Bemessungslast
 * im First- und Traufbereich
 ** in Feldmitte

Für die beiden exemplarisch betrachteten Fassadenabschnitte mit den Abmessungen 6000 x 6000 mm und 4000 x 4200 mm wurde mit dem kalibrierten Stabwerksmodell unter Berücksichtigung aller einwirkenden Lasten erneut untersucht, welchen Einfluss auf die statischen Nachweise der Kassettenprofile eine lokale Ertüchtigung im Sockel- und Traufbereich hat. Dazu wurde in beiden Modellen ein Walzprofil vom Typ HEA 100 S355 angeordnet, siehe Abbildung 4-104.

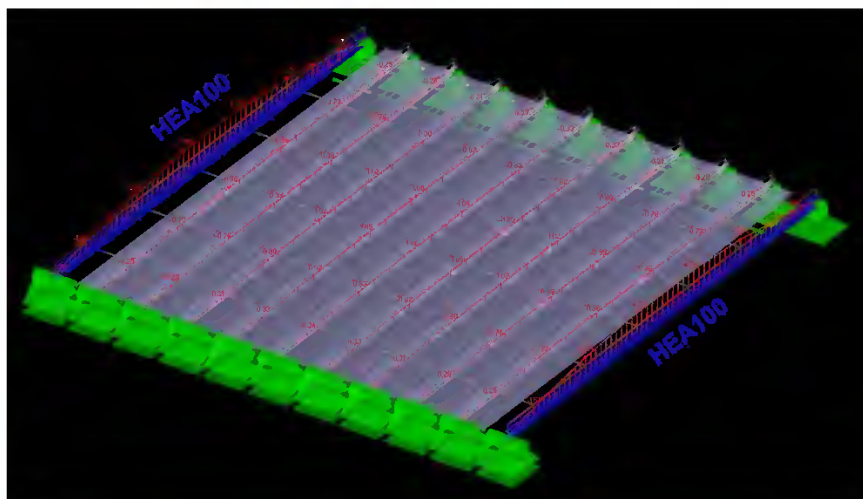


Abbildung 4-104: Lokale Ertüchtigung im Sockel- und Traufbereich

Figure 4-104: Local upgrade in plinth and eave area

Die folgende Tabelle 4-48 zeigt die betragsmäßige Veränderung der bemessungsrelevanten Maximalwerte (maßgebende Lastfallkombination) durch die lokale Ertüchtigung der Kassettenprofile im Sockel- und Traufbereich. Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen kann die Beanspruchung der

Kassettenprofile durch eine lokale Ertüchtigung im Sockel- und Traufbereich nicht signifikant reduziert werden.

Tabelle 4-48: Relative Veränderung infolge lokaler Ertüchtigung in Sockel- und Traufbereich

Table 4-48: Relative change due local upgrade in plinth and eave area

Relative Abweichung [%]			
Ertüchtigungsprofil Sockel / Traufe HEA 100 S355		Größe Fassadenabschnitt	
		6000 x 6000 mm	4000 x 4200 mm
Verformungen	Kassettenprofile	+1,45	+4,35
	Sockel/Traufe *	-39,92	-41,38
Biegemoment	Kassettenprofile	+3,19	-0,85
	Sockel/Traufe *	+103,42	+63,83
Querkraft	Kassettenprofile	-1,65	-0,82
	Sockel/Traufe *	+55,96	+39,58

* Hier unkritisch, da Ertüchtigungsprofil entsprechend dimensioniert werden kann

Die folgende Tabelle 4-49 zeigt abschließend die verbleibende Zunahme der bemessungsrelevanten Größen durch die zusätzlichen Temperaturdifferenzlastfälle (ausgehend vom Hybridsystem unter Windsogbeanspruchung) am kalibrierten Stabwerksmodell.

Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen erhöhen sich bei einer Systemgröße von 6000 x 6000 mm die für die Bemessung der Kassettenprofile maßgebenden Kenngrößen bei vertikaler Montage von Sandwichelementen in Farbgruppe III um ca. 30 %. Bei einer Systemgröße von 4000 x 4200 mm erhöht sich die Zunahme auf etwa 53 %.

Hinweis: Diese Werte besitzen nur Gültigkeit für die beispielhaft gewählten Randbedingungen, eine Verallgemeinerung oder Extrapolation ist auf Grund der Vielzahl der einflussnehmenden Parameter nicht möglich.



Tabelle 4-49: Relative Veränderung infolge zusätzlichem Lastfall Temperaturdifferenz

Table 4-49: Relative change due additional load case temperature difference

Relative Abweichung [%]			
Ertüchtigungsprofil Sockel / Traufe HEA 100 S355		Größe Fassadenabschnitt	
		6000 x 6000 mm	4000 x 4200 mm
Verformungen	Kassettenprofile	+4,89	+47,69
	Sockel/Traufe *	-29,72	+15,91
Biegemoment	Kassettenprofile	+21,33	+45,00
	Sockel/Traufe *	+160,11	+178,31
Querkraft	Kassettenprofile	+29,35	+53,16
	Sockel/Traufe *	+257,89	+272,22

* Hier unkritisch, da Ertüchtigungsprofil entsprechend dimensioniert werden kann

Neben den numerischen Untersuchungen am Stabwerksmodell wurde der Einfluss der lokalen Biegeweichheit der schmalen Gurte der Kassettenprofile auf infolge Temperaturdifferenz entstehende Zwangskräfte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens experimentell untersucht. Dazu wurde für ein beispielhaft gewähltes Kassettenprofil mit Nennblechdicke 0,75 mm und Bauhöhe 100 mm die Wegfedersteifigkeit des Anschlusses der Sandwichelemente an den Kassettenprofilen bestimmt. Die folgende Abbildung 4-105 und Abbildung 4-106 zeigen den Versuchsaufbau für abhebende Lasten. Zwei Abschnitte des gewählten Kassettenprofils wurden an ihren Längsfugen derart üblich gefügt, dass sich zwei schmale Gurte überlappen. Die breiten Gurte der Kassettenprofile wurden weitestgehend gekürzt, sodass eine nahezu starre Verbindung mit den Auflagern möglich wurde. Die Stege der Kassettenprofile wurden im üblichen Abstand miteinander verschraubt. In die schmalen Gurte der Kassettenprofile wurde, mittig in Längs- und Querachse, ein üblicher Sandwichbefestiger eingebracht. Dieser Sandwichbefestiger wurde zentrisch be- und entlastet. Neben der Last und dem Maschinenweg, der auf Grund der im Vergleich zur Biegeweichheit der schmalen Kassettenurte sehr hohen Dehnsteifigkeit des Verbindungsmittels in etwa der Verschiebung der Gurte entspricht, wurde die Verschiebung der Gurte zusätzlich mit zwei induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Es wurden drei Versuche mit einer Länge des Abschnitts der Kassettenprofile von 300 mm und drei Versuche mit einer Länge des Abschnitts von 1000 mm durchgeführt. Die 1000 mm entsprechen dabei dem Abstand der Befestigungsmittel bei nicht sichtbarer Befestigung in der Längsfuge.

	
<p>Abbildung 4-105: Bestimmung der lokalen Steifigkeit des Anschlusses für abhebende Lasten (Länge 300 mm)</p> <p>Figure 4-105: Determination of local connection stiffness for lifting loads (length 300 mm)</p>	<p>Abbildung 4-106: Bestimmung der lokalen Steifigkeit des Anschlusses für abhebende Lasten (Länge 1000 mm)</p> <p>Figure 4-106: Determination of local connection stiffness for lifting loads (length 1000 mm)</p>

Die folgende Abbildung 4-107 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der durchgeführten Versuche. Erwartungsgemäß hat die Länge des betrachteten Abschnitts einen Einfluss auf die Steifigkeit. Für die Versuche mit einer Länge von 300 mm (hier blau dargestellt) beträgt der Mittelwert der Steifigkeit 0,2085 kN/mm, für die Versuche mit 1000 mm Länge (hier orange dargestellt) beträgt der Mittelwert der Steifigkeit 0,2192 kN/mm.

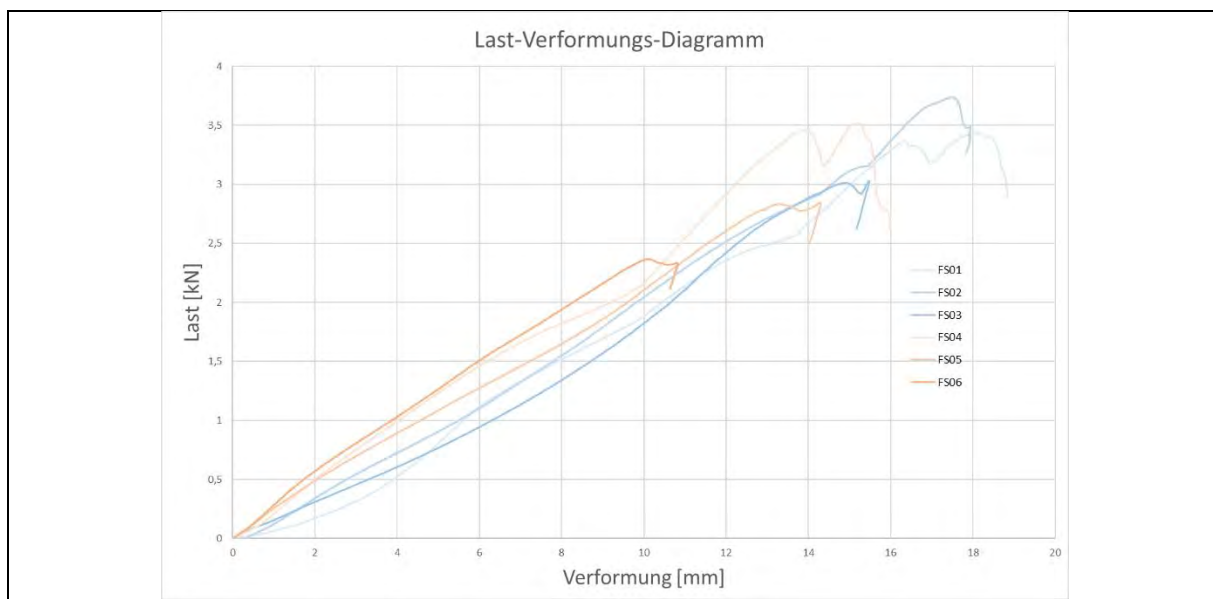


Abbildung 4-107: Last-Verformungs-Kurven Zugversuche

Figure 4-107: Load-displacement-curves tension tests

Zur Bestimmung der Federsteifigkeit des Anschlusses für andrückende Lasten wurde der Versuchsaufbau modifiziert. Die Lasteinleitung erfolgte, der tatsächlichen Einbausituation entsprechend, flächig über die gesamte Länge des Profilabschnitts. Zusätzlich wurden die Kassettenstege gegen seitliches Ausweichen gesichert. Die folgende Abbildung 4-108 zeigt den Versuchsaufbau für andrückende Lasten. Auch für andrückende Lasten wurden zur Bestimmung der lokalen Biegeweichheit der schmalen Gurte drei Versuche mit einer Länge der Versuchskörper von 300 mm und drei Versuche mit einer Länge von 1000 mm durchgeführt.



Abbildung 4-108: Versuchsaufbau Druckversuche

Figure 4-108: Test setup compression tests

Die folgende Abbildung 4-109 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der Druckversuche. Für die Versuche mit einer Länge von 300 mm (hier blau dargestellt) beträgt der

Mittelwert der Steifigkeit 0,2017 kN/mm, für die Versuche mit 1000 mm Länge (hier orange dargestellt) beträgt der Mittelwert der Steifigkeit 0,4153 kN/mm.

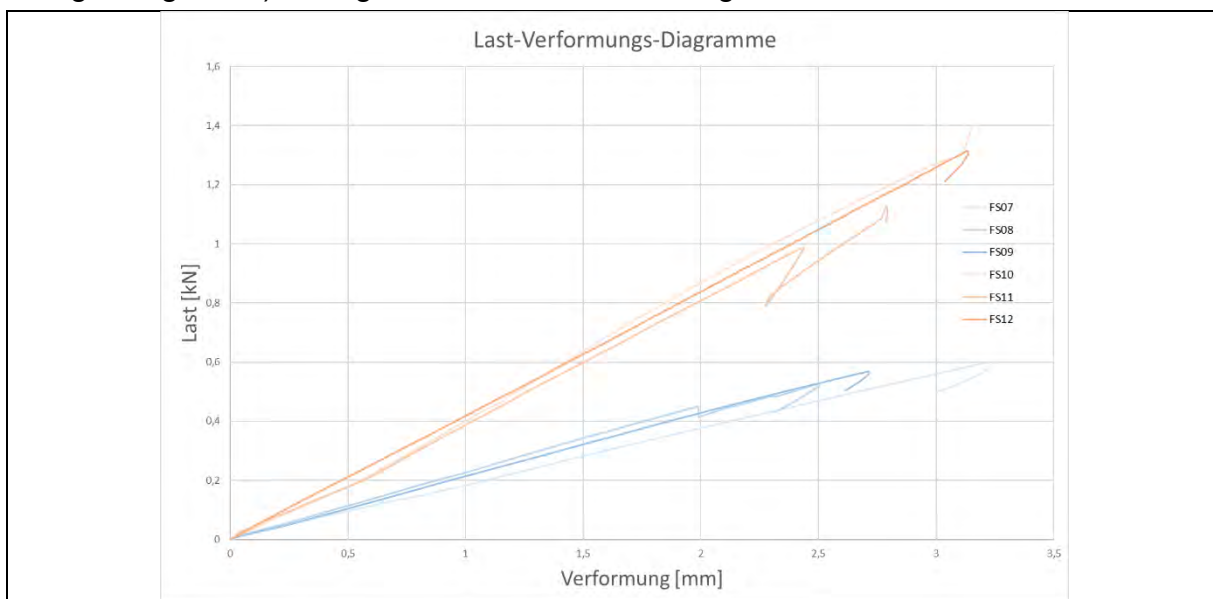


Abbildung 4-109: Last-Verformungs-Kurven Druckversuche

Figure 4-109: Load-displacement-curves compressive tests

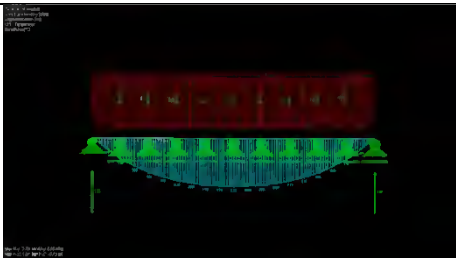
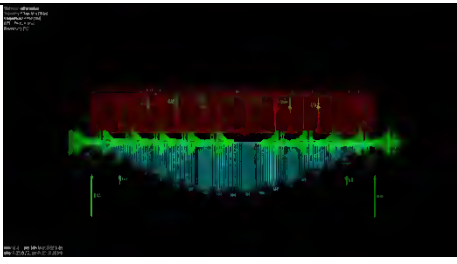
Die vollständige Auswertung der experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Federsteifigkeit des Anschlusses kann dem Anhang B2 entnommen werden.

Wird vereinfachend angenommen, dass die Federsteifigkeit des Anschlusses für abhebende und andrückende Lasten unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen etwa 0,200 kN/mm beträgt, ergeben sich allein durch die lokale Biegeweichheit der Kassettenprofile die folgenden Reduktionen der auftretenden Zwangskräfte infolge einer Temperaturdifferenz von 55 °K bei einem üblichen PU-Sandwichelement mit 120 mm Kerndicke an dem in Abbildung 4-81 dargestellten statischen System. Die zugehörigen Stabwerksmodelle sind in den Abbildung 4-110 und Abbildung 4-111 dargestellt. Die für die Bemessung der Kassettenprofile maßgebenden Auflagerreaktionen an den Endauflagern reduzieren sich hier um 58 %.

Tabelle 4-50: Reduktion der auftretenden Zwangskräfte

Table 4-50: Reduction of constraining forces

	Auflager fest $k = \infty$	Biegeweich $k = 0,2 \text{ kN/mm}$	Abweichung
u [mm]	0,2	4,9	+ 2350 %
m [kNm]	2,70	2,04	- 24 %
Endauflager [kN]	1,97	0,83	- 58 %
Auflager Mitte [kN]	0,25	0,37	+ 48 %

	
<p>Abbildung 4-110: Stabwerksmodell Sandwichelement mit starren Auflagern (Spannweite 10 x 600mm)</p> <p>Figure 4-110: Truss model sandwich panel with rigid support (span 10 x 600 mm)</p>	<p>Abbildung 4-111: Stabwerksmodell Sandwichelement mit Federauflagern $k = 0,200$ kN/mm (Spannweite 10 x 600mm)</p> <p>Figure 4-111: Truss model sandwich panel with spring support $k = 0,200$ kN/mm (span 10 x 600 mm)</p>

Hinweis: Die in Tabelle 4-50 dargestellten Werte besitzen nur Gültigkeit unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen. Eine Extrapolation ist nicht möglich.

Kann der statische Nachweis der Kassettenprofile einer Hybridfassade aufgrund des Lastfalls Temperaturdifferenz am Sandwichelement nicht erfüllt werden, sollte zunächst eine helle Oberflächenfarbe aus Farbgruppe I nach [29], [45] gewählt werden. In Einzelfällen ist es auch möglich, die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Farbe exakt zu bestimmen und so innerhalb der Farbgruppen weiter zu differenzieren. Zusätzlich sollte zur Bestimmung der Temperaturdifferenz am Sandwichelement in Hybridfassaden grundsätzlich die in den Kassettenprofilen vorhandene Dämmung berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass sich die nach [29], [45] anzusetzende Innentemperatur an der Innenseite der Gesamtfassaden und nicht an der Innenseite der Sandwichelemente einstellt. Folglich reduziert sich der Temperaturgradient im Sandwichelement. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde dieser Einfluss experimentell und numerisch bestimmt. Siehe dazu Kapitel 3.5.

4.3.5.3.4 Experimentelle Untersuchungen *Experimental studies*

4.3.5.3.4.1 Allgemeines Preface

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden insgesamt 31 Großbauteilversuche zum Tragverhalten von Hybridfassaden mit vertikal verlegter, direkt an den Kassettenprofilen befestigter Sandwichelement-Außenschale durchgeführt. Die vollständigen Versuchsdatenblätter sind in Anhang B3 hinterlegt.

4.3.5.3.4.2 Ziele der experimentellen Untersuchungen Objectives of the experimental studies

Bereits in [93], [94] konnte gezeigt werden, dass sich durch den Abstand der seitlichen Halterung der schmalen Kassettenurte von 1000 mm bei verdeckt befestigten Sandwichelementen gegenüber 732 mm bei üblicher Trapezprofil-Außenschale die Tragfähigkeit der Kassettenprofile bei andrückenden Lasten nicht signifikant reduziert. Grundlegende Erkenntnisse zum Tragverhalten von Hybridfassaden mit vertikal verlegten Sandwichelementen bei abhebenden Lasten fehlen bislang. Diese

Erkenntnisse sollten gewonnen werden. Darüber hinaus sollte bestimmt werden, welchen Einfluss auf das Tragverhalten die Art der Befestigung der Sandwichelemente und die Art der Dämmung in den Kassettenprofilen haben. Da Sandwichelemente gegenüber üblichen Trapezprofile-Außenschalen eine deutlich höhere Steifigkeit in Querrichtung besitzen und veränderte Lastannahmen (siehe Kapitel 4.3.2) sowie der zusätzliche Lastfall Temperaturdifferenz (siehe Kapitel 4.3.5.3.3) dazu führen, dass im Sanierungsfall der statische Nachweis bestehender Kassettenprofile zunächst nicht möglich ist, wurde untersucht, in wie weit eine Außenschale aus vertikal verlegten Sandwichelementen bestehende Kassettenprofilfassaden statisch ertüchtigen kann.

4.3.5.3.4.3 Versuchsaufbau Druckversuche Test setup compression tests

Der Versuchsaufbau für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Druckversuche wurde in Anlehnung an [93], [94] gewählt und ist in den folgenden Abbildung 4-112 und Abbildung 4-113 dargestellt.

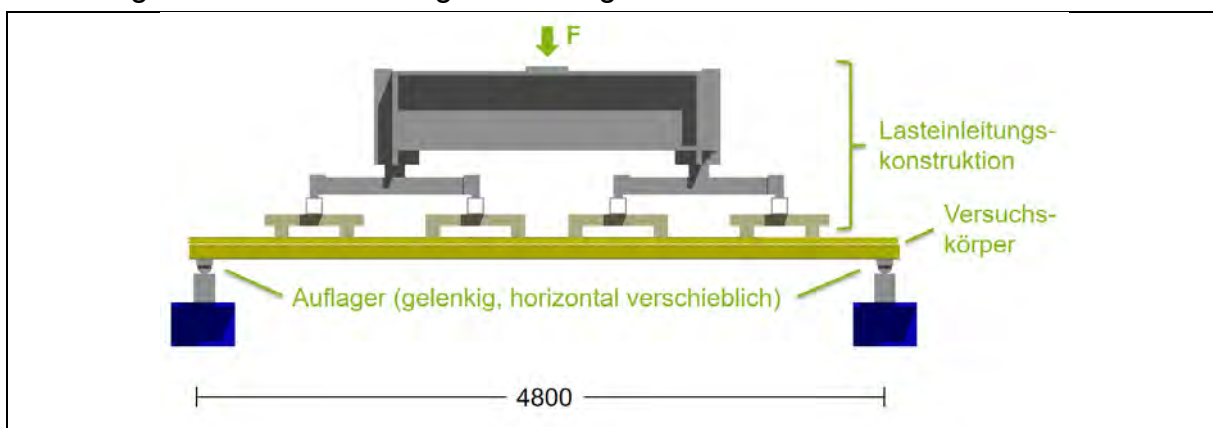


Abbildung 4-112: Seitenansicht Versuchsaufbau Druckversuche

Figure 4-112: Side elevation test setup compression tests

Die Spannweite bei allen durchgeführten Versuchen betrug 4800 mm. Über acht Linienlasten wurde eine Flächenlast, die andrückenden Windlasten entspricht, approximiert. Je Versuchskörper wurde ein vollständiges Kassettenprofil mit zwei halbierten Kassettenprofilen verbunden, siehe Abbildung 4-114. Die Kassettenprofile wurden im Abstand von 500 mm im unteren Bereich der Stege entlang ihrer Längsachse verschraubt. Bei allen durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden Kassettenprofile mit einer Breite von 600 mm, einer Höhe von 100 mm und einer Nennblechdicke von 0,75 mm verwendet. In die Kassettenprofile wurden vorgefertigte Mineralwoll-Dämmplatten mit unterschiedlicher Rohdichte eingebracht, siehe Abbildung 4-115. Die halbierten Kassettenprofile wurden entsprechend mit halbierten Dämmplatten belegt.

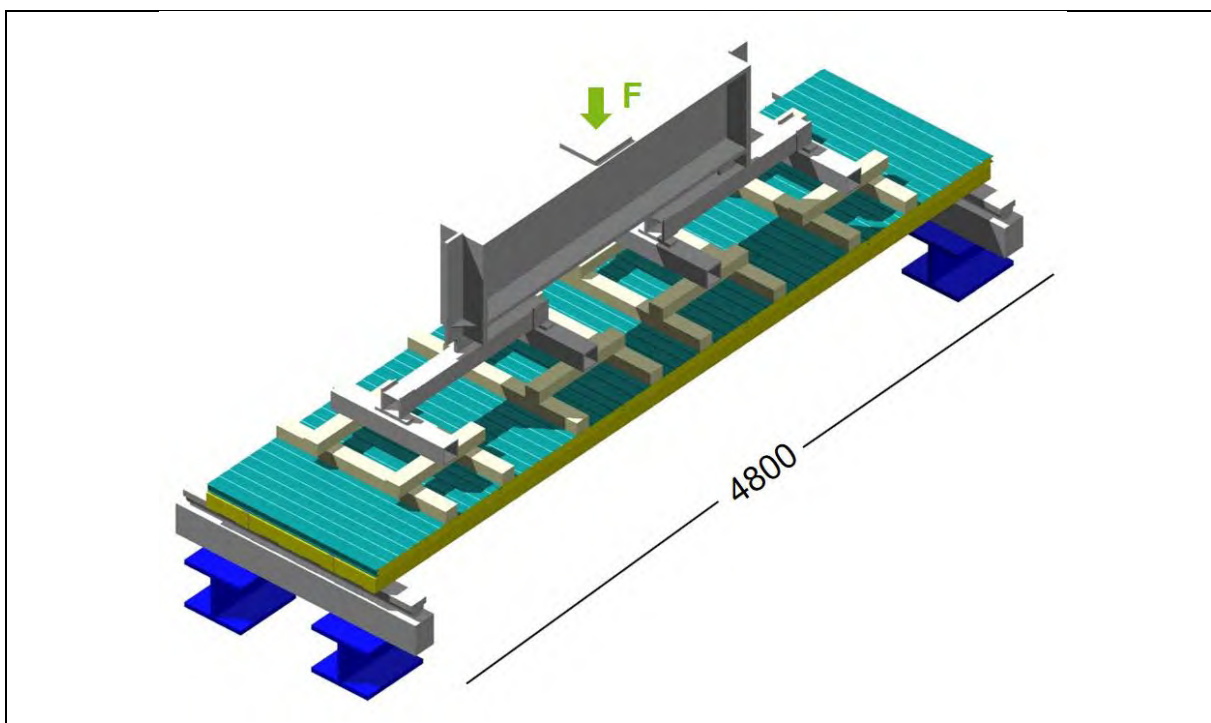


Abbildung 4-113: Isometrie Versuchsaufbau Druckversuche

Figure 4-113: Isometric view test setup compression tests



Abbildung 4-114: Kassettenprofile im
 Versuchsstand


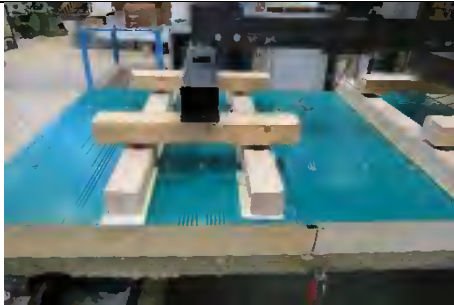
Figure 4-114: Liner tray profiles in test setup




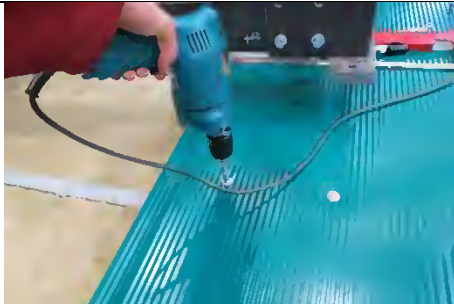
Abbildung 4-115: Einbau der Mineralwolle

Figure 4-115: Build in of mineral wool

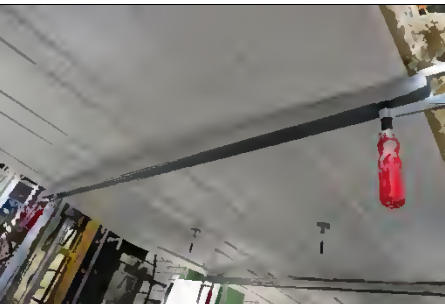

Oberhalb der Kassettenprofile wurden je Versuchskörper fünf PUR/PIR-Sandwichelemente mit einer Baubreite von 1000 mm, einer Länge von 1200 mm und einer Kerndicke von 120 mm montiert, siehe Abbildung 4-116. Die äußere Deckschicht der Sandwichelemente war bei allen durchgeführten Versuchen mikroprofiliert und hatte eine Nennblechdicke von 0,63 mm, die innere Deckschicht war gesickt und hatte eine Nennblechdicke von 0,5 mm. Die Lasteinleitung in die Sandwichelemente ist in Abbildung 4-117 dargestellt. Unterhalb der Holzprofile wurden Teflonfolien angeordnet. Größere lokale Verformungen infolge der Lasteinleitung konnten während der Versuchsdurchführung nicht beobachtet werden.

	
<p>Abbildung 4-116: Seitenansicht Versuchskörper Figure 4-116: Side elevation test specimen</p>	<p>Abbildung 4-117: Lasteinleitung Sandwichelement Figure 4-117: Load introduction sandwich panel</p>


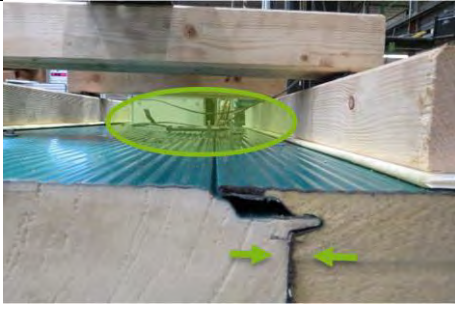
Die Befestigung der Sandwichelemente an den schmalen Kassettengurten erfolgte wahlweise nicht sichtbar in den Längsfugen (mit zusätzlichen Lastverteilungsplatten), vgl. Abbildung 4-118, oder sichtbar in einem Abstand von 200 mm, vgl. Abbildung 4-119.

	
<p>Abbildung 4-118: Nicht sichtbare Befestigung in der Längsfuge Figure 4-118: Hidden fixation in longitudinal joint</p>	<p>Abbildung 4-119: Sichtbare Befestigung in Durchsteckmontage Figure 4-119: Visible push-through fixation in longitudinal joint</p>

Zur Queraussteifung der Kassettenprofile wurden in den Fünftelpunkten der Spannweite C-Profile angeordnet, siehe Abbildung 4-120. Zusätzlich wurden die halbierten breiten Kassettengurte durch eine weiche Kopplung mit den Sandwichelementen derart stabilisiert, dass die Durchbiegung infolge des Eigengewichtes der Kassettenprofile und der Mineralwolle begrenzt wurde, siehe Abbildung 4-121. In Feldmitte wurden die Versuchskörper seitlich gelagert, um Kippen der Stege und seitliches Ausweichen der Sandwichelemente zu verhindern.

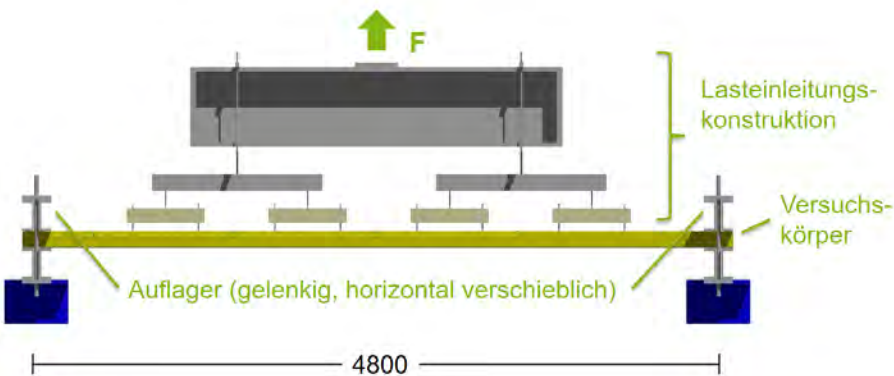
	
<p>Abbildung 4-120: C-Profil zur Queraussteifung Figure 4-120: C-profile for cross-bracing</p>	<p>Abbildung 4-121: Abhängung der freien Ränder der Kassettenprofile Figure 4-121: Suspension of liner trays blank margin</p>

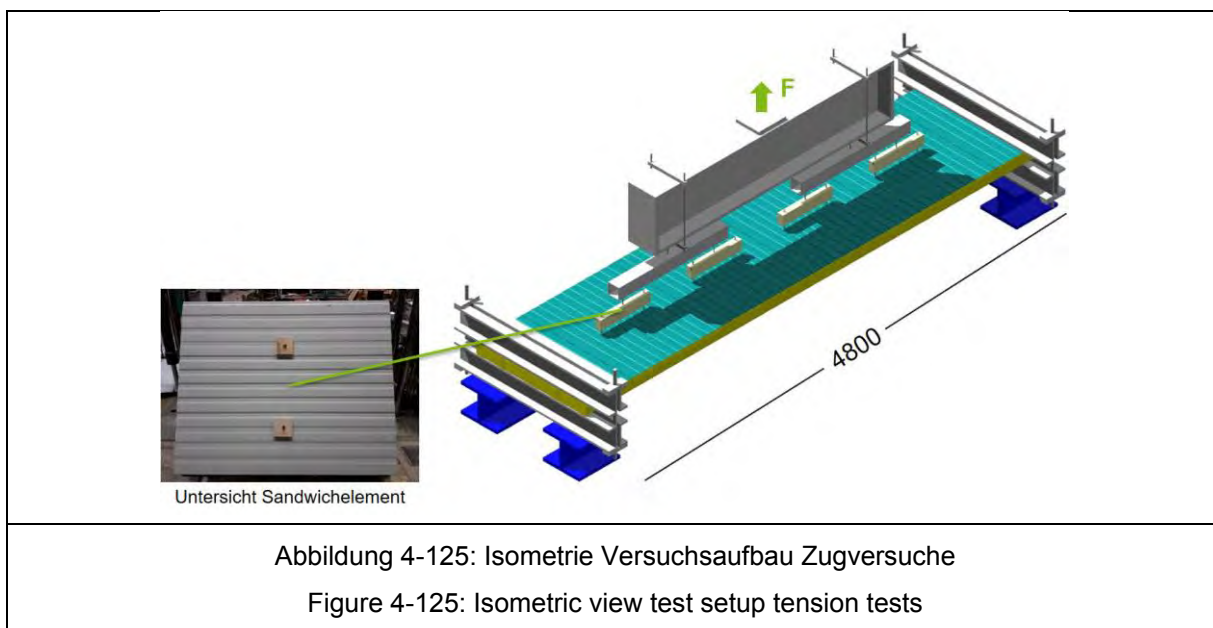
Die vertikalen Verformungen der Versuchskörper infolge der Belastung wurden mit zwei Seilwegaufnehmern in Feldmitte erfasst. Die Seilwegaufnehmer wurden neben den Stegen angeordnet, siehe Abbildung 4-122. Zusätzlich wurden mit induktiven Wegaufnehmern die Verformungen in den Längsfugen der Sandwichelemente erfasst, siehe Abbildung 4-123.

	
<p>Abbildung 4-122: Zwei Seilwegaufnehmer in Feldmitte Figure 4-122: Two rope transducer in midspan</p>	<p>Abbildung 4-123: Induktiver Wegaufnehmer an der Längsfuge der Sandwichelemente Figure 4-123: Inductive displacement sensor at longitudinal sandwich panel joint</p>

4.3.5.3.4 Versuchsaufbau Zugversuche
Test setup tension tests

Der Versuchsaufbau für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Zugversuche ist in den folgenden Abbildung 4-124 und Abbildung 4-125 dargestellt. Gegenüber dem Versuchsaufbau der Druckversuche wurde die Belastungsrichtung gewechselt und die Lasteinleitung verändert. Wegen der hohen Eigensteifigkeit der Sandwichelemente in Längs- und Querrichtung konnte eine punktuelle Lasteinleitung in den Viertelpunkten von vier symmetrisch angeordneten Einzelementen (eine Längsfuge in Feldmitte) erfolgen, ohne dass lokale Verformungen einen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse hatten. Zusätzlich wurden die Auflager an die geänderte Belastungsrichtung angepasst.


<p>Abbildung 4-124: Seitenansicht Versuchsaufbau Zugversuche Figure 4-124: Side elevation test setup tension tests</p>



4.3.5.3.4.5 Allgemeine Auswertung der Versuche General evaluation of the tests

Bei allen durchgeführten Versuchen wurde der Mittelwert der von den Seilwegaufnehmern aufgezeichneten Verformungen über die Kolbenkraft des Prüfzylinders aufgezeichnet. Zur Ermittlung der tatsächlichen Versagenslast muss das Eigengewicht der Versuchskörper berücksichtigt werden. Bei den durchgeführten Druckversuchen wirkt das Eigengewicht in Belastungsrichtung und muss folglich addiert werden, bei den durchgeführten Zugversuchen wirkt das Eigengewicht entgegen der Belastungsrichtung und muss subtrahiert werden. Die Vorverformungen infolge Eigengewicht wurden messtechnisch erfasst, bzw. unter der Annahme eines linear-elastischen Verformungsverhaltens in der Anfangsphase der Versuchsdurchführung extrapoliert. Mit einem Beiwert, der die geometrische Anordnung der acht Linien-, bzw. Einzellasten und die Spannweite berücksichtigt, wird das zugehörige Versagemoment aus der maximalen Kolbenkraft berechnet. Beispielhaft zeigt die folgende Abbildung 4-126 das Last-Verformungs-Diagramm eines Druckversuches. Blau dargestellt ist die aufgezeichnete Last-Verformungs-Kurve. Der Betrag des Eigengewichts ist braun dargestellt, die sich aus einer Vermessung des Versuchskörpers ergebende Vorverformung orange. Gelb dargestellt ist die Last-Verformungs-Beziehung, die dem Bauteilverhalten bei senkrechter Montage in einer Fassade entspricht. Die ausgewerteten Last-Verformungs-Diagramme aller Versuche sind in Anhang B3 hinterlegt.

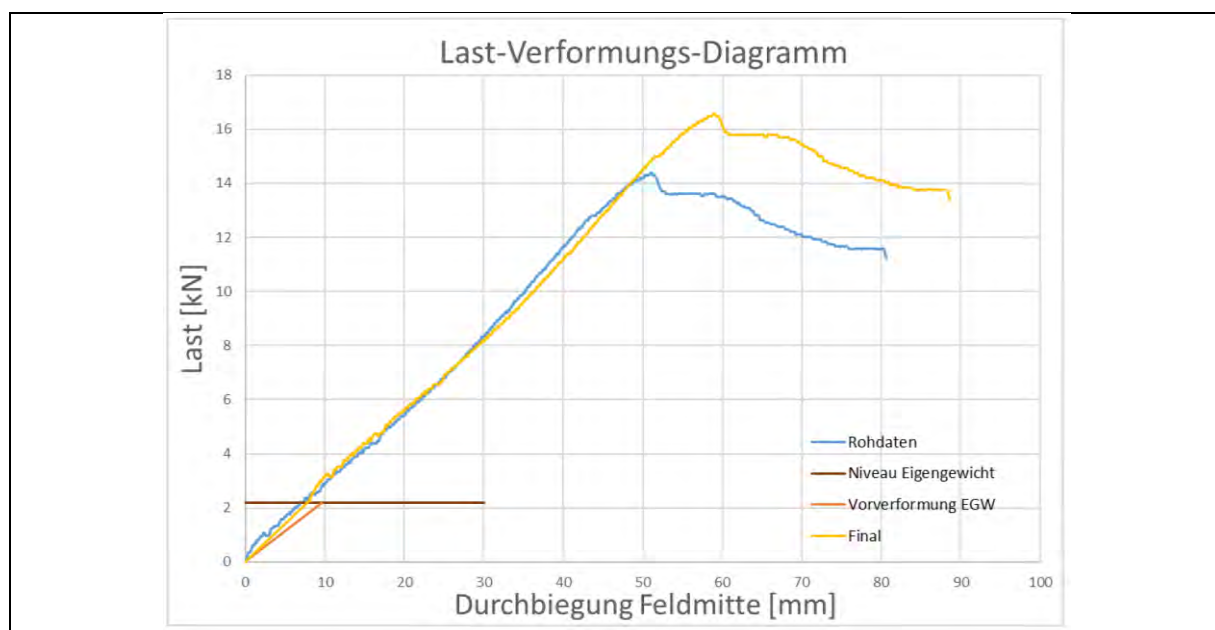


Abbildung 4-126: Last-Verformungs-Diagramm Druckversuch

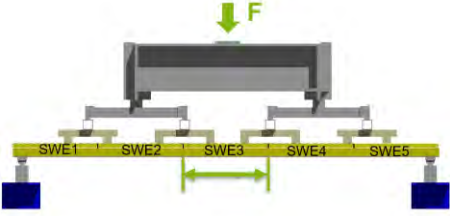
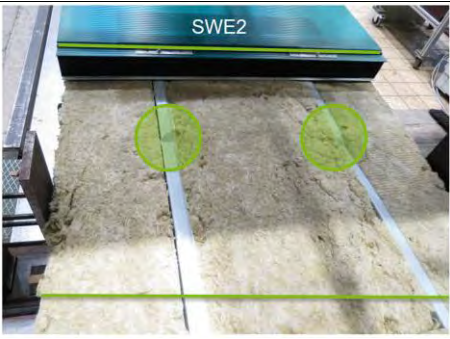
Figure 4-126: Load-displacement-curve compressive test

Bei den mit andrückenden Lasten beanspruchten Versuchskörpern versagten die Kassettenprofile in der Regel in Feldmitte durch eine Kombination aus Eindrücken des druckbeanspruchten schmalen Gurtes und Stegbeulen, siehe Abbildung 4-127. Bei den mit abhebenden Lasten beanspruchten Versuchskörpern versagten die Kassettenprofile in der Regel durch Beulen des breiten Gurtes in Feldmitte, siehe Abbildung 4-128. Innerhalb einer Versuchsreihe zeigten sich in der Regel nur geringe Streuungen der Versuchsergebnisse.

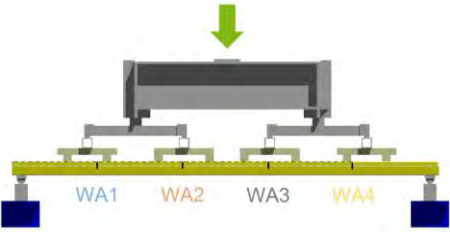
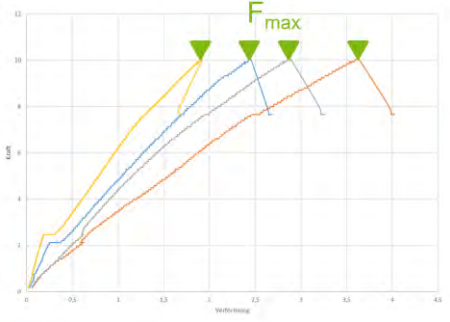
<p>Abbildung 4-127: Eindrücken des schmalen Gurtes und Stegbeulen Figure 4-127: Push in of the small flange and web buckling</p>	<p>Abbildung 4-128: Beulen des breiten Gurtes Figure 4-128: Buckling of the wide flange</p>

4.3.5.3.4.6 Einzelauswertung Versuchsreihe 1 Individual evaluation test series 1

In Versuchsreihe 1 wurden vier Druckversuche mit nicht sichtbar in den Längsfugen befestigten Sandwichelementen und üblicher Mineralwolle in den Kassettenprofilen durchgeführt. Bei allen Versuchskörpern versagten die Kassettenprofile im Bereich zwischen den Längsfugen des mittleren Sandwichelementes, siehe Abbildung 4-129 und Abbildung 4-130.

	
<p>Abbildung 4-129: Bereich des Versagens der Kassettenprofile Figure 4-129: Area of liner tray failure</p>	<p>Abbildung 4-130: Versuchskörper nach Versuchsende Figure 4-130: Test specimen at the end of the test</p>

Die Auswertung der induktiven Wegaufnehmer an den Längsfugen der Sandwichelemente zeigt eine weitestgehend lineare Zunahme der Stauchung in der Fuge bis zum Versagen der Kassettenprofile, siehe Abbildung 4-131 und Abbildung 4-132. Folglich liegt hier bis zum Versagen der Kassettenprofile keine formschlüssige Verbindung vor und eine Aktivierung von Tragreserven aus den Sandwichelementen ist nicht möglich.

	
<p>Abbildung 4-131: Bezeichnung der induktiven Wegaufnehmer Figure 4-131: Designations of inductive displacement transducers</p>	<p>Abbildung 4-132: Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer eines Beispielversuches Figure 4-132: Load-displacement-curves of the inductive displacement transducers of a sample test</p>

Dieses Verhalten kann auf die elastischen Dichtbänder in den Längsfugen der Sandwichelemente zurückgeführt werden, siehe Abbildung 4-133.



Abbildung 4-133: Übliche Längsrandprofilierung mit weichem Dichtband
Figure 4-133: Common longitudinal edge profiling with smooth sealing tape

Betrachtet man die Last-Verformungs-Kurven der Durchbiegung in Feldmitte aller Versuche der ersten Versuchsreihe, zeigt sich ein Versuch mit deutlich geringerer Tragfähigkeit, siehe Abbildung 4-134. Bei diesem Versuch wurden die Sandwichelemente unbeabsichtigt, und zunächst unbemerkt fehlerhaft montiert:

Durch fehlenden Anpressdruck bei der Montage hat das Gewinde der Sandwichbefestiger während der Bohrphase in den Kassettengurten einen Spalt zwischen Sandwichelement und Kassettensteg definiert, siehe Abbildung 4-135. Dieser Spalt führt zu einer punktuellen Lasteinleitung andrückender Lasten in die Kassettenprofile bzw. zu einer lokalen Vorverformung der schmalen Gurte, die die Tragfähigkeit erheblich reduziert. Wegen ihrer geringen Blechdicken sind Kassettenprofile anfälliger als übliche Sandwichelement-Unterkonstruktionen bei dieser Art der fehlerhaften Montage.

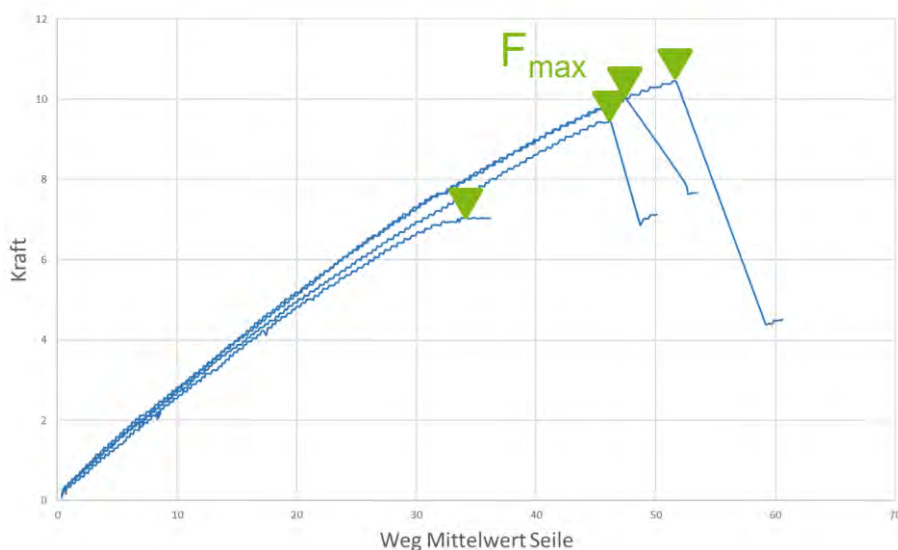


Abbildung 4-134: Last-Verformungs-Kurven Versuchsreihe 1
Figure 4-134: Load-displacement-curves test series 1



Abbildung 4-135: Eindrücken des schmalen Gurtes durch fehlerhafte Montage
 Figure 4-135: Denting of the small flange due to faulty installation

Die folgende Tabelle 4-51 zeigt zusammenfassend die Versuchsparameter und die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 1.

Tabelle 4-51: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 1

Table 4-51: Test results test series 1

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
4	verdeckt	040 „weich“		7,2973 kNm
5	verdeckt	040 „weich“		7,0562 kNm
6	verdeckt	040 „weich“	Montage fehlerhaft	5,3224 kNm
7	verdeckt	040 „weich“		6,7401 kNm

4.3.5.3.4.7 Einzelauswertung Versuchsreihe 2

Individual evaluation test series 2

In Versuchsreihe 2 wurden drei Druckversuche durchgeführt. Abweichend zu Versuchsreihe 1 wurden die Sandwichelemente in dieser Versuchsreihe sichtbar in Durchsteckmontage befestigt (Längsabstand der Befestigungsmittel 200 mm). Bei allen Versuchen der Versuchsreihe 2 versagten die Kassettenprofile unterhalb einer der beiden mittleren Längsfugen, siehe Abbildung 4-136 und Abbildung 4-137.

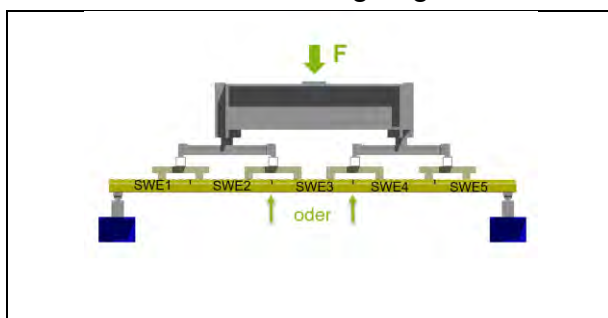


Abbildung 4-136: Ort des Versagens Versuchsreihe 2

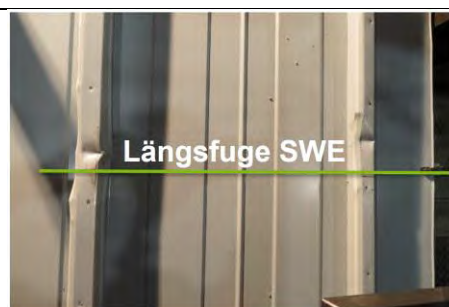


Abbildung 4-137: Eindrücken des schmalen Gurtes und Stegbeulen Versuchsreihe 2

Figure 4-136: Place of failure test series 2	Figure 4-137: Push in of the small flange and web buckling test series 2
----------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------

Die Auswertung der induktiven Wegaufnehmer an den Längsfugen der Sandwichelemente belegt, dass auch bei sichtbar in Durchsteckmontage befestigten Sandwichelementen bis zum Versagen der Kassettenprofile keine formschlüssige Verbindung in den Längsfugen vorliegt. Beispielhaft zeigen die Abbildung 4-138 und Abbildung 4-139 die Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer und eine Längsfuge nach Versuchsende.

<p>Abbildung 4-138: Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer eines Beispielversuches</p> <p>Figure 4-138: Load-displacement-curves of the inductive displacement transducers of a sample test</p>	<p>Abbildung 4-139: Längsfuge WA3 bei Versuchsende nicht geschlossen</p> <p>Figure 4-139: Longitudinal joint WA3 not enclosed at the end of the test</p>

Innerhalb der Versuchsreihe 2 zeigten sich nur sehr geringe Streuungen der Versuchsergebnisse. Abbildung 4-140 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der vertikalen Durchbiegung in Feldmitte der Versuchsreihe 2.

<p>Abbildung 4-140: Last-Verformungs-Kurven Versuchsreihe 2</p> <p>Figure 4-140: Load-displacement-curves test series 2</p>

Die folgende Tabelle 4-52 zeigt zusammenfassend die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 2.

Die sichtbare Befestigung in Durchsteckmontage führt zu einem gegenüber Versuchsreihe 1 deutlich geringeren Abstand der seitlichen Halterung der schmalen Kassettengurte (200 mm statt 1000 mm). Auch ermöglicht die Befestigung mit mehreren Befestigungselementen je Sandwichelement eine gegenüber der nicht sichtbaren Befestigung in der Längsfuge (mit nur einem Befestigungsmittel je Befestigungsachse) eine deutlich schubstefiere Verbindung zwischen den Kassettenprofilen und den Sandwichelementen. Trotzdem bleibt das Tragverhalten (Versagensart, maximale Tragfähigkeit) gegenüber Versuchsreihe 1 nahezu unverändert, siehe Tabelle 4-51.

Tabelle 4-52: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 2

Table 4-52: Test results test series 2

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
1	sichtbar, a=20cm	040 „weich“		6,6984 kNm
2	sichtbar, a=20cm	040 „weich“		6,9106 kNm
3	sichtbar, a=20cm	040 „weich“		7,0140 kNm

4.3.5.3.4.8 Einzelauswertung Versuchsreihe 3

Individual evaluation test series 3

In Versuchsreihe 3 wurde der Einfluss der Mineralwolle in den Kassettenprofilen auf das Tragverhalten von Hybridfassaden bei andrückenden Lasten untersucht. Dazu wurden zwei Versuche ohne Mineralwolle und zwei Versuche mit besonders steifer Mineralwolle (mit hoher Rohdichte) durchgeführt. Die Sandwichelemente in Versuchsreihe 3 wurden nicht sichtbar in den Längsfugen befestigt. Bei allen Versuchen versagten die Kassettenprofile zwischen den mittleren Längsfugen der Sandwichelemente. Zwischen den Einzelversuchen mit gleichen Parametern zeigten sich nur sehr geringe Streuungen der Versuchsergebnisse. Abbildung 4-141 zeigt einen Versuchskörper ohne Mineralwolle vor Erreichen der maximalen Tragfähigkeit. Es zeigt sich ein deutliches Eindrehen des breiten Gurtes zur neutralen Achse. Abbildung 4-142 zeigt die steife Mineralwolle im eingebauten Zustand. In Tabelle 4-53 sind die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 3 zusammengefasst. Die Auswertung der maximalen Biegemomente zeigt, dass die fehlende Mineralwolle gegenüber den Versuchsreihen 1 und 2 zu einer Reduktion der Tragfähigkeit des Hybridquerschnitts führt. Diese Abnahme kann mit der fehlenden elastischen Bettung des breiten Gurtes und der Stege erklärt werden. Die Verwendung einer steiferen Mineralwolle mit hoher Rohdichte führt unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen gegenüber den Versuchsreihen 1 und 2 zu keiner signifikanten Erhöhung der Tragfähigkeit.


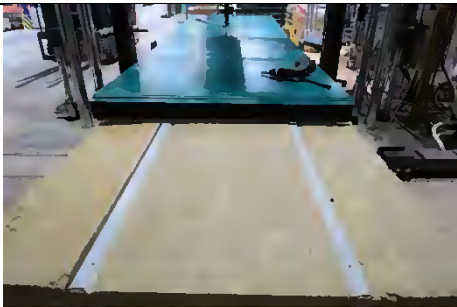
	
<p>Abbildung 4-141: Versuchskörper ohne Mineralwolle bei $\frac{3}{4} F_{max}$ Figure 4-141: Test specimen without mineral wool at $\frac{3}{4} F_{max}$</p>	<p>Abbildung 4-142: Versuchskörper mit steifer Mineralwolle Figure 4-142: Test specimen with rigid mineral wool</p>

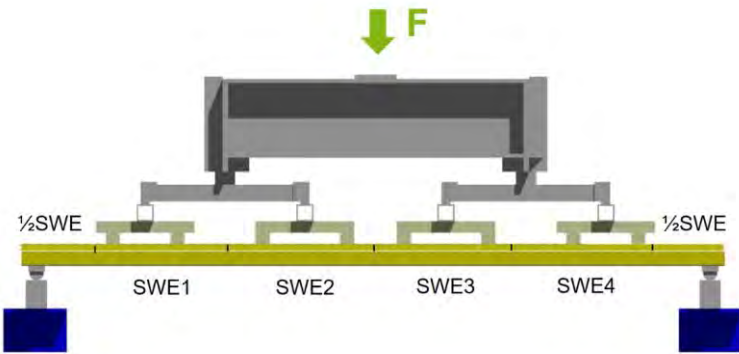
Tabelle 4-53: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 3

Table 4-53: Test results test series 3

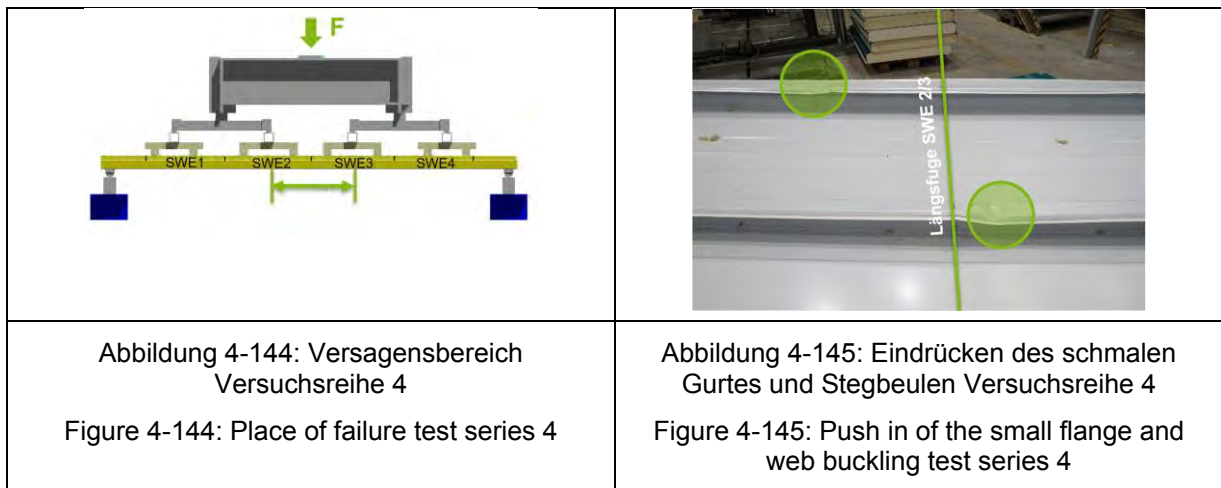
Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
8	verdeckt	keine		5,8927 kNm
9	verdeckt	keine		6,2014 kNm
10	verdeckt	035 „steif“		7,1955 kNm
11	verdeckt	035 „steif“		6,7019 kNm

4.3.5.3.4.9 Einzelauswertung Versuchsreihe 4
Individual evaluation test series 4

In Versuchsreihe 4 wurde untersucht, welchen Einfluss auf das Tragverhalten die Lage der Längsfuge der Sandwichelemente bei andrückenden Lasten hat. Dazu wurde ein Versuch mit Längsfuge in Feldmitte durchgeführt, siehe Abbildung 4-143.


<p>Abbildung 4-143: Versuchsaufbau mit Längsfuge in Feldmitte Figure 4-143: Test setup with midspan longitudinal joint</p>

Bei diesem Versuch versagten die Kassettenprofile zwar im Bereich der Längsfuge, nicht jedoch direkt darunter, siehe folgende Abbildung 4-144 und Abbildung 4-145.



Betrachtet man die Last-Verformungs-Kurven der Versuchsreihen 4 und 1 (ohne den Versuch mit der fehlerhaften Montage), zeigt sich, dass die Lage der Längsfuge der Sandwichelemente (Feldmitte oder versetzt) unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen keinen Einfluss auf das Tragverhalten hat (siehe Abbildung 4-146).

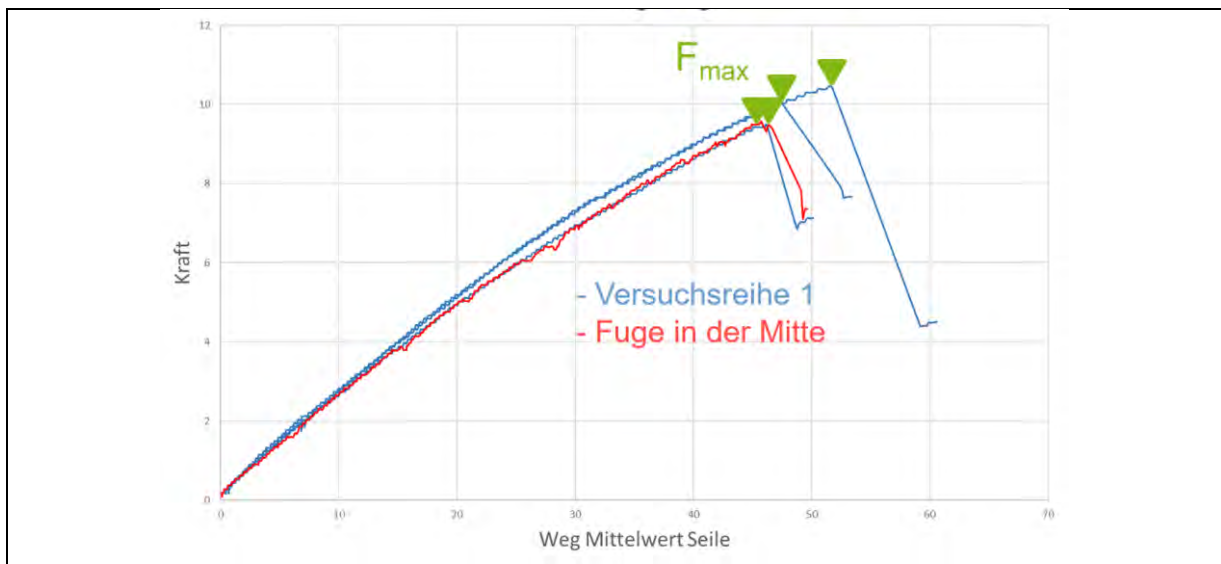


Abbildung 4-146: Last-Verformungs-Kurven Versuchsreihen 1 und 4
 Figure 4-146: Load-displacement-curves test series 1 and 4

Die folgende Tabelle 4-54 zeigt die Versuchsparameter und die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 4.

Tabelle 4-54: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 4
 Table 4-54: Test results test series 4

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
12	verdeckt	040 „weich“	Längsfuge mittig	6,7886 kNm

4.3.5.3.4.10 Einzelauswertung Versuchsreihe 5
Individual evaluation test series 5

In Versuchsreihe 5 wurden insgesamt sechs Versuche mit andrückenden Lasten durchgeführt. In dieser Versuchsreihe wurde untersucht, welchen Einfluss auf das Tragverhalten von Hybridfassaden übliche Sandwichelemente bei vertikaler Verlegung und formschlüssiger Verbindung in den Längsfugen haben. Dazu wurde bei allen Probekörpern der Versuchsreihe 5 das Dichtband der Längsrandprofilierung der Sandwichelemente entfernt, siehe Abbildung 4-147 und Abbildung 4-148.



Abbildung 4-147: Längsfuge ohne Dichtband
 Figure 4-147: Longitudinal edge without sealing tape

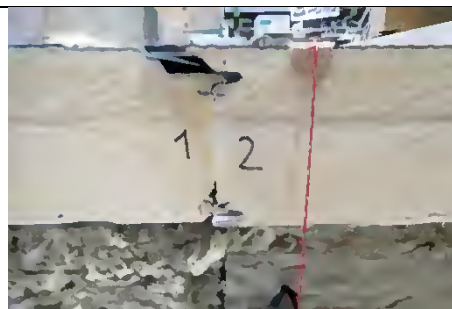


Abbildung 4-148: Formschlüssige Verbindung Längsfuge Sandwichelemente
 Figure 4-148: Keyed connection longitudinal edge sandwich panel

Bauphysikalische Aspekte wurden zunächst nicht berücksichtigt. Es wurden jeweils drei Versuche mit verdeckter Befestigung der Sandwichelemente und drei Versuche mit sichtbarer Befestigung in Durchsteckmontage (Abstand der Verbindungsmittel 200 mm) durchgeführt. Bei den Versuchskörpern mit nicht sichtbar befestigten Sandwichelementen versagten die Kassettenprofile im Bereich zwischen den mittleren Längsfugen, vgl. Versuchsreihe 1. Bei den Versuchskörpern mit sichtbar befestigten Sandwichelementen versagten die Kassettenprofile analog Versuchsreihe 2 im Bereich einer der beiden mittleren Längsfugen.

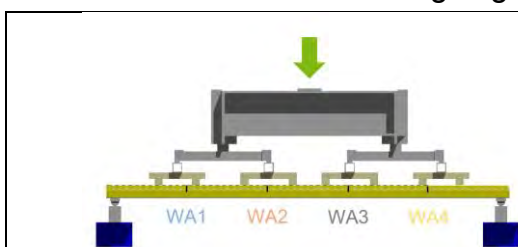


Abbildung 4-149: Bezeichnung der induktiven Wegaufnehmer
 Figure 4-149: Designations of inductive displacement transducers

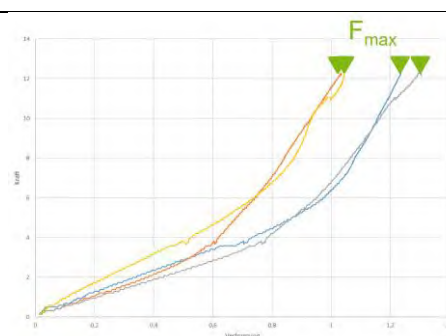


Abbildung 4-150: Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer eines Beispielversuches bei verdeckte Befestigung
 Figure 4-150: Load-displacement-curves of the inductive displacement transducers of a sample test with hidden fixation

Die folgenden Abbildung 4-149 und Abbildung 4-150 zeigen die Anordnung und die Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer eines Beispielversuches mit nicht sichtbarer Befestigung der Sandwichelemente. Die induktiven Wegaufnehmer

belegen gegenüber Versuchsreihe 1 eine deutliche Steifigkeitszunahme und eine deutliche Abnahme der Verformungen in den Längsfugen.

Die folgenden Abbildung 4-151 und Abbildung 4-152 zeigen die Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer eines Versuches mit sichtbar befestigten Sandwichelementen und eine zugehörige Längsfuge nach Versuchsende. Bei sichtbarer Befestigung der Sandwichelemente kann unter den gegebenen Randbedingungen derart viel Last über die Sandwichelemente abgetragen werden, dass neben dem Versagen der Kassettenprofile im Bereich der Längsfugen ein lokales Druckversagen im Sandwichelement auftritt.

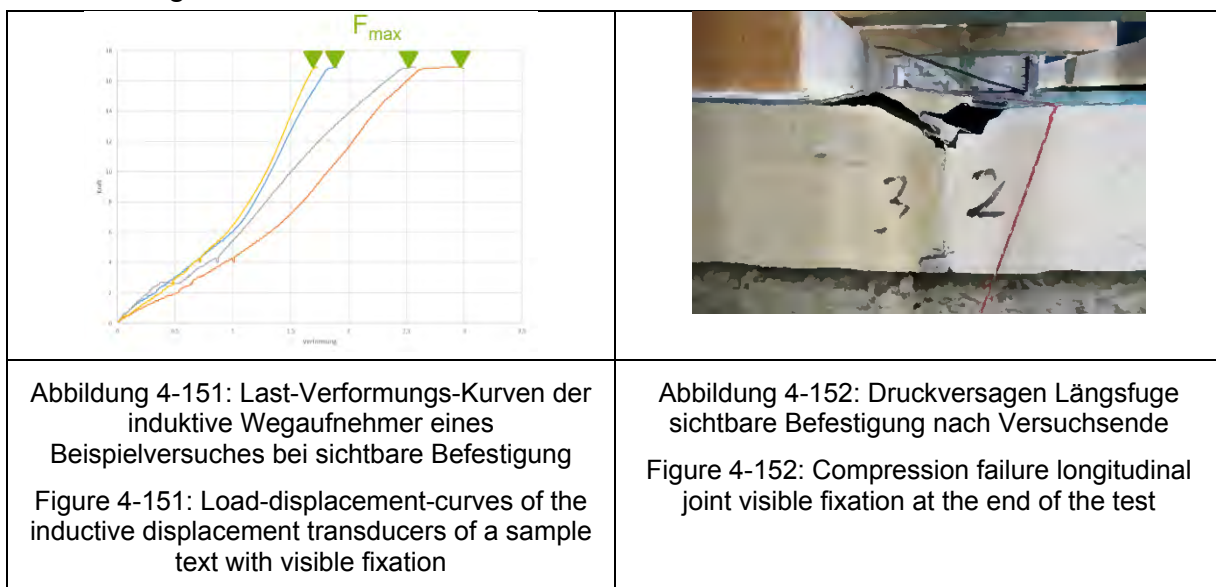


Tabelle 4-55 zeigt die maximalen Biegemomenttragfähigkeiten des Hybridquerschnitts bei andrückenden Lasten. Durch formschlüssige Verbindung der profilierten Längsfugen der Sandwichelemente kann die Tragfähigkeit gegenüber den Versuchsreihen 1 und 2 bei nicht sichtbarer Befestigung um 10 % gesteigert werden, bei sichtbarer Befestigung im Abstand von 200 mm kann die Tragfähigkeit um 48 % gesteigert werden. Folglich hat die Längsschubsteifigkeit der Verbindung der Kassettenprofile mit den Sandwichelementen großen Einfluss auf das Tragverhalten.

Tabelle 4-55: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 5

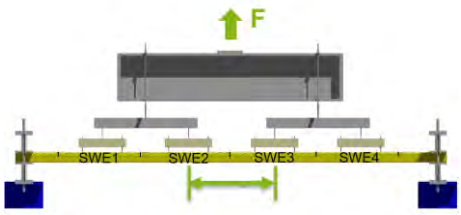

Table 4-55: Test results test series 5

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
17	verdeckt	040 „weich“	ohne Dichtband	7,4527 kNm
18	verdeckt	040 „weich“	ohne Dichtband	7,4522 kNm
19	verdeckt	040 „weich“	ohne Dichtband	8,3631 kNm
14	sichtbar, a=20cm	040 „weich“	ohne Dichtband	10,604 kNm
15	sichtbar, a=20cm	040 „weich“	ohne Dichtband	9,5769 kNm
16	sichtbar, a=20cm	040 „weich“	ohne Dichtband	11,044 kNm

Hinweis: Die angegebenen Werte besitzen nur Gültigkeit unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen. Eine Extrapolation ist nicht möglich.

4.3.5.3.4.11 Einzelauswertung Versuchsreihe 6
Individual evaluation test series 6

In Versuchsreihe 6 wurden drei Sogversuche mit nicht sichtbar in den Längsfugen befestigten Sandwichelementen und üblicher Mineralwolle in den Kassettenprofilen durchgeführt. Bei allen Versuchskörpern versagten die Kassettenprofile in Feldmitte durch Beulen des breiten Gurtes und der Stege, siehe Abbildung 4-153 und Abbildung 4-154.

	
<p>Abbildung 4-153: Bereich des Versagens der Kassettenprofile Figure 4-153: Area of liner tray failure</p>	<p>Abbildung 4-154: Innenansicht Versuchskörper nach Versuchsende Figure 4-154: Inside view test specimen at the end of the test</p>

Die Auswertung der induktiven Wegaufnehmer an den Längsfugen der Sandwichelemente zeigt erwartungsgemäß ein bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit zunehmendes Aufklaffen der Längsfugen, siehe Abbildung 4-155 und Abbildung 4-156. Bis zum Bauteilversagen klafften die mittleren Längsfugen unter den gegebenen Randbedingungen ca. 5,5 mm auf, siehe Abbildung 4-157.

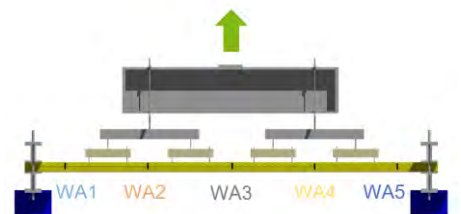
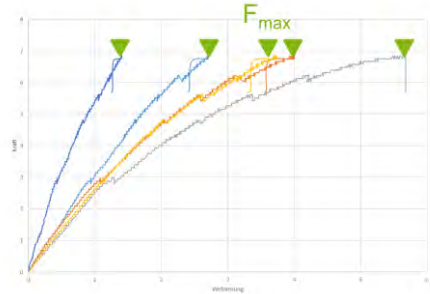
	
<p>Abbildung 4-155: Bezeichnung der induktiven Wegaufnehmer der Zugversuche Figure 4-155: Designations of the inductive displacement transducers for tension tests</p>	<p>Abbildung 4-156: Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer eines Beispielversuches Figure 4-156: Load-displacement-curves of the inductive displacement transducers of a sample test</p>



Abbildung 4-157: Aufklaffende Längsfuge
 Figure 4-157: Gaping longitudinal joint

Innerhalb der Versuchsreihe 6 zeigten sich nur geringe Streuungen der Versuchsergebnisse. Die folgende Abbildung 4-158 zeigt die zugehörigen Last-Verformungs-Kurven der vertikalen Durchbiegung in Feldmitte der drei Einzelversuche.

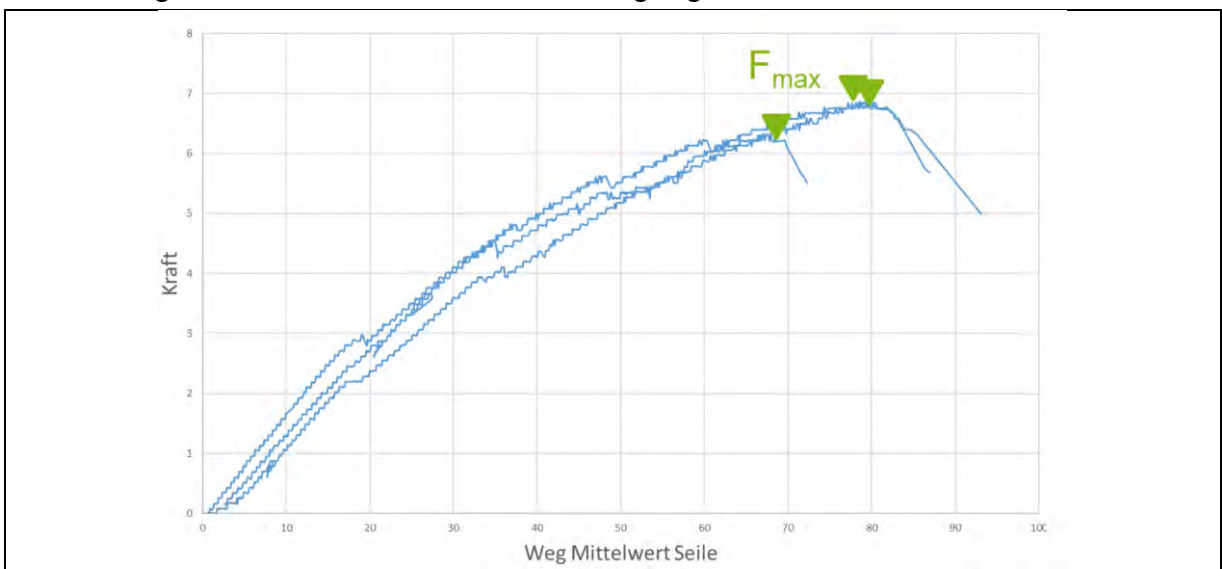


Abbildung 4-158: Last-Verformungs-Kurven Versuchsreihe 6
 Figure 4-158: Load-displacement-curves test series 6

Die folgende Tabelle 4-56 zeigt zusammenfassend die Versuchsparameter und die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 6.

Tabelle 4-56: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 6
 Table 4-56: Test results test series 6

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
20	verdeckt	040 „weich“		3,2550 kNm
21	verdeckt	040 „weich“		3,6288 kNm
22	verdeckt	040 „weich“		3,6288 kNm

4.3.5.3.4.12 Einzelauswertung Versuchsreihe 7
Individual evaluation test series 7

In Versuchsreihe 7 wurden drei Versuche mit abhebenden Lasten durchgeführt. Abweichend zu Versuchsreihe 6 wurden die Sandwichelemente in dieser Versuchsreihe sichtbar in Durchsteckmontage befestigt (Längsabstand der Befestigungsmittel 200 mm). Bei allen Versuchen der Versuchsreihe 7 versagten die Kassettenprofile in Feldmitte durch Beulen des breiten Gurtes und der Stege. Auch in Versuchsreihe 7 zeigten sich nur geringe Streuungen der Versuchsergebnisse innerhalb der Versuchsreihe.

Die folgende Tabelle 4-57 zeigt zusammenfassend die Versuchsparameter und die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 7. Unter den gegebenen Randbedingungen haben auch bei abhebenden Lasten die Art und der Abstand der Befestigungsmittel keinen Einfluss auf das Tragverhalten des Hybridquerschnitts (vgl. Tabelle 4-56).

Tabelle 4-57: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 7

Table 4-57: Test results test series 7

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
23	sichtbar, a=20cm	040 „weich“		3,4342 kNm
24	sichtbar, a=20cm	040 „weich“		3,0737 kNm
25	sichtbar, a=20cm	040 „weich“		3,3782 kNm

4.3.5.3.4.13 Einzelauswertung Versuchsreihe 8
Individual evaluation test series 8

In Versuchsreihe 8 wurde der Einfluss der Mineralwolle in den Kassettenprofilen auf das Tragverhalten von Hybridfassaden bei abhebenden Lasten untersucht. Dazu wurden drei Versuche mit steifer Mineralwolle (mit hoher Rohdichte) durchgeführt. Die Sandwichelemente in Versuchsreihe 8 wurden nicht sichtbar in den Längsfugen befestigt. Bei allen Versuchen versagten die Kassettenprofile zwischen den mittleren Längsfugen der Sandwichelemente.

Abbildung 4-159 zeigt einen Versuchskörper mit steifer Mineralwolle während der Versuchsdurchführung, Abbildung 4-160 die Kassettenprofile nach Versuchsende. Auch in Versuchsreihe 8 versagten die Kassettenprofile durch Beulen des breiten Gurtes und des Steges.

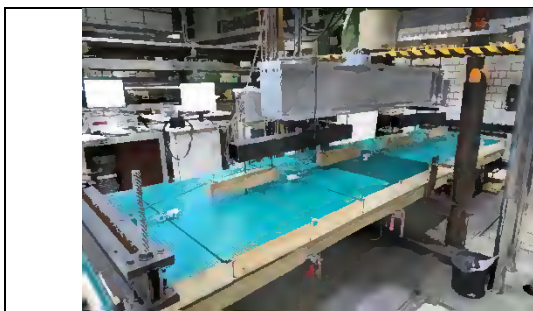


Abbildung 4-159: Ort des Versagens
 Versuchsreihe 8

Figure 4-159: Place of failure test series 8



Abbildung 4-160: Eindrücken des schmalen
 Gurtes und Stegbeulen Versuchsreihe 8

Figure 4-160: Push in of the small flange and
 web buckling test series 8

Die folgende Abbildung 4-161 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der Versuchsreihe 8. Bei ähnlichen Traglasten zeigen sich leichte Steifigkeitssprünge innerhalb dieser Versuchsreihe.

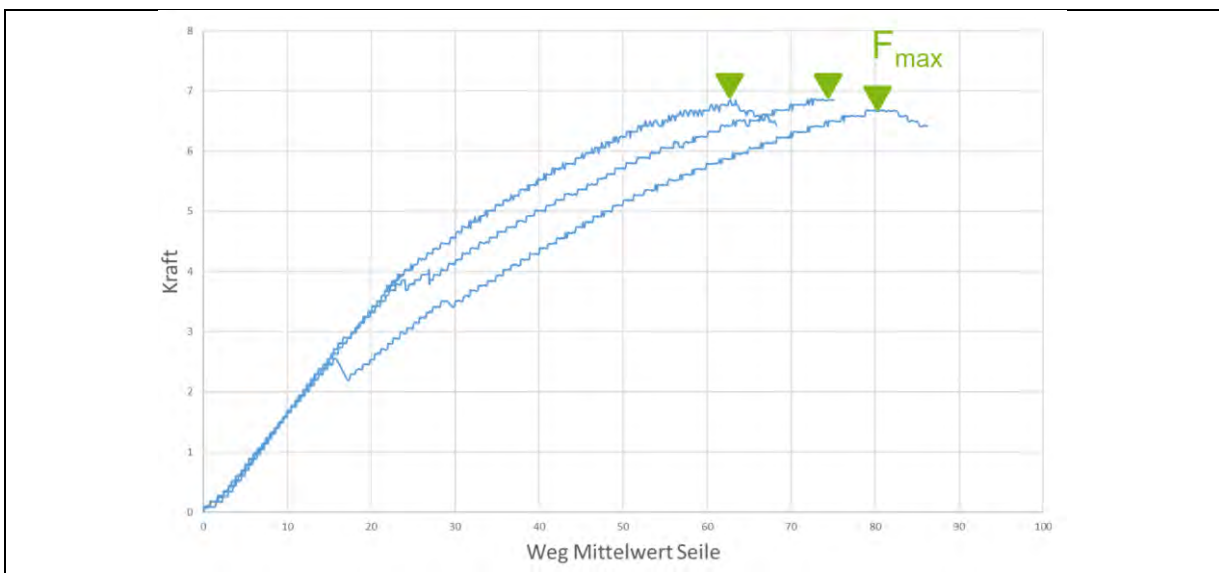


Abbildung 4-161: Last-Verformungs-Kurven Versuchsreihe 8

Figure 4-161: Load-displacement-curves test series 8

In Tabelle 4-58 sind die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 8 zusammengefasst. Die Verwendung einer steiferen Mineralwolle mit erhöhter Rohdichte führt unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen gegenüber den Versuchsreihen 6 und 7 zu keiner signifikanten Erhöhung der Tragfähigkeit.

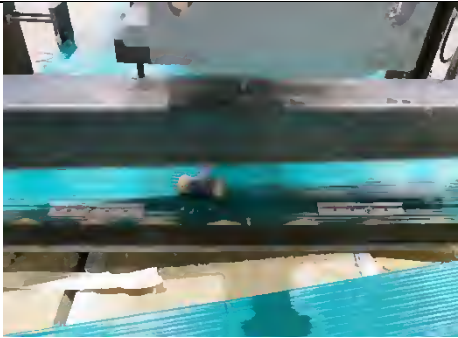
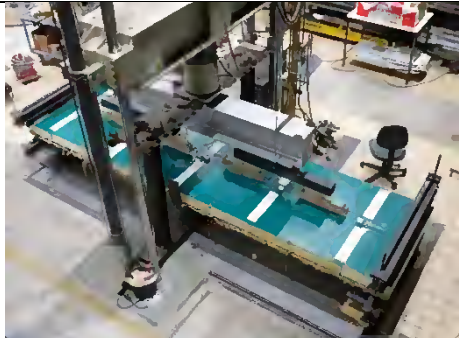
Tabelle 4-58: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 8

Table 4-58: Test results test series 8

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
26	verdeckt	035 „steif“		3,3663 kNm
27	verdeckt	035 „steif“		3,4937 kNm
28	verdeckt	035 „steif“		3,4832 kNm

4.3.5.3.4.14 Einzelauswertung Versuchsreihe 9
Individual evaluation test series 9

In Versuchsreihe 9 wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt. In dieser Versuchsreihe wurde untersucht, welchen Einfluss auf das Tragverhalten von Hybridfassaden eine kraftschlüssige Verbindung der Längsfugen der Sandwichelemente bei abhebenden Lasten hat. Dazu wurden die Längsfugen der Sandwichelemente von zwei Versuchskörpern verklebt, siehe Abbildung 4-162. Bei dem dritten Versuchskörper wurden, als Grenzfallbetrachtung, die Längsfugen der Sandwichelemente mit Laschen verschraubt, siehe Abbildung 4-163.

	
<p>Abbildung 4-162: Verklebte Längsfuge nach Versuchsende Figure 4-162: Agglutinated longitudinal joint after the end of the test</p>	<p>Abbildung 4-163: Mit Laschen verschraubte Längsfugen der Sandwichelemente Figure 4-163: Longitudinal sandwich panel joint with cover plate</p>

Bei den Versuchen mit verklebten Längsfugen versagte die Verklebung vor Erreichen der maximalen Traglast. Nach Versagen der Verklebung reduzierte sich die Steifigkeit des Hybridquerschnitts. Abbildung 4-164 zeigt die zugehörigen Last-Verformungs-Kurven der vertikalen Durchbiegung in Feldmitte.

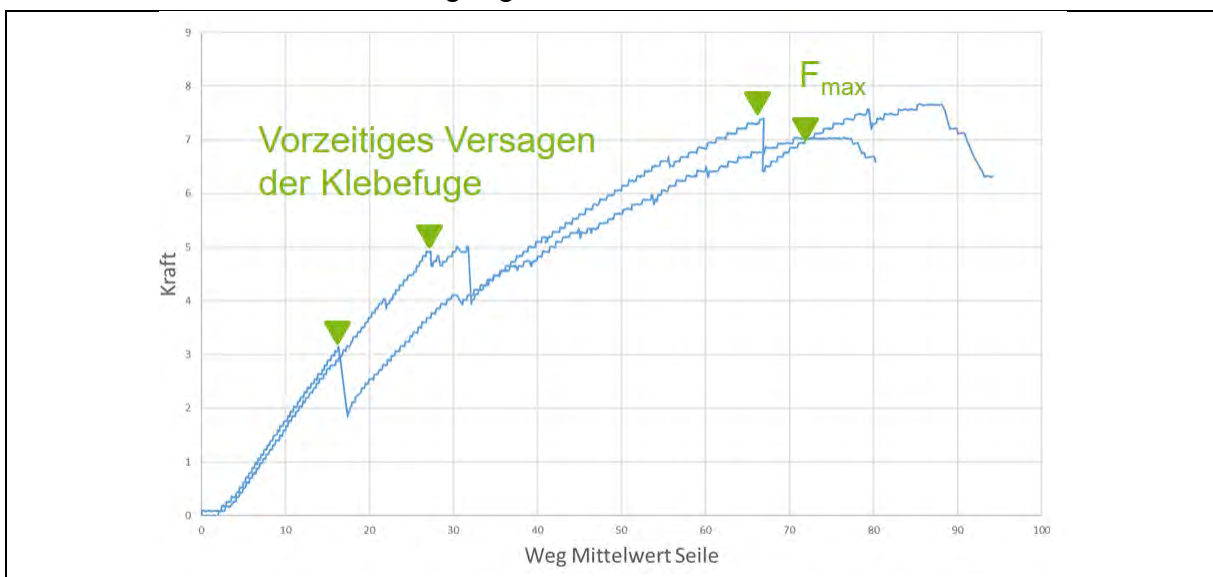


Abbildung 4-164: Last-Verformungs-Kurven Zugversuche mit verklebten Längsfugen
 Figure 4-164: Load-displacement-curves tension tests with agglutinated longitudinal joints

Die folgenden Abbildung 4-165 und Abbildung 4-166 zeigen die Anordnung und die Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer an den Längsfugen einer der

Zugversuche mit verklebter Längsfuge. Hier versagte zunächst die Verklebung der mittleren Längsfuge WA3, anschließend versagten die Kassettenprofile unterhalb dieser Längsfuge, siehe Abbildung 4-167.

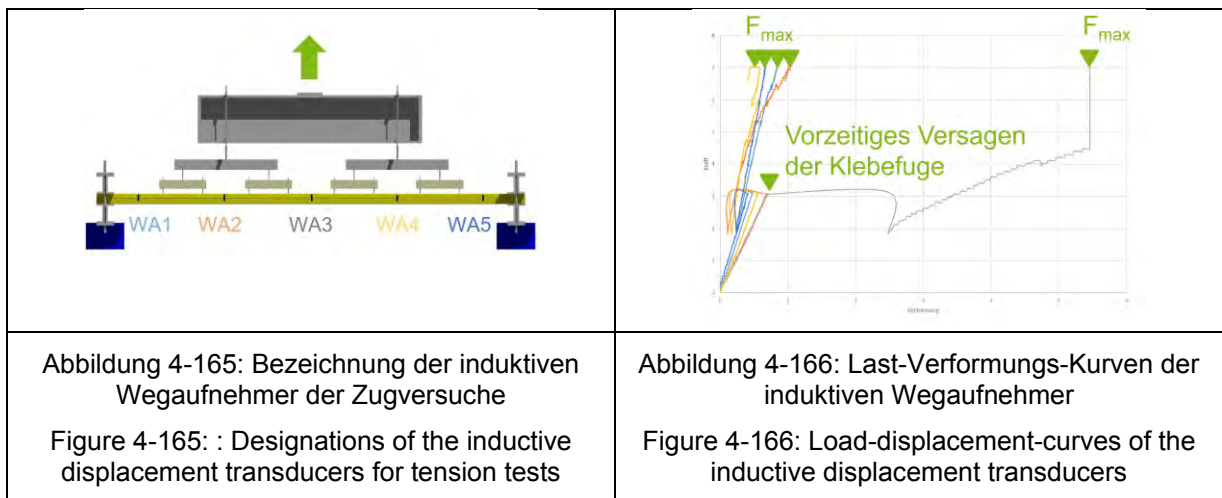
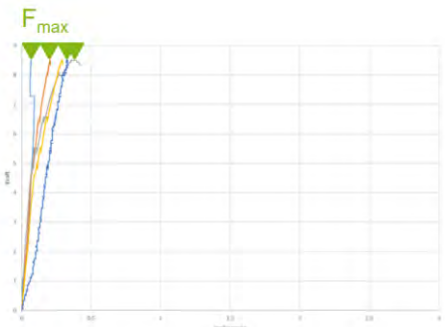



Abbildung 4-168 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer des Versuches mit verschraubten Längsfugen. Bis zum Versagen der Kassettenprofile zeigten sich bei diesem Versuch nur minimale Verformungen in den Längsfugen der Sandwichelemente. Auch bei diesem Versuch versagten die Kassettenprofile in Feldmitte durch Beulen des breiten Gurtes und der Stege, siehe Abbildung 4-169. Abbildung 4-170 zeigt die Last-Verformungs-Kurven der vertikalen Durchbiegung in Feldmitte aller drei Versuche der Versuchsreihe 9.

	
<p>Abbildung 4-168: Last-Verformungs-Kurven der induktiven Wegaufnehmer Versuch mit Laschen</p> <p>Figure 4-168: Load-displacement-curves of the inductive displacement transducers test with cover plates</p>	<p>Abbildung 4-169: Versagen der Kassettenprofile unterhalb der mittleren Längsfuge Versuch mit Laschen</p> <p>Figure 4-169: Failure of liner tray profiles below midspan longitudinal joint test with cover plates</p>

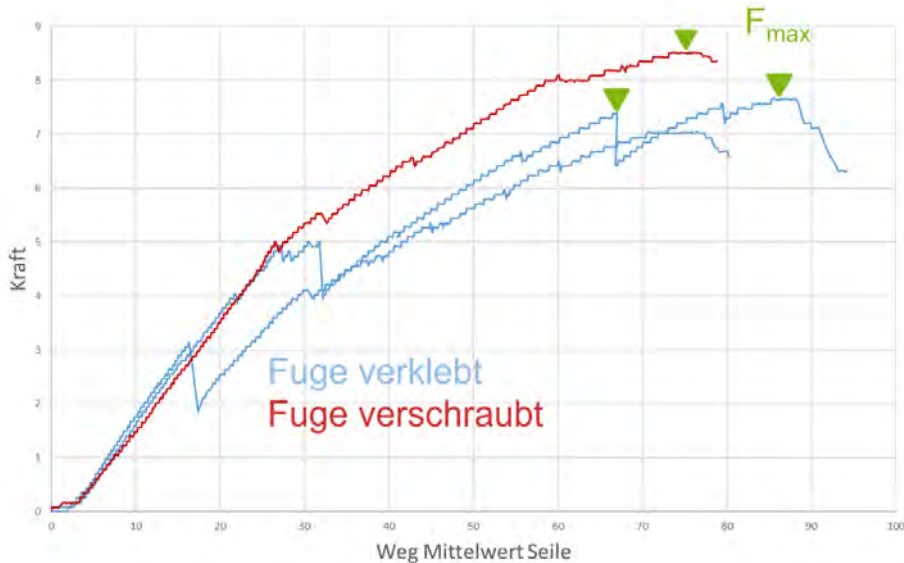

<p>Abbildung 4-170: Last-Verformungs-Kurven Zugversuche mit verklebten und verschraubten Längsfugen</p> <p>Figure 4-170: Load-displacement-curves tension tests with agglutinated and cover plated longitudinal joints</p>

Tabelle 4-59 zeigt die maximalen Biegemomenttragfähigkeiten der Versuchsreihe 9. Durch kraftschlüssige Verbindung der profilierten Längsfugen der Sandwichelemente kann die Tragfähigkeit bei abhebenden Lasten (gegenüber den Versuchsreihen 6 und 7) um bis zu 35 % gesteigert werden, wenn die Längsfugen ausreichend Zugkräfte übertragen können.

Hinweis: Die angegebenen Werte besitzen nur Gültigkeit unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen. Eine Extrapolation ist nicht möglich.

Tabelle 4-59: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 9

Table 4-59: Test results test series 9

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Art der Befestigung Sandwichelement	Art der Mineralwolle	Anmerkung	maximales Biegemoment
29	verdeckt	040 „weich“	Längsfuge verklebt	3,7009 kNm
30	verdeckt	040 „weich“	Längsfuge verklebt	4,1314 kNm
31	verdeckt	040 „weich“	Längsfuge verschraubt	4,7320 kNm

4.3.5.3.4.15 Zusammenfassung der Ergebnisse

Summary of results

Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen haben die Art der Befestigung und die Lage der Längsfugen der Sandwichelemente in Hybridfassaden mit vertikal verlegten Sandwichelementen zunächst keinen Einfluss auf das Tragverhalten. Sowohl bei andrückender, als auch bei abhebender Belastung des Hybridquerschnitts kann eine sichtbare Befestigung in Durchsteckmontage im Längsabstand von 200 mm das Tragverhalten gegenüber einer nicht sichtbaren Befestigung in den Längsfugen (Längsabstand 1000 mm) nicht verbessern.

Werden die profilierten Längsfugen der Sandwichelemente so modifiziert, dass sie in Querrichtung Druck- und Zugkräfte übertragen können, erhöht sich die Tragfähigkeit des Hybridquerschnitts. In diesem Fall hat auch die Art der Befestigung der Sandwichelemente einen großen Einfluss auf das Tragverhalten.

Fehlende Mineralwolle in den Kassettenprofilen kann zu einer leichten Reduktion der Tragfähigkeit der Kassettenprofile führen. Eine Steigerung der Tragfähigkeit durch Verwendung von Mineralwolle mit besonders hoher Rohdichte ist unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen für andrückende und abhebende Lasten nicht möglich.

Die Montage der Sandwichelemente in Hybridfassaden ist bei vertikaler Verlegung fehleranfällig und muss mit besonderer Sorgfalt erfolgen. Die schmalen Kassettenurte können wegen ihrer geringen Nennblechdicken leicht verformt werden, was die Tragfähigkeit erheblich reduziert.

4.3.5.4 Sanierung mit horizontal verlegten Sandwichelementen **Refurbishment with horizontally mounted sandwich panels**

4.3.5.4.1 Allgemeines

Preface

Kann der statische Nachweis einer Hybridfassade mit vertikal verlegten Sandwichelementen nicht erbracht werden, ist in der Regel eine horizontale Verlegung der Sandwichelemente möglich. Auch aus anderen Gründen (beispielsweise das optische Erscheinungsbild) kann eine horizontale Verlegung gewählt werden.

Wegen der unterschiedlichen Baubreiten (Kassettenprofile i.d.R. 600 mm und Sandwichelemente i.d.R. 1000 mm) ist bei gleicher Verlegerichtung keine verdeckte Befestigung (heute üblich) der Sandwichelemente an den schmalen Kassettengurten möglich. Folglich müssen zur Stabilisierung der schmalen Gurte der Kassettenprofile und zur Befestigung der Sandwichelemente zusätzliche vertikale Lisenenprofile verlegt werden, siehe Abbildung 4-171. Werden Kassettenprofilfassaden mit bestehender, horizontal verlegter Außenschale (Beispielsweise Wellprofile) in Hybridbauweise saniert, können bereits vorhandene Lisenenprofile häufig weiterverwendet werden.

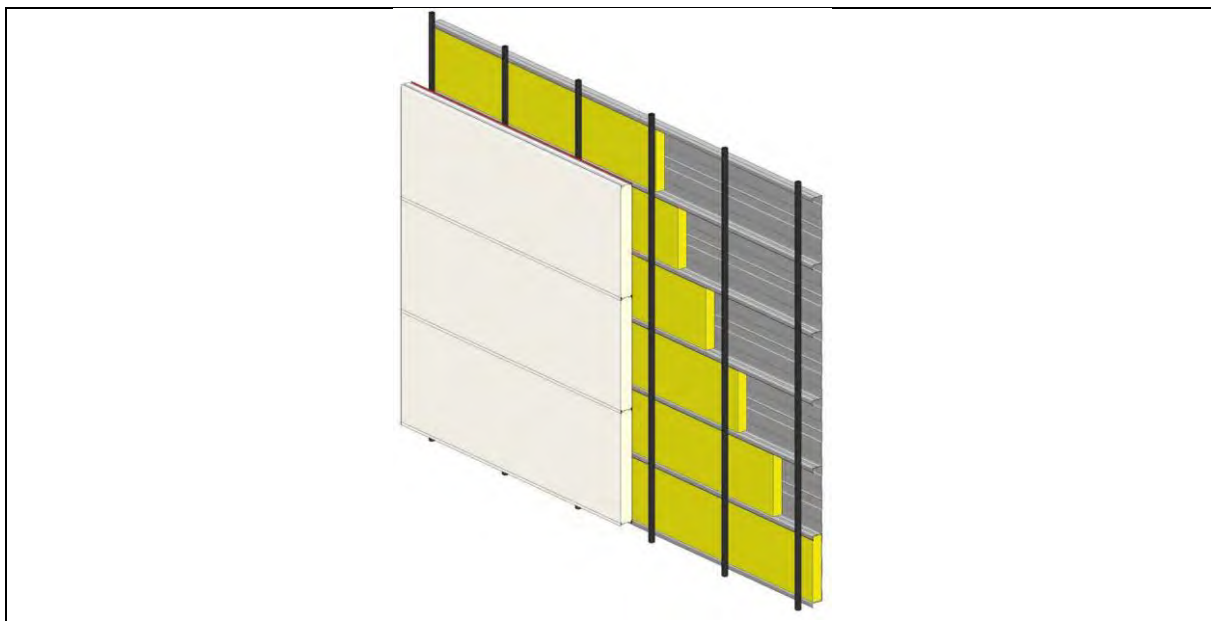


Abbildung 4-171: „Hybridisierung“ einer Kassettenprofilfassade mit horizontal verlegten Sandwichelementen

Figure 4-171: “Hybrid refurbishment” of a liner tray façade with horizontal mounted sandwich panels

4.3.5.4.2 Experimentelle Untersuchungen Experimental studies

4.3.5.4.2.1 Allgemeines Preface

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden insgesamt 18 Großbauteilversuche zum Tragverhalten von Hybridfassaden mit horizontal verlegter Sandwichelement-Außenschale durchgeführt. Die vollständigen Versuchsdatenblätter sind in Anhang B3 hinterlegt. Die Auswertung der Versuche wurde analog zu den Versuchen zum Tragverhalten von Hybridfassaden mit vertikal verlegter Außenschale durchgeführt.

4.3.5.4.2.2 Ziele der experimentellen Untersuchungen Objectives of the experimental studies

Grundlegende Erkenntnisse zum Tragverhalten von Hybridfassaden mit horizontal verlegten Sandwichelementen fehlten bislang. Diese Erkenntnisse sollten gewonnen werden. Dazu wurde untersucht, ob ein Hybridquerschnitt über die Einzeltragfähigkeiten von Kassettenprofil und Sandwichelement hinaus Tragreserven bereitstellen kann. Darüber hinaus sollte bestimmt werden, welchen Einfluss auf das Trag-

verhalten die Art und der Abstand der Lisenenprofile haben. Auch der Einfluss der Art der Befestigung der Sandwichelemente an den Lisenenprofilen sollte bestimmt werden.

4.3.5.4.2.3 Versuchsaufbau

Test setup

Der Versuchsaufbau für andrückende und abhebende Lasten wurde weitestgehend aus den Kapiteln 4.3.5.3.4.3 und 4.3.5.3.4.4 übernommen. Abweichend wurden nur die Sandwichelemente parallel zu den Kassettenprofilen verlegt und an zusätzlichen, orthogonal verlegten Profilen befestigt. Je Versuchskörper wurde in Querrichtung mittig ein vollständiges Sandwichelement über die gesamte Länge montiert. Dieses Element wurde an beiden Längsrändern mit entsprechend profilierten Sandwichelement-Segmenten ergänzt, siehe Abbildung 4-172.



Abbildung 4-172: Seitenansicht Hybridquerschnitt mit horizontal verlegten Sandwichelementen

Figure 4-172: Side elevation hybrid-section with horizontally mounted sandwich panels

In die Kassettenprofile wurde bei allen durchgeführten Versuchen mit horizontal verlegten Sandwichelementen weiche Mineralwolle (WLS 040) eingebracht. Induktive Wegaufnehmer wurden bei diesen Versuchen nicht verwendet. Bei einzelnen Versuchen wurden in Feldmitte gemäß den folgenden Abbildung 4-173 und Abbildung 4-174 zehn Dehnungsmessstreifen angeordnet. Diese Dehnungsmessstreifen ermöglichten eine Analyse der Spannungsverteilung im Gesamtquerschnitt.



Abbildung 4-173: Dehnungsmessstreifen am schmalen Gurt der Kassettenprofile

Figure 4-173: Strain gauge at small liner tray flange

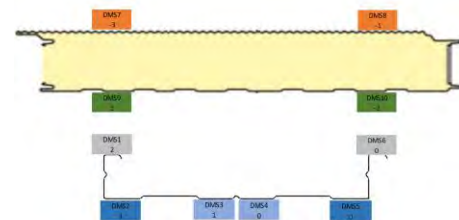




Abbildung 4-174: Position der Dehnungsmessstreifen in Feldmitte

Figure 4-174: Location of strain gauges at midspan



4.3.5.4.2.4 Versuchsreihe 1
Test series 1

In Versuchsreihe 1 wurden insgesamt vier Versuche mit abhebender Belastung und nicht sichtbar befestigten Sandwichelementen durchgeführt. Dabei wurde in dieser Versuchsreihe der Profiltyp der Lisenenprofile variiert. Alle Lisenenprofile dieser Versuchsreihe wurden im Längsabstand von 1000 mm angeordnet.

Zunächst wurde, als Grenzfallbetrachtung für besonders steife Lisenenprofile, ein Versuch mit quadratischen Hohlprofilen 40 x 4 mm durchgeführt. Die folgende Abbildung 4-175 zeigt die Montage der Lisenenprofile. Abbildung 4-176 zeigt das Lisenenprofil in eingebautem Zustand.

	
<p>Abbildung 4-175: Montage Lisenenprofil QHP 40 x 4 mm Figure 4-175: Assembly pilaster strip profiles QHP 40 x 4 mm</p>	<p>Abbildung 4-176: Ansicht Lisenenprofil Figure 4-176: Elevation pilaster strip profile</p>

Bei der Versuchsdurchführung versagten zunächst die Kassettenprofile durch Beulen des breiten Gurtes und der Stege, siehe Abbildung 4-177. Anschließend versagten die Sandwichelemente durch Knittern der inneren Deckschicht, siehe Abbildung 4-178.

	
<p>Abbildung 4-177: Beulen der Kassettenprofile Figure 4-177: Buckling of liner tray profiles</p>	<p>Abbildung 4-178: Knittern der inneren Deckschicht Figure 4-178: Wrinkling at the inner face layer</p>

Zusätzlich zeigten sich lokale Verformungen und Delamination der inneren Deckschicht im Bereich der Lisenenprofile, siehe Abbildung 4-179.



Abbildung 4-179: Lokale Verformungen und Delamination der inneren Deckschicht
 Figure 4-179: Local deformations and delamination of the inner face layer

Der zweite Versuch wurde mit, gegenüber den quadratischen Hohlprofilen sehr weichen, C-Profilen mit den Abmessungen 40 x 30 x 1,5 mm durchgeführt. Die folgende Abbildung 4-180 zeigt die Montage der C-Profile.



Abbildung 4-180: Montage der C-Profile
 Figure 4-180: Assembly of C-profiles

Auch bei diesem Versuch versagten zunächst die Kassettenprofile in Feldmitte durch Beulen des breiten Gurtes und der Stege. Mit Knittern der inneren Deckschichten der Sandwichelemente wurden die Befestigungsmittel der Lisenenprofile in Feldmitte aus den schmalen Kassettengurten herausgezogen, siehe folgende Abbildung 4-181 und Abbildung 4-182.





Abbildung 4-181: Versuchskörper nach Versuchsende
 Figure 4-181: Test specimen after the end of the test





Abbildung 4-182: Herausziehen des Befestigungsmittels aus den schmalen Kassettengurten
 Figure 4-182: Fastener pulling out of the small liner tray flange

Der dritte Versuch wurde mit (im Fassadenbau üblichen) Hutprofilen durchgeführt. Die folgenden Abbildung 4-183 und Abbildung 4-184 zeigen die Montage der Hutprofile.

	
<p>Abbildung 4-183: Ansicht Montage Hutprofil Figure 4-183: Elevation mounting of hat profile</p>	<p>Abbildung 4-184: Hutprofile bei der Montage Figure 4-184: Hat profile during mounting</p>

Auch bei diesem Versuch versagten zunächst die Kassettenprofile durch Beulen des breiten Gurtes und der Stege, siehe Abbildung 4-185. Anschließend versagten die Sandwichelemente durch Knittern der inneren Deckschichten, siehe Abbildung 4-186. Dieser Versuch wurde mit gleichen Versuchsergebnissen wiederholt.

	
<p>Abbildung 4-185: Versuchskörper nach Versuchsende Figure 4-185: Test specimen after the end of the test</p>	<p>Abbildung 4-186: Knittern der inneren Deckschicht Figure 4-186: Wrinkling at the inner face layer</p>

Die folgende Abbildung 4-187 zeigt die Last-Verformungs-Kurven (vertikale Durchbiegung in Feldmitte) der Zugversuche mit unterschiedlichen Lisenenprofilen. Die unterschiedlichen Lisenenprofiltypen haben unter den gegebenen Randbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Verformungen und die Tragfähigkeit der Hybridfassade.

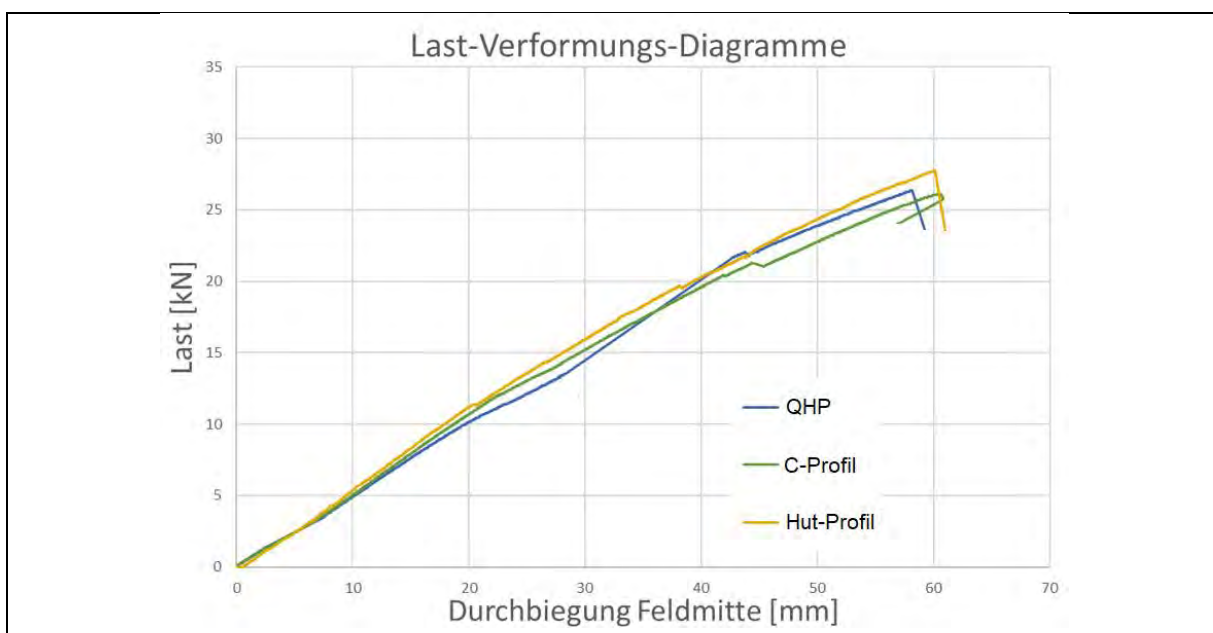


Abbildung 4-187: Last-Verformungs-Kurven unterschiedlicher Lisenenprofile

Figure 4-187: Load-displacement-curves different pilaster strip profiles

In der folgenden Tabelle 4-60 werden die Versuchsparameter und die Biegemomenttragfähigkeiten der Versuche aus Versuchsreihe 1 zusammengefasst.

Tabelle 4-60: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 1

Table 4-60: Test results test series 1

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Profiltyp Lisenenprofil	Art der Befestigung Sandwichelement	Anmerkung	maximales Biegemoment
32	QRO 40 x 4	verdeckt		18,463 kNm
33	C-Profil	verdeckt	Versagen Befestigung Lisenenprofil	18,295 kNm
34	Hutprofil	verdeckt		19,435 kNm
38	Hutprofil	verdeckt		19,284 kNm

4.3.5.4.2.5 Versuchsreihe 2

Test series 2

In Versuchsreihe 2 wurde ein Versuch mit abhebender Belastung durchgeführt. Bei diesem Versuch wurden Hutprofile als Lisenenprofile verwendet. Die Lisenenprofile wurden in einem Längsabstand von 1000 mm angeordnet. Die Sandwichelemente wurden sichtbar in Durchsteckmontage (in einem Querabstand von 200 mm) an den Hutprofilen befestigt, siehe Abbildung 4-188 und Abbildung 4-189.

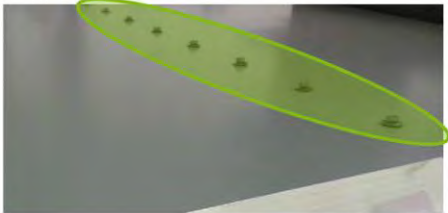

	
<p>Abbildung 4-188: Sichtbare Schraubenköpfe Figure 4-188: Visible screw heads</p>	<p>Abbildung 4-189: Befestigung der Sandwichelemente Versuchsreihe 2 Figure 4-189: Sandwich panel fixation test series 2</p>

Tabelle 4-61 zeigt die Versuchsparmeter und die Biegemomenttragfähigkeit des Versuches mit sichtbarer Befestigung der Sandwichelemente. Gegenüber der Versuchsreihe 1 erhöht die sichtbare Befestigung unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen die Tragfähigkeit um 14 %.

Tabelle 4-61: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 2

Table 4-61: Test results test series 2

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Profiltyp Lisenenprofil	Art der Befestigung Sandwichelement	Anmerkung	maximales Biegemoment
36	Hutprofil	sichtbar, a=20cm		21,483 kNm

4.3.5.4.2.6 Versuchsreihe 3 Test series 3

In Versuchsreihe 3 wurde ein Versuch mit abhebender Belastung durchgeführt. Auch bei diesem Versuch wurden Hutprofile als Lisenenprofile verwendet. Gegenüber den Versuchsreihen 1 und 2 wurde der Abstand der Lisenenprofile auf 500 mm reduziert, siehe Abbildung 4-190. Die Sandwichelemente wurden verdeckt in ihren Längsfugen an den Lisenenprofilen befestigt.

Auch dieser Versuchskörper versagte durch Beulen der breiten Gurte und der Stege der Kassettenprofile und Knittern der inneren Decksichten der Sandwichelemente. Abbildung 4-191 zeigt den Versuchskörper nach Versuchsende.



	
<p>Abbildung 4-190: Lisenenprofile mit reduziertem Längsabstand Figure 4-190: Pilaster strip profiles with reduced longitudinal distance</p>	<p>Abbildung 4-191: Befestigung der Sandwichelemente Versuchsreihe 3 Figure 4-191: Sandwich panel fixation test series 3</p>

Tabelle 4-62 zeigt die Versuchsparameter und die Biegemomenttragfähigkeit des Versuches mit reduziertem Abstand der Lisenenprofile und verdeckter Befestigung der Sandwichelemente. Gegenüber der Versuchsreihe 1 erhöht sich durch den reduzierten Abstand der Lisenenprofile unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen die Tragfähigkeit um 18 %.

Tabelle 4-62: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 3



Table 4-62: Test results test series 3

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Profiltyp Lisenenprofil	Art der Befestigung Sandwichelement	Anmerkung	maximales Biegemoment
37	Hutprofil	verdeckt	Abstand Hut 50 cm	22,290 kNm

4.3.5.4.2.7 Versuchsreihe 4

Test series 4

In Versuchsreihe 4 wurden bei abhebender Belastung vier Referenzversuche mit Sandwichelementen ohne Kassettenprofile durchgeführt. Die profilierten Längsränder wurden entfernt, um einen Einfluss der Längsrandprofilierungen auf die Versuchsergebnisse auszuschließen. Die Breite der Versuchskörper betrug 800 mm. Alle Versuchskörper dieser Versuchsreihe versagten durch Knittern der inneren Deckschichten. Abbildung 4-192 zeigt einen Versuchskörper vor Versuchsbeginn, Abbildung 4-193 zeigt einen Versuchskörper nach Versuchsende.

	
<p>Abbildung 4-192: Versuchskörper vor Versuchsbeginn Figure 4-192: Test specimen prior to the commencement of the test</p>	<p>Abbildung 4-193: Knittern der inneren Deckschicht Figure 4-193: Wrinkling of the inner face layer</p>

Die in Versuchsreihe 4 ermittelten Tragfähigkeiten der Sandwichelemente sind in der folgenden Tabelle 4-63. dargestellt. Die ermittelten Biegemomenttragfähigkeiten beziehen sich auf die Breite der Versuchskörper von 800 mm.

Tabelle 4-63: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 4

Table 4-63: Test results test series 4



Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Profiltyp Lisenenprofil	Art der Befestigung Sandwichelement	Anmerkung	maximales Biegemoment
35			nur Sandwichelement	7,8897 kNm
39			nur Sandwichelement	7,7259 kNm
40			nur Sandwichelement	8,4077 kNm
41			nur Sandwichelement	8,0066 kNm

4.3.5.4.2.8 Versuchsreihe 5

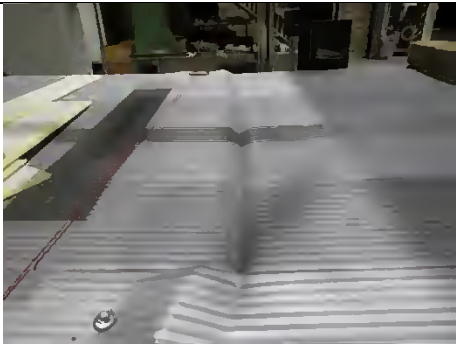

Test series 5

In Versuchsreihe 5 wurden insgesamt fünf Versuche zu Hybridfassaden bei andrückender Belastung durchgeführt. Als Lisenenprofile wurden Hutprofile (Längsabstand 1000 mm) verwendet. Die Sandwichelemente wurden nicht sichtbar in ihren Längsfugen an den Lisenenprofilen befestigt.

Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen konnten die horizontal verlegten Sandwichelemente die Kassettenprofile bei andrückender Belastung derart ertüchtigen, dass die Querkrafttragfähigkeit der Kassettenprofile im Auflagerbereich überschritten wurde. Abbildung 4-194 zeigt den ersten Versuch der Versuchsreihe 5 nach Versuchsende. Zur Ermittlung der Biegemomenttragfähigkeit des Hybridquerschnitts wurden bei den verbleibenden vier Versuchen der Versuchsreihe 5 die Stege der Kassettenprofile im Auflagerbereich lokal verstärkt, vgl. Abbildung 4-195.

	
<p>Abbildung 4-194: Querkraftversagen am Auflager Figure 4-194: Shear force failure at bearing area</p>	<p>Abbildung 4-195: Verstärkung der Kassettenprofile im Auflagerbereich Figure 4-195: Reinforcement of liner tray profiles at bearing area</p>

Die verbleibenden vier Versuche der Versuchsreihe 5 versagten durch Knittern der äußeren Deckbleche der Sandwichelemente sowie Eindrücken der schmalen Gurte und Beulen der Stege der Kassettenprofile in Feldmitte. Abbildung 4-196 und Abbildung 4-197 zeigen einen Versuchskörper in Feldmitte nach Versuchsende.

	
<p>Abbildung 4-196: Knittern des äußeren Deckbleches Figure 4-196: Wrinkling of outer face layer</p>	<p>Abbildung 4-197: Versagen der Kassettenprofile Figure 4-197: Liner tray profiles failure</p>

Die in Versuchsreihe 5 ermittelten Biegemomenttragfähigkeiten des Hybridquerschnitts bei andrückender Belastung sind in der folgenden Tabelle 4-64 dargestellt.

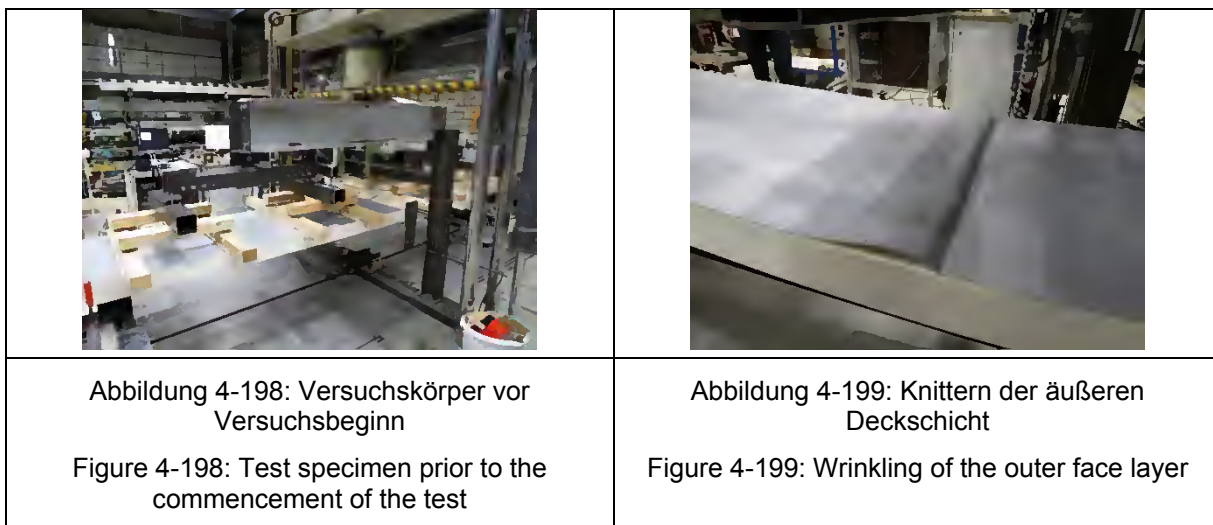
Tabelle 4-64: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 5

Table 4-64: Test results test series 5

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Profiltyp Lisenenprofil	Art der Befestigung Sandwichelement	Anmerkung	maximales Biegemoment
42	Hutprofil	verdeckt	Versagen Auflagerbereich	13,659 kNm
43	Hutprofil	verdeckt		24,604 kNm
44	Hutprofil	verdeckt		24,696 kNm
45	Hutprofil	verdeckt		23,807 kNm
46	Hutprofil	verdeckt		24,600 kNm

4.3.5.4.2.9 Versuchsreihe 6
Test series 6

In Versuchsreihe 6 wurden bei andrückender Belastung drei Referenzversuche mit Sandwichelementen ohne Kassettenprofile durchgeführt. Die profilierten Längsränder wurden auch bei Versuchsreihe 6 entfernt, um einen Einfluss der Längsrandprofilierungen auf die Versuchsergebnisse auszuschließen. Die Breite der Versuchskörper ohne Längsrandprofilierung betrug 800 mm. Alle Versuchskörper dieser Versuchsreihe versagten durch Knittern der äußeren Deckschicht. Abbildung 4-198 zeigt einen Versuchskörper vor Versuchsbeginn, Abbildung 4-199 zeigt einen Versuchskörper nach Versuchsende.



Die in Versuchsreihe 6 ermittelten Tragfähigkeiten der Sandwichelemente sind in der folgenden Tabelle 4-65. dargestellt. Die ermittelten Biegemomenttragfähigkeiten beziehen sich auf die Breite der Versuchskörper von 800 mm.

Tabelle 4-65: Versuchsergebnisse Versuchsreihe 6
 Table 4-65: Test results test series 6

Versuch-Nr. (siehe Anhang)	Profiltyp Lisenenprofil	Art der Befestigung Sandwichelement	Anmerkung	maximales Biegemoment
47			nur Sandwichelement	10,352 kNm
48			nur Sandwichelement	10,043 kNm
49			nur Sandwichelement	10,107 kNm

4.3.5.4.2.10 Auswertung der experimentellen Untersuchungen
Evaluation of the experimental studies

Unterschiedliche Lisenenprofiltypen haben unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Verformungen und die Tragfähigkeit der Hybridfassade. Hutprofile ermöglichen eine einfache Montage und im Bedarfsfall können je Kreuzungspunkt von Lisenenprofil und Kassettenprofil zwei

Befestigungsmittel eingebracht werden. Folglich werden Hutprofile als Lisenenprofile für Hybridfassaden mit horizontaler Außenschale empfohlen. Auch Z-Profile ermöglichen eine einfache Montage.

Die Art der Befestigung der Sandwichelemente und der Abstand der Lisenenprofile haben Einfluss auf das Tragverhalten von Hybridfassaden mit horizontal verlegter Außenschale. Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen konnte die Tragfähigkeit bei abhebender Belastung um 14 bzw. 18 % gesteigert werden.

Sandwichelemente können bei horizontaler Verlegung Kassettenprofilfassaden derart ertüchtigen, dass bei alleiniger Befestigung der Sandwichelemente an den Kassettenprofilen die Querkrafttragfähigkeit der Kassettenprofile im Auflagerbereich überschritten wird. Es wird empfohlen, in Hybridfassaden mit horizontal verlegten Sandwichelementen die Sandwichelemente zusätzlich direkt an der primären Tragstruktur zu befestigen.

Vergleicht man die Biegemomenttragfähigkeit des beispielhaft untersuchten Hybridquerschnitts (100 mm Kassettenprofil und 120 mm Sandwichelement) bei vertikaler und horizontaler Verlegung der Sandwichelemente, zeigt sich, dass durch horizontale Verlegung der Sandwichelemente die Tragfähigkeit bei andrückenden Lasten um bis zu 250 % und bei abhebenden Lasten bis zu 440 % gesteigert werden kann.

Berücksichtigt man die Versuchsreihen 4 und 6 zeigt sich, dass der Hybridquerschnitt über die Summe der Einzeltragfähigkeiten von Kassettenprofil und Sandwichelement hinaus Tragreserven bereitstellt. Die Auswertung der Dehnungsmessstreifen belegt jedoch, dass zwischen Kassettenprofil und Sandwichelement wegen fehlender Steifigkeit in der Fuge nur ein geringer Teilverbund vorliegt. Beispielhaft zeigen die folgenden Abbildung 4-200 und Abbildung 4-201 die Dehnungen der einzelnen Querschnittsteile eines Versuches mit andrückenden Lasten in Feldmitte zum Zeitpunkt T. Sowohl das Sandwichelement, als auch das Kassettenprofil haben druck- und zugbeanspruchte Querschnittsteile.

<p>Abbildung 4-200: Last-Verformungs-Kurven der Dehnungsmessstreifen Figure 4-200: Load-displacement-curves of strain gauges</p>	<p>Abbildung 4-201: Anordnung der Dehnungsmessstreifen und Dehnung zum Zeitpunkt T Figure 4-201: Set-up of strain gauges and elongation at point T</p>

4.3.5.4.3 Zusammenfassung
 Summary

Das Tragverhalten von Hybridfassaden mit horizontal verlegten Sandwichelementen kann deutlich einfacher als das Tragverhalten von Hybridfassaden mit vertikal verlegten Sandwichelementen abgebildet werden. Horizontal verlegte Sandwichelemente können bestehende Kassettenprofilfassaden statisch ertüchtigen. Unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen kann die Tragfähigkeit mit üblichen, leicht profilierten Sandwichelementen um bis zu 440 % gesteigert werden. Die Ausführung ist wegen der zusätzlichen vertikalen Profile aufwendiger und kostenintensiver. Auch bauphysikalische Aspekte müssen berücksichtigt werden.

Hinweis: Die experimentell ermittelten Tragfähigkeiten gelten nur unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen. Eine Extrapolation ist nicht möglich.

4.3.5.5 Tragverhalten der Kassettenprofile bei Einleitung vertikaler Lasten
Load bearing behaviour of liner tray profiles under vertical loads

Kassettenprofile in Fassaden werden in der Regel nur für den Abtrag horizontaler Lasten bemessen. Dabei wird davon ausgegangen, dass größere vertikale Lasten, also in der Regel das Eigengewicht der Außenschale, im Trauf- oder Sockelbereich in die Unterkonstruktion eingeleitet werden. Kleinere vertikale Lasten dürfen nach aktuellem Stand der Normung vernachlässigt werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens [89] wurde untersucht, welchen Einfluss auf das Tragverhalten der Kassettenprofile das Eigengewicht einer zusätzlichen Außenschale hat, wenn es an den schmalen Gurten in die Kassettenprofile eingeleitet wird. Mögliche Anwendungsfälle sind beispielsweise innovative „Einhakverbindungen“ (entlehnt aus dem Hochregallagerbau), siehe Abbildung 4-202 und Abbildung 4-203.

<p>Abbildung 4-202: Schematische Darstellung einer Einhakverbindung (Vertikalschnitt) Figure 4-202: Schematic figure hook joint (vertical section)</p>	<p>Abbildung 4-203: Schematische Darstellung einer Einhakverbindung (Horizontalschnitt) Figure 4-203: Schematic figure hook joint (horizontal section)</p>

Beispielhaft wird zunächst vereinfachend ein 100 mm breiter Streifen einer Kassettenprofilfassade mit 0,75 mm Nennblechdicke und Steghöhe 100 mm betrachtet, siehe Abbildung 4-204.

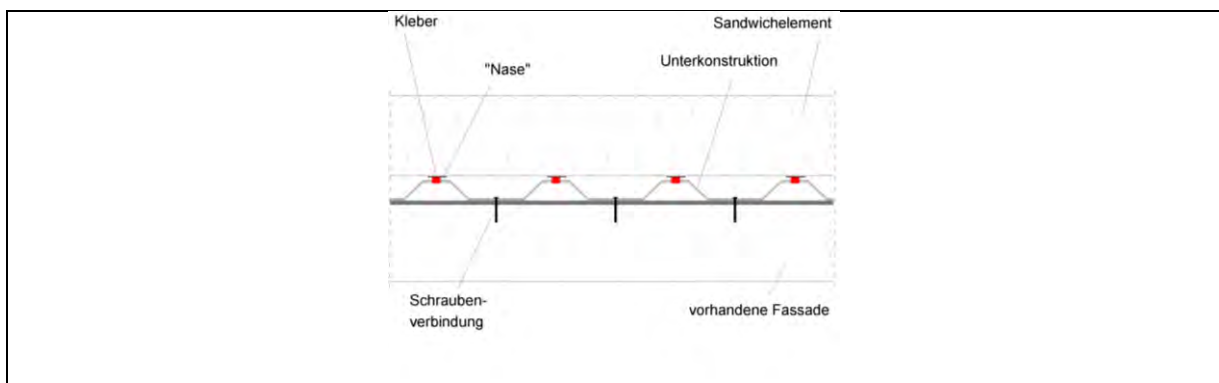


Abbildung 4-204: Kassettensteg unter Vertikallast [89]

Figure 4-204: Liner tray web under vertical load [89]

Dabei wird das Eigengewicht der Außenschale anteilig für den 100 mm breiten Streifen als resultierende Last P bestimmt. Das Eigengewicht der Dämmung zwischen den Kassettenstegen wird als Streckenlast p berücksichtigt. Die Widerstände der beiden Kassettenprofile im Bereich der Überlappung werden addiert.

Die Streckenlast p aus dem Eigengewicht des Kassettensteges und der Dämmschicht beträgt unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen

$$\begin{aligned}
 p &= 0,1 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} / (0,1 \text{ m}) \\
 &\quad + 2 \cdot 0,00071 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 10^{-3} \\
 &= 0,07 \text{ N/mm}.
 \end{aligned}$$

Die Resultierende Last aus dem Eigengewicht des Kassettengurtes und der Außenschale beträgt bei einem üblichen PU-Sandwichelement mit 80 mm Kerndicke

$$\begin{aligned}
 P &= 121 \text{ N/m}^2 \cdot 0,6 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \\
 &\quad + 2 \cdot 0,00071 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot (0,037 + 0,01) \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \\
 &= 7,77 \text{ N}.
 \end{aligned}$$

Folglich ergibt sich an der Einspannstelle die folgende Spannung σ_z infolge M_x .

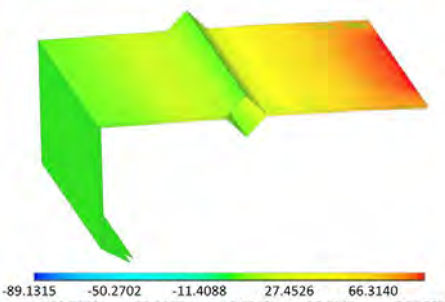
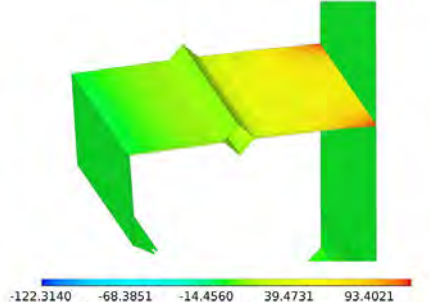
$$\begin{aligned}
 \sigma_z &= M_x / W_x \\
 M_x &= 1,35 \cdot p \cdot l^2 / 2 + 1,35 \cdot P \cdot l \\
 &= 1,35 \cdot 0,07 \cdot 100^2 / 2 + 1,35 \cdot 7,77 \cdot 100 \\
 &= 1521 \text{ Nmm} \\
 W_x &= 2 \cdot b \cdot t_{\text{cor}}^2 / 6 \\
 &= 2 \cdot 100 \cdot 0,71^2 / 6 \\
 &= 16,8 \text{ mm}^3 \\
 \sigma_z &= 1521 / 16,8 \\
 &= 90,5 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Über einen Vergleichsspannungsnachweis lässt sich aus dieser Spannung σ_z die Abminderung der infolge Biegebeanspruchung aus horizontalen Lasten zulässigen Spannung σ_x ableiten. Die angesetzte Vertikallast hat unter den beispielhaft gewählten Randbedingungen eine Abminderung der zulässigen Spannung σ_x im breiten Gurt der Kassettenprofile von 19 % zur Folge.

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_z)} \\ &\leq \text{zul. } \sigma &= & 320 / 1,1 \\ & &= & 291 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_v &= \sqrt{(\sigma_x^2 + 90,5^2 - \sigma_x \cdot (-90,5))} \\ &\leq 291 \text{ N/mm}^2 \\ &\sigma_x^2 + 90,5 \cdot \sigma_x - (291^2 - 90,5^2) \\ &\leq 0 \\ \sigma_x &\leq -90,5/2 + \sqrt{(90,5^2/4 + (291^2 - 90,5^2))} \\ &= 235 \text{ N/mm}^2 \\ &= \text{zul. } \sigma_x \end{aligned}$$

$$\text{zul. } \sigma_x / \text{zul. } \sigma = 235 / 291 = 0,81$$

Für weiterführende Betrachtungen wurde vergleichend eine numerische Analyse durchgeführt. Bei starrer Einspannung des Steges zeigt sich bei gleichen Randbedingungen eine sehr gute Übereinstimmung der Spannungen an der Einspannstelle, siehe Abbildung 4-205. Wird der breite Gurt der Kassettenprofile berücksichtigt, ergibt sich in Feldmitte ein deutlich weiches System. Dies führt zu einer Spannungskonzentration an den Auflagern, siehe Abbildung 4-206. Wird ein größerer Abschnitt der Kassettenprofile betrachtet, verstärkt sich dieser Effekt.

	
<p>Abbildung 4-205: Spannung σ_z infolge Eigengewicht mit starrer Einspannung der Stege [89]</p> <p>Figure 4-205: Stress σ_z resulting from dead load with fixed support of webs [89]</p>	<p>Abbildung 4-206: Spannung σ_z infolge Eigengewicht am 100 mm breiten Kassettenstreifen [89]</p> <p>Figure 4-206: Stress σ_z resulting from dead load for 100 mm liner tray section [89]</p>

Betrachtet man die kombinierte Beanspruchung aus horizontaler und vertikaler Last ohne schubsteife Außenschale zeigt sich, dass die Belastungsrichtung der vertikalen Last einen starken Einfluss auf die Stegneigung hat, siehe Abbildung 4-207.

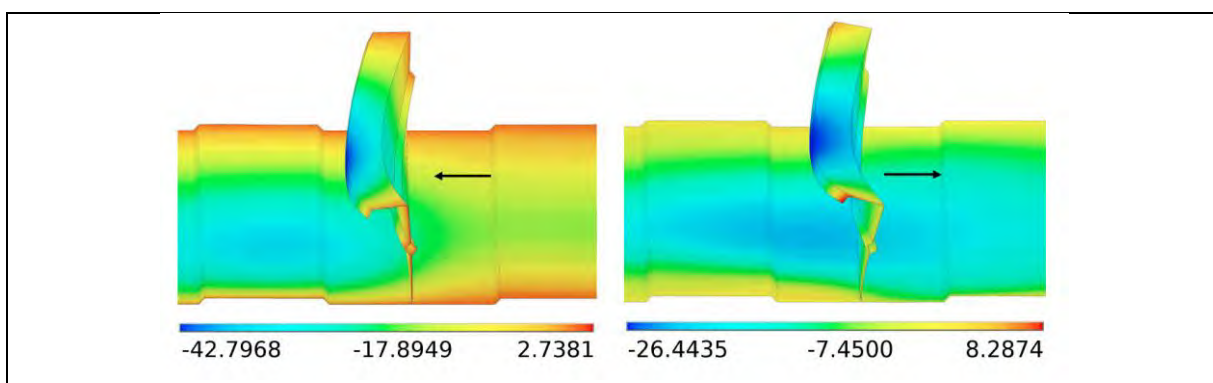


Abbildung 4-207: Einfluss vertikaler Lasten auf die Stegneigung [89]

Figure 4-207: Influence of vertical loads on web inclination [89]

Folglich können vertikale Lasten infolge Eigengewicht einen günstigen oder ungünstigen Einfluss auf die Verformungsfigur bei zusätzlicher horizontaler Biegebeanspruchung haben, siehe folgende Abbildung 4-208.

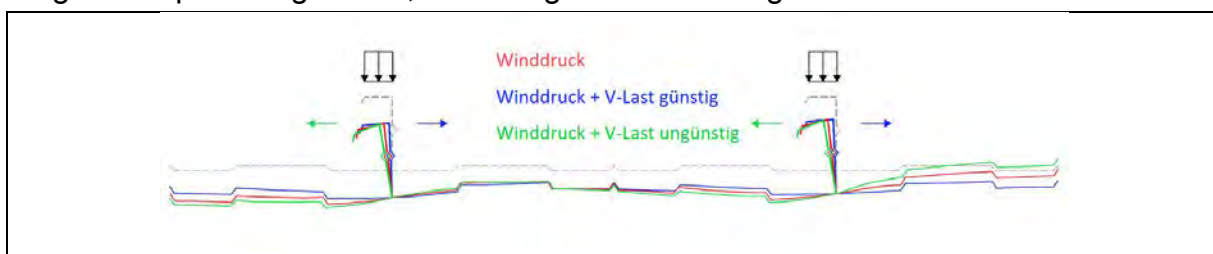


Abbildung 4-208: Einfluss vertikaler Lasten auf die Stegneigung [89]

Figure 4-208: Influence of vertical loads on web inclination [89]

4.3.5.6 Statische Ertüchtigung von Kassettenprofilfassaden Static reinforcement of liner tray façades

4.3.5.6.1 Allgemeines

Preface

Können bestehende Kassettenprofile im Rahmen einer Sanierung mit veränderten Lastannahmen nicht erneut statisch nachgewiesen werden, ist eine statische Ertüchtigung erforderlich. In Hybridfassaden können horizontal verlegte Sandwichelemente die Tragfähigkeit des Fassadensystems erheblich steigern, siehe Kapitel 4.3.5.4.

Alternative Möglichkeiten zur statischen Ertüchtigung von Kassettenprofilfassaden werden in diesem Abschnitt erörtert.

4.3.5.6.2 Zusätzliche Unterkonstruktion

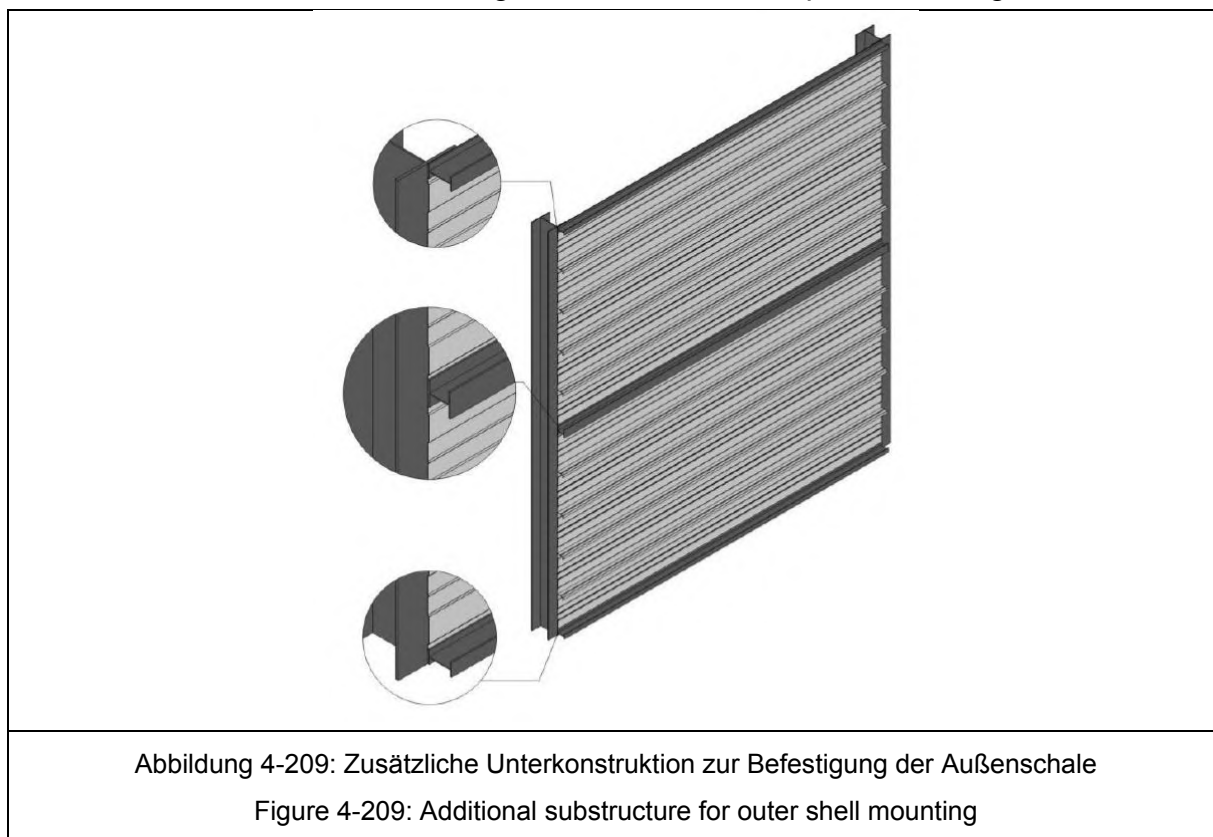
Additional substructure

Bei dieser Variante werden zusätzliche Profile verlegt, an denen die Außenschale befestigt wird. Die Kassettenprofile verbleiben dabei ohne statische Funktion im Wandaufbau. Die zusätzliche Unterkonstruktion sollte horizontal zwischen den Kassettenstegen verlegt werden, um den Montageaufwand möglichst gering zu halten. Bei dieser Variante müssen die vorhandene Dämmung und Teile der Kassettenprofile

gegebenenfalls an einzelnen Stellen entfernt werden, damit die zusätzliche Unterkonstruktion an der primären Tragstruktur befestigt werden kann.

Soll die neue Außenschale aus Sandwichelementen hergestellt werden, wird empfohlen, die Bauhöhe der zusätzlichen Profile derart zu wählen, dass die schmalen Gurte der Kassettenprofile mit zusätzlicher Dämmung überdeckt werden können. Dies verbessert die bauphysikalischen Eigenschaften des neuen Fassadensystems und stellt sicher, dass sich die Sandwichelemente infolge auftretender Temperaturdifferenzen frei verformen können.

Beispielhaft zeigt die folgende Abbildung 4-209 eine horizontale Unterkonstruktion zur Montage von vertikal verlegten Sandwichelementen. Hier können die Sandwichelemente als Zweifeldträger vor den Kassettenprofilen verlegt werden.

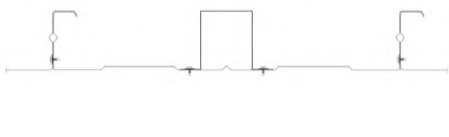
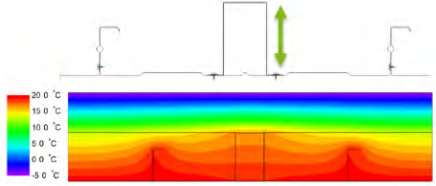


4.3.5.6.3 Ertüchtigung der Kassettenprofile *Reinforcement of liner tray profiles*



Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde auch untersucht, wie Kassettenprofile mit zusätzlichen Stahlleichtbauprofilen statisch ertüchtigt werden können. [88] Dies kann beispielsweise dann sinnvoll sein, wenn der statische Nachweis im Rahmen einer Sanierung nur in einzelnen Fassadenabschnitten (beispielsweise in Randbereichen) nicht erfolgreich geführt werden kann.

Mittig zwischen den Stegen der Kassettenprofile können mit geringem Montageaufwand Omega-, bzw. Hutprofile angeordnet werden, siehe Abbildung 4-210. Die Geometrie der Hutprofile sollte so gewählt werden, dass die Befestigung in den mittleren Tiefsicken der breiten Kassettenurte erfolgen kann. Schließt das Hutprofil bündig mit den schmalen Kassettenurten ab, kann eine Außenschale an den

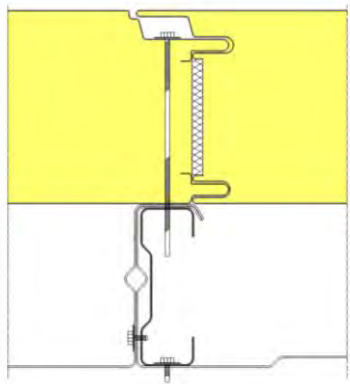
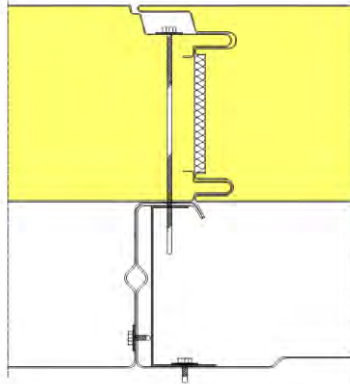
Kassetten- und Hutprofilen befestigt werden. Wird eine größere Bauhöhe gewählt, kann die Befestigung nur an den Hutprofilen erfolgen. Dies erhöht die statischen Anforderungen an die Hutprofile, verbessert jedoch die bauphysikalischen Eigenschaften des Fassadensystems, siehe Abbildung 4-211: Die Anzahl der Wärmebrücken kann reduziert werden.

	
<p>Abbildung 4-210: Hutprofil mittig zwischen den Kassettenstegen angeordnet [88] Figure 4-210: Hat profile disposed between liner tray webs [88]</p>	<p>Abbildung 4-211: Hutprofil mit erhöhter Bauhöhe [88] Figure 4-211: Hat profile with increased height [88]</p>

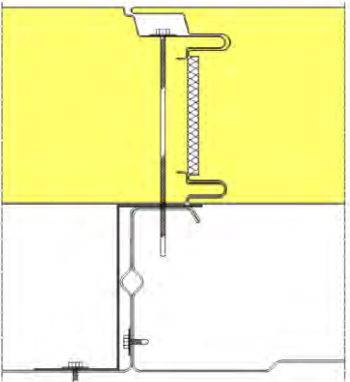
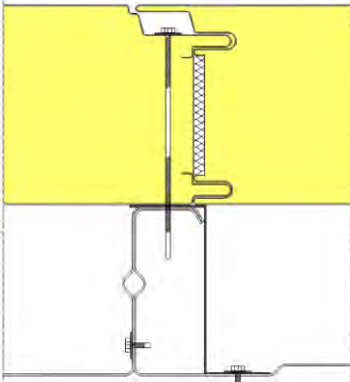
Die symmetrische Anordnung von C-Profilen sollte wegen der gegenüber Hutprofilen erheblich aufwendigeren Montage kritisch hinterfragt werden, siehe Abbildung 4-212. Auch die bauphysikalischen Eigenschaften dieser Variante sind gegenüber anderen Varianten ungünstig. Soll bestehende Dämmung weiterverwendet, bzw. neue Dämmung angeordnet werden, kann dies einfach bei Anordnung von zusätzlichen Z-Profilen erfolgen, siehe Abbildung 4-213. Bei dieser Variante müssen die Dämmplatten nur entlang der Längsachse durchtrennt werden. Ein aufwendigerer Zuschnitt, wie bei Verwendung von Hutprofilen entfällt. Durch die ungünstige Querschnittsform steigt jedoch der Materialverbrauch und es entsteht eine zusätzliche Wärmebrücke.

	
<p>Abbildung 4-212: C-Profile mittig zwischen den Kassettenstegen [88] Figure 4-212: C-Profile disposed between liner tray webs [88]</p>	<p>Abbildung 4-213: Z-Profil mittig zwischen den Kassettenstegen [88] Figure 4-213: Z-Profile disposed between liner tray webs [88]</p>

Werden die Kassettenprofile im Bereich der Stege ertüchtigt, entstehen keine zusätzlichen Montagepunkte für die Außenschale. Beispielhaft zeigt die folgende Abbildung 4-214 eine mit Sigma-Profilen ertüchtigte Kassettenprofilfassade. Hier wurde eine Außenschale aus verdeckt befestigten Sandwichelementen (vertikal verlegt) gewählt. Bei dieser Variante müssen die Sigma-Profile speziell an die jeweils vorhandene Kassettenprofilgeometrie angepasst werden. Auch die Verwendung geometrisch einfacherer Profilformen ist möglich, siehe Abbildung 4-215. Bei dieser Variante werden jedoch höhere Anforderungen an die Ausführungstoleranzen bei der Befestigung der Außenschale gestellt. Auch bei diesen Varianten können übliche Dämmplatten in der Regel ohne weitere Bearbeitung (wieder-) verwendet werden. Bei diesen Varianten müssen die Längsverschraubungen der Kassettenprofile beachtet werden.

	
<p>Abbildung 4-214: C-Profil mittig zwischen den Kassettenstegen [88] Figure 4-214: C-Profile disposed between liner tray webs [88]</p>	<p>Abbildung 4-215: Z-Profil mittig zwischen den Kassettenstegen [88] Figure 4-215: Z-Profile disposed between liner tray webs [88]</p>

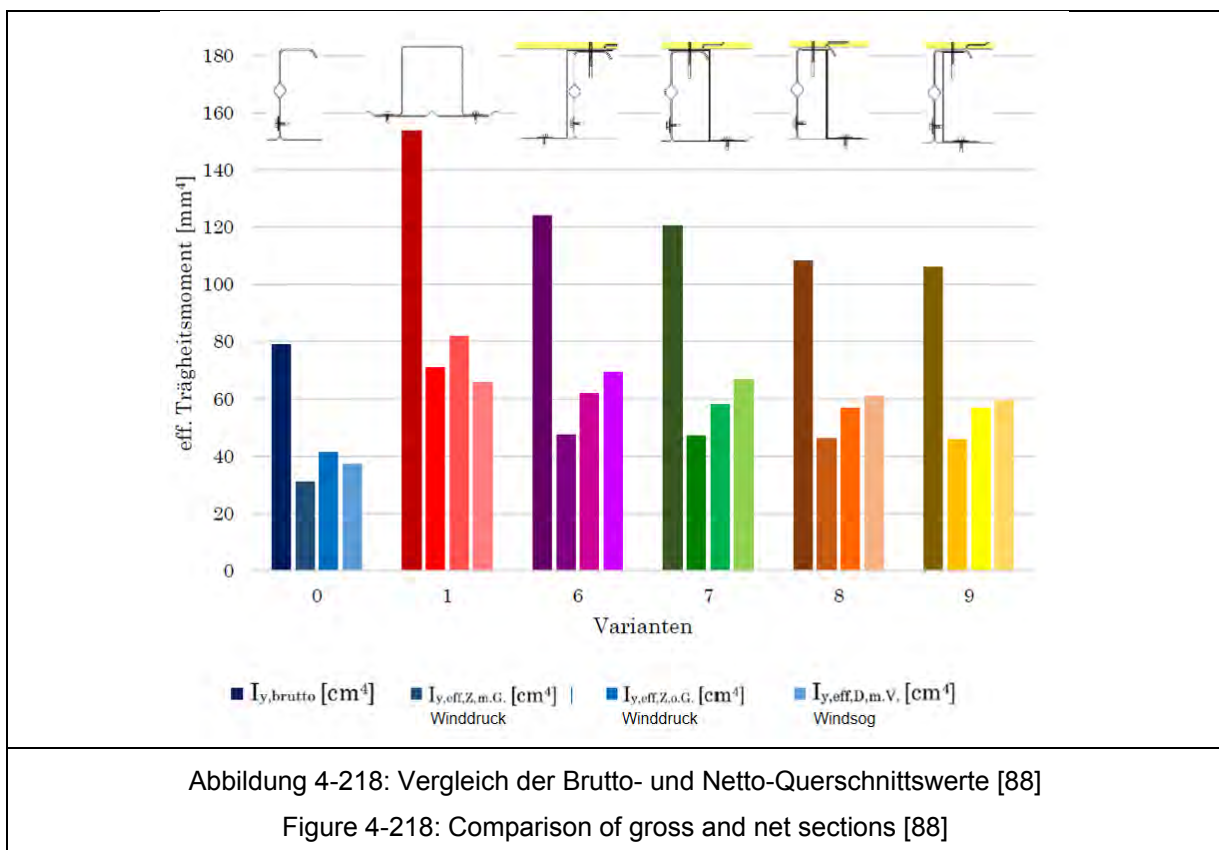
Wird das Ertüchtigungsprofil außerhalb der schmalen Kassettengurte angeordnet, erleichtert dies die Montage und ermöglicht die Verwendung einfacherer Profilgeometrien, siehe Abbildung 4-216 und Abbildung 4-217. Gleichzeitig wird die Bauhöhe um die Blechdicke der Stahlleichtbauprofile erweitert, was bei der Planung der Außenschale berücksichtigt werden muss, wenn nicht alle Kassettenprofile einer Fassade an beiden schmalen Gurten ertüchtigt werden.

	
<p>Abbildung 4-216: Z-Profile außen liegend an den schmalen Gurten angeordnet [88] Figure 4-216: Z-Profile disposed outside of small liner tray flange [88]</p>	<p>Abbildung 4-217: Z-Profile außen liegend an den schmalen Gurten angeordnet [88] Figure 4-217: Z-Profile disposed outside of small liner tray flange [88]</p>

Für eine qualitative Bewertung der Tragfähigkeit der einzelnen Varianten wurden Brutto- und Nettoquerschnittswerte nach Eurocode 3 Teil 1-3 berechnet. Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Kassettenprofil Breite 600 mm, Höhe 120 mm, Blechdicke 0,75 mm
- Ertüchtigungsprofil Geometrie gemäß Zeichnung, Blechdicke 1,00 mm
- Es wird davon ausgegangen, dass die Ertüchtigungsprofile die Kassettenprofile an den verschraubten Berührungspunkten aussteifen.

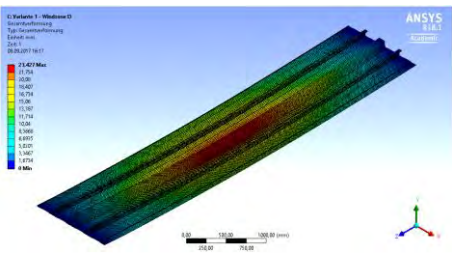
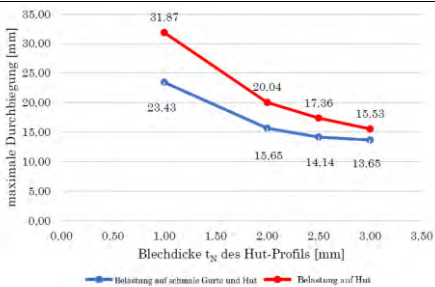
Die Netto-Querschnittswerte bei zugbeanspruchtem breitem Gurt wurden jeweils mit und ohne Berücksichtigung einer möglichen Gurteindrehung der Kassettenprofile berechnet.



Es zeigt sich, dass bei gleicher Blechdicke das Hutprofil für andrückende Lasten die deutlichste Steigerung der Tragfähigkeit bewirkt. Es ist jedoch zu beachten, dass Ertüchtigungen häufig infolge erhöhter Windsoglastannahmen erforderlich sind, vgl. Kapitel 4.1. Hier bewirken Sigma- und Z-Profile im Bereich der schmalen Kassettenurte eine ähnliche Steigerung der Tragfähigkeit wie ein Hutprofil mittig zwischen den Kassettenstegen. Wegen der zuvor genannten konstruktiven Vorteile kann die Ertüchtigung im Bereich der schmalen Kassettenurte also eine gute Alternative zum Hutprofil darstellen.

Hinweis: Die analytische Berechnung der Querschnittstragfähigkeit von Kassettenprofilen nach Eurocode 3 Teil 1-3 führt teilweise zu sehr konservativen Ergebnissen. In der Praxis sollten – falls vorhanden – versuchsgestützte Tragfähigkeitswerte für die Kassettenprofile berücksichtigt werden.

In einer Parameterstudie wurde für Ertüchtigungen mit Hutprofilen numerisch der Einfluss der Blechdicke auf die Verformungen des Gesamtsystems untersucht, siehe Abbildung 4-219 und Abbildung 4-220. Unter beispielhaft gewählten, für eine Sanierung üblichen Randbedingungen ist der Einsatz von Hutprofilen mit Blechdicken zwischen 2,00 und 3,00 mm zu empfehlen. Diese Aussage kann jedoch nicht verallgemeinert werden, Profiltyp und Querschnittsgeometrie sind im Einzelfall unter Berücksichtigung aller Randbedingungen zu wählen.

	 <table border="1"> <caption>Data for Figure 4-220: Parametric study sheet thickness hat profile</caption> <thead> <tr> <th>Blechdicke t_H des Hut-Profiles [mm]</th> <th>Belastung auf schmale Gurte und Hut [mm]</th> <th>Belastung auf Hut [mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.00</td> <td>23.43</td> <td>31.87</td> </tr> <tr> <td>2.00</td> <td>15.65</td> <td>20.04</td> </tr> <tr> <td>2.50</td> <td>14.14</td> <td>17.36</td> </tr> <tr> <td>3.00</td> <td>13.65</td> <td>15.53</td> </tr> </tbody> </table>	Blechdicke t_H des Hut-Profiles [mm]	Belastung auf schmale Gurte und Hut [mm]	Belastung auf Hut [mm]	1.00	23.43	31.87	2.00	15.65	20.04	2.50	14.14	17.36	3.00	13.65	15.53
Blechdicke t_H des Hut-Profiles [mm]	Belastung auf schmale Gurte und Hut [mm]	Belastung auf Hut [mm]														
1.00	23.43	31.87														
2.00	15.65	20.04														
2.50	14.14	17.36														
3.00	13.65	15.53														
<p>Abbildung 4-219: Verformungsfigur Kassettenprofil mit Hutprofil ertüchtigt [88] Figure 4-219: Deformation plot liner tray profile reinforced with hat profile [88]</p>	<p>Abbildung 4-220: Parameterstudie Blechdicke Hutprofil [88] Figure 4-220: Parametric study sheet thickness hat profile [88]</p>															

4.3.5.7 Beispiele für ausgeführte Sanierungen von Stahlleichtbaufassaden Examples for completed refurbishments of lightweight steel construction façades

4.3.5.7.1 Hybridsanierung mit vertikal verlegten Sandwichelementen Hybrid-refurbishment with vertically mounted sandwich panels

Im Rahmen der energetischen Sanierung eines Mehrzweckhallenkomplexes wurden die vorhandenen Kassettenprofilfassaden mit Sandwichelementen erweitert.

Die Kassettenprofile der Bestandsfassade haben eine Bauhöhe von ca. 80 mm. Sie wurden mit Setzbolzen direkt an der primären Tragstruktur befestigt, siehe Abbildung 4-221. Die vertikal verlegte Trapezprofil-Außenschale wurde nicht direkt, sondern 40 mm vor den schmalen Kassettenurten befestigt. Dazu wurden vor den Gurten Dämmstreifen aus Mineralwolle mit hoher Rohdichte angeordnet, siehe Abbildung 4-222. Die Zwischenräume wurden mit weicher Mineralwolle ausgedämmt. Abbildung 4-223 zeigt einen Fassadenabschnitt vor der Sanierung (rechts) und nach Demontage der Trapez-Außenschale (links).



	
<p>Abbildung 4-221: Befestigung der Kassettenprofile Figure 4-221: Mounting of liner trays</p>	<p>Abbildung 4-222: Unterschiedliche Mineralwollämmung Figure 4-222: Different mineral wool insulation</p>



Abbildung 4-223: Fassadenabschnitt vor (rechts) und nach (links) Demontage der Trapez-
Außenschale

Figure 4-223: Detail of façade before (right) and after (left) disassembly of trapezoidal outer shell

Nach vollständigem Rückbau der Trapezprofil-Außenschale wurden PU-Sandwichelemente mit einer Kerndicke von 60 mm montiert. Die Sandwichelemente wurden vertikal ohne Querstoß verlegt und nicht sichtbar in ihren Längsfugen an den Kassettengurten sowie im Sockel- und Attikabereich befestigt, siehe folgende Abbildungen.




Abbildung 4-224: Vertikale Verlegung der Sandwichelemente
Figure 4-224: Vertical installation of sandwich panels



Abbildung 4-225: Befestigung an den
Kassettenprofilen
Figure 4-225: Fixation at liner tray profiles

Abbildung 4-226: Befestigung an den
Kassettenprofilen
Figure 4-226: Fixation at liner tray profiles

	
<p>Abbildung 4-227: Befestigung im Sockelbereich Figure 4-227: Fixation at plinth</p>	<p>Abbildung 4-228: Befestigung im Sockelbereich Figure 4-228: Fixation at plinth</p>

Die folgenden Abbildung 4-229 und Abbildung 4-230 zeigen den Hallenkomplex vor- und nach der Sanierung. Durch die neue Sandwichelement-Außenschale konnten die bauphysikalischen Eigenschaften erheblich verbessert werden. Gleichzeitig wurde das optische Erscheinungsbild erheblich aufgewertet.

Wichtiger Hinweis: Eine Hybridsanierung mit vertikal verlegten Sandwichelementen sollte nicht durchgeführt werden, ohne die in den vorangegangenen Kapiteln erörterten statischen Aspekte zu berücksichtigen.

	
<p>Abbildung 4-229: Fassade vor (rechts) und nach der Sanierung (links) Figure 4-229: Façade before (right) and after refurbishment (left)</p>	<p>Abbildung 4-230: Hallenkomplex nach der Sanierung Figure 4-230: Hall complex after refurbishment</p>

4.3.5.7.2 Sanierung einer Kassettenprofilfassade ohne vollständigen Rückbau der Außenschale Refurbishment of a liner tray façade without completely dismantling the outer shell

Bei dem vorliegenden Gebäude handelt es sich um ein Umschlaglager für gekühlte Waren in einem Temperaturbereich von + 2 °C bis + 4 °C. Das Umschlaglager hat circa 2.000 m² Lagerfläche und 660 m² Bürofläche. Es können gleichzeitig bis zu 23 LKW be- und entladen werden. Das Gebäude wurde zunächst zwischen 2006 und 2008 für die Lagerung nicht gekühlter Waren genutzt und anschließend, nach vier Jahren Leerstand bis 2012, an die neue Nutzung angepasst und energetisch saniert. Dazu wurde die Bestandskälteanlage abgebaut, generalüberholt und neu montiert. Zusätzlich wurde ein neuer Trafo für die erforderliche elektrische Energie installiert. Die Kosten der Sanierung ohne Elektro- und Kältetechnik betragen 230.000,- € netto.

Die folgenden Abbildung 4-231 und Abbildung 4-232 zeigen das Umschlaglager zu Beginn der Sanierung mit der ursprünglichen Fassade, einer 130 mm Kassettenprofilfassade mit vertikal verlegter 35 mm Trapezprofil-Außenschale.

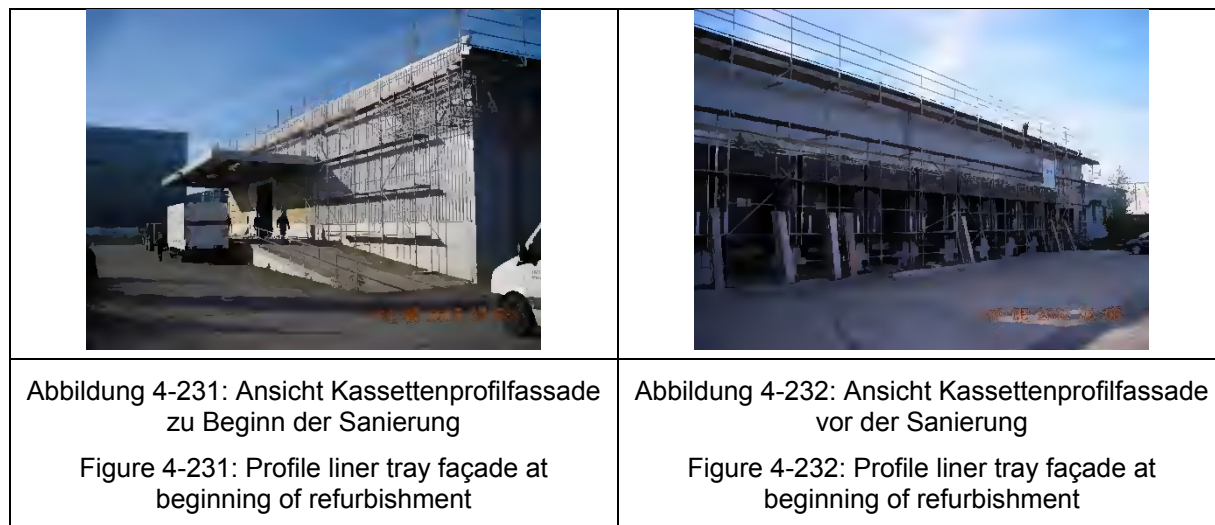


Abbildung 4-231: Ansicht Kassettenprofilfassade zu Beginn der Sanierung

Figure 4-231: Profile liner tray façade at beginning of refurbishment

Abbildung 4-232: Ansicht Kassettenprofilfassade vor der Sanierung

Figure 4-232: Profile liner tray façade at beginning of refurbishment

Bei diesem Gebäude wurde die Fassade ohne Rückbau der Bestandskonstruktion an die neue Nutzung angepasst und energetisch saniert. Dazu wurden vor der bestehenden Trapezprofil-Außenschale zusätzliche, vertikal verlegte Sandwichelemente montiert. Es wurden stark profilierte Sandwichelemente verwendet, was die großen Spannweiten ermöglicht. Folglich musste die bestehende Fassade jeweils nur einmal im Sockel- und Traufbereich mit einer Unterkonstruktion aus horizontal verlegten C-Profilen durchdrungen werden, siehe folgende Abbildungen. Gleichzeitig bleibt durch die Wahl einer den Trapezprofilen ähnlichen Profilierung das optische Erscheinungsbild nahezu unverändert. Die bestehende Kassettenprofilfassade dient im neuen Wandaufbau nur als zusätzliche Dämmung ohne tragende Funktion.

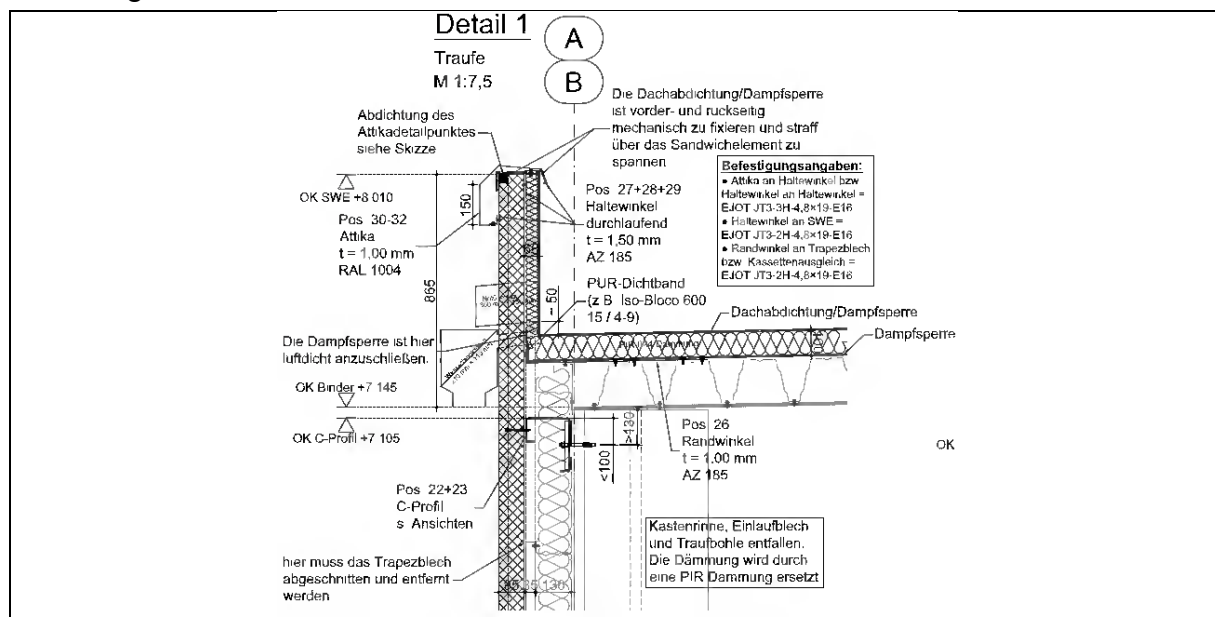


Abbildung 4-233: Konstruktionsdetail Traufpunkt

Figure 4-233: Construction detail eave

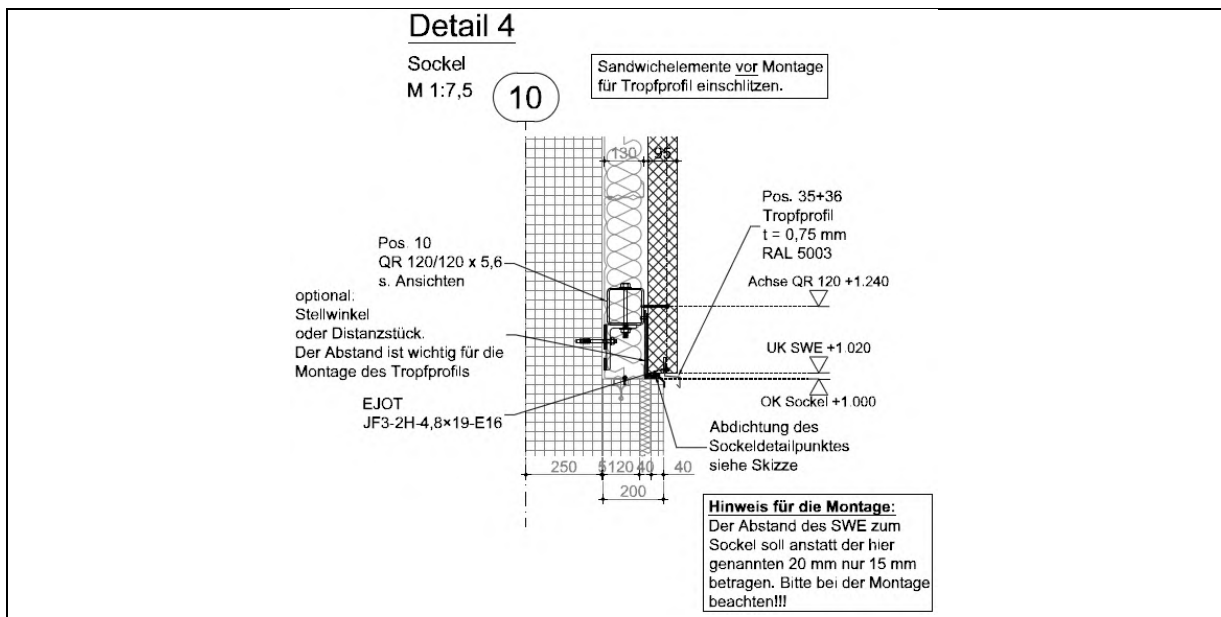


Abbildung 4-234: Konstruktionsdetail Sockel

Figure 4-234: Construction detail plinth



Abbildung 4-235: Montage der
 Sandwichelemente

Figure 4-235: Mounting of sandwich
 panels

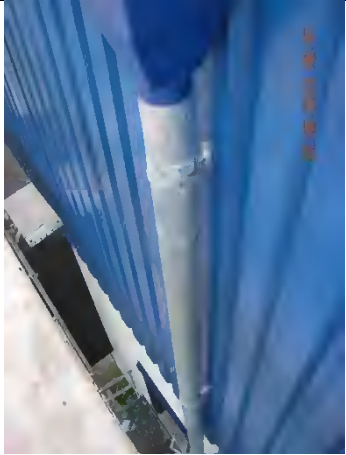



Abbildung 4-236: Detailansicht Unterkonstruktion im
 Traufbereich zur Montage der Sandwichelemente

Figure 4-236: Detail eave substructure for mounting
 sandwich panels

Der Vorteil dieser Sanierungsvariante liegt in der, gegenüber einem vollständigen Austausch der Fassade, einfachen Bauausführung. Nutzungsausfälle und hohe Rückbaukosten für Demontage und Entsorgung entfallen. Da die Kassettenprofilfassade ohne statische Funktion verbleibt ist eine einfache Bemessung der Sandwichelemente und der zugehörigen Unterkonstruktion möglich. Die verbleibende Luftschicht im Wandaufbau zwischen Sandwichelement und Trapezprofil-Außenschale der Kassettenfassade bedarf einer gesonderten bauphysikalischen Betrachtung. Die folgenden Abbildung 4-237 und Abbildung 4-238 zeigen eine

Detailansicht der neuen Entwässerung und das Dach nach der Sanierung. Hier wurde eine 100 mm PIR-Dämmung verwendet.

	
<p>Abbildung 4-237: Detail Dachentwässerung Figure 4-237: Detail roof drainage</p>	<p>Abbildung 4-238: Dach nach der Sanierung Figure 4-238: Roof after refurbishment</p>

4.4 Sanierung von massiven Fassaden Refurbishment of solid construction façades

4.4.1 Allgemeines Preface

Als massiven Fassaden werden in diesem Forschungsbericht bestehende Fassaden aus Mauerwerk und Stahlbeton verstanden. Es wird zwischen ein- und zweischaligen massiven Fassaden unterschieden.

Einschalige massive Fassaden können aus statischer Sicht in der Regel unproblematisch mit Stahlleichtbau-Systemen saniert werden. Die erforderlichen Grundlagen und mögliche Sanierungsvarianten werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Grundsätzlich können Stahlleichtbau-Sanierungssysteme auch an, beziehungsweise vor, der Außenschale einer zweischaligen massiven Fassade befestigt werden, wenn diese ausreichend tragfähig ist. Hierbei ist zunächst die Sinnhaftigkeit aus architektonischer, bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Sicht zu bewerten.

4.4.2 Statische Untersuchungen Static investigations

4.4.2.1 *Veränderte Lastannahmen* *Changed load assumptions*

Auch bei der Sanierung von massiven Fassaden müssen unmittelbar von der Änderung berührte Bauteile mit aktuellen Lastannahmen erneut statisch nachgewiesen werden, vgl. Kapitel 2.3.2. Hierbei müssen häufig in den Eckbereichen der Gebäude deutlich erhöhte Windsoglasten berücksichtigt werden. Auch in anderen Bereichen kann der statische Nachweis der Bestandsbauteile mit erhöhten Lastannahmen erforderlich sein. Mit den in Kapitel 4.1 vorgestellten Arbeitshilfen (Diagramme und

Berechnungsverfahren) kann die Änderung der Lastannahmen einfach bestimmt werden.

4.4.2.2 Lasteinleitung in die Bestandsfassade
Load transfer into stock façade

Auf Grund des im Verhältnis zu den Windlasten hohen Eigengewichts massiver Fassaden können die globalen Tragfähigkeitsnachweise unmittelbar von der Änderung berührter Bauteile auch mit den erhöhten Windlastannahmen in der Regel erfüllt werden.

Die lokale Lasteinleitung abhebender Lasten am Übergang zwischen Stahlleichtbau-Sanierungssystem und Bestandsfassade muss dagegen sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Abhängig vom Untergrund müssen Art der Befestigungsmittel und Abstand der Befestigungsmittel untereinander gewählt werden. Beispielhaft zeigt die folgende Tabelle 4-66 qualitativ die Auszugtragfähigkeiten üblicher Kunststoffdübel in unterschiedlichen Untergründen massiver Bauweise.

Tabelle 4-66: Auszugtragfähigkeit üblicher Kunststoffdübel
 Table 4-66: Extraction load capacity of usual plastic anchors

Untergrund	Auszugfestigkeit
Stahlbeton	sehr hoch
Vollsteine mit dichtem Gefüge (Ziegel, Klinker, Kalksandstein)	hoch
natürliche Steine	keine pauschale Aussage möglich
Vollsteine mit porigem Gefüge (Porenbeton, Gasbeton, Leichtbeton)	gering
Lochsteine mit porigem Gefüge (Hohlblocksteine, Hochlochziegel)	gering / sehr gering

Bei einigen Untergründen, wie beispielsweise Porenbeton oder Hohlsteinen müssen Spezialdübel oder chemische Injektionsmörtel verwendet werden. Befestigungsmittel werden herstellerepezifisch bauaufsichtlich zugelassen. Die einzelnen Hersteller stellen umfangreiche Planungshilfen (Bücher, Tabellenwerke, Software) bereit, sodass auf einzelne Produkte an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Grundsätzlich wird bei der Befestigung zusätzlicher Bauteile an massiven Untergründen eine genaue Bestandsaufnahme empfohlen, da sich massive Untergründe auch innerhalb einzelner Bauweisen in ihrer Beschaffenheit deutlich unterscheiden können. Bei Fassaden mit natürlichen Steinen sind Auszugversuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit zwingend erforderlich.

4.4.2.3 Maßtoleranzen
Dimensional tolerances

Stahlleichtbausysteme werden mit hoher Präzision gefertigt und haben hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit ihrer Unterkonstruktion, siehe Kapitel 4.2.3.

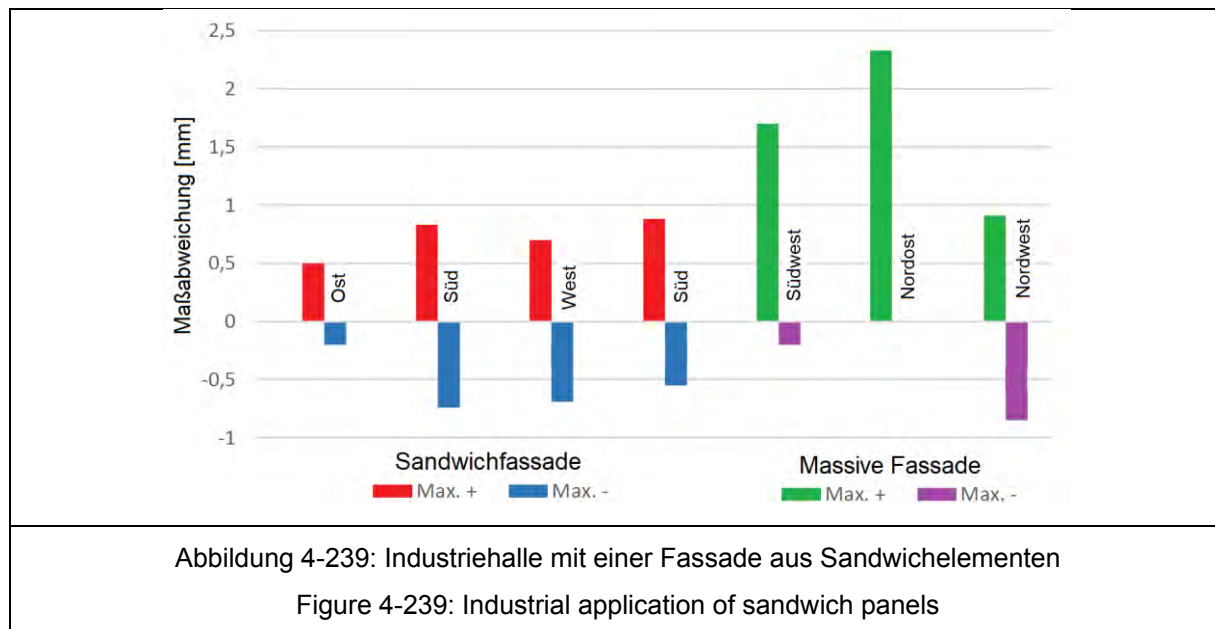
Die massiven Fassaden energetisch sanierungsbedürftiger Gebäude haben demgegenüber häufig große Maß-, Ebenheits-, und Winkelabweichungen. Hierfür können zwei Gründe genannt werden:

- Toleranzen haben im Massivbau (im üblichen Rahmen) keinen Einfluss auf das Tragverhalten und die bauphysikalische Funktion.
- Im Industriebau werden häufig nur geringe Anforderungen an das optische Erscheinungsbild gestellt.

Erläuterungen: In Kapitel 4.2.2 wurde beispielhaft gezeigt, wie Toleranzen im Stahlleichtbau Fugen öffnen und Tragfähigkeiten herabsetzen können. Die Fugen im Massivbau werden in der Regel vor Ort ausgeführt, sind in Ihrer Montage aufwendiger, können aber größere Toleranzen aufnehmen. Dünnwandige Stahlbauteile sind extrem wirtschaftlich, ressourcenschonend und recycelbar, dafür jedoch anfällig für lokale Stabilitätsprobleme wie Beulen oder Knittern. Diese Versagensformen treten bei massiven Werkstoffen nicht auf.

Normative Anforderungen an Toleranzen im Massivbau wurden erst in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts gestellt, siehe Kapitel 4.2.4. Auch diese Anforderungen werden zumindest heute an einigen Beispielgebäuden nicht mehr eingehalten. Dies konnte in Kapitel 4.2.6.2 gezeigt werden.

In der folgenden Abbildung 4-239 werden die Maßabweichungen der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vermessenen Beispielgebäude (siehe Kapitel 4.2.6) dargestellt. Diese stichprobenhafte Erhebung belegt zumindest die Erwartung, dass an massiven Fassaden höhere Toleranzen auftreten.



Unterschiedliche massive Bauweisen weisen Bauartbedingt unterschiedliche Toleranzen auf. Die folgende Tabelle 4-67 gibt einen Überblick über zu erwartende Toleranzen massiver Fassaden.

Grundsätzliche sollte bei energetischen Sanierungen massiver Fassaden in Stahlleichtbauweise eine genaue Bestandsaufnahme der vorhandenen Toleranzen erfolgen. Vorhandene Toleranzen müssen im Bedarfsfall durch geeignete (Unter-) Konstruktionen ausgeglichen werden.

Tabelle 4-67: Zu erwartende Toleranzen massiver Fassaden

Table 4-67: Expected tolerances on solid façades

Untergrund Fassade	Zu erwartende Toleranzen
Sichtmauerwerk	abhängig von der Ausführungsvariante und -qualität gering bis sehr hoch
Mauerwerk verputzt	sehr gering bis hoch
Betonfertigteile	geringe bis mittlere Ebenheitsabweichungen innerhalb der Fertigteile, mittlere bis hohe Schiefstellung möglich, an den Fugen kann es zu Versätzen kommen

4.4.3 Vergleich möglicher Ausführungsvarianten Comparison of possible construction variants

4.4.3.1 Sanierung mit Trapez- und Wellprofilen Renovation with trapezoidal and corrugated sheets

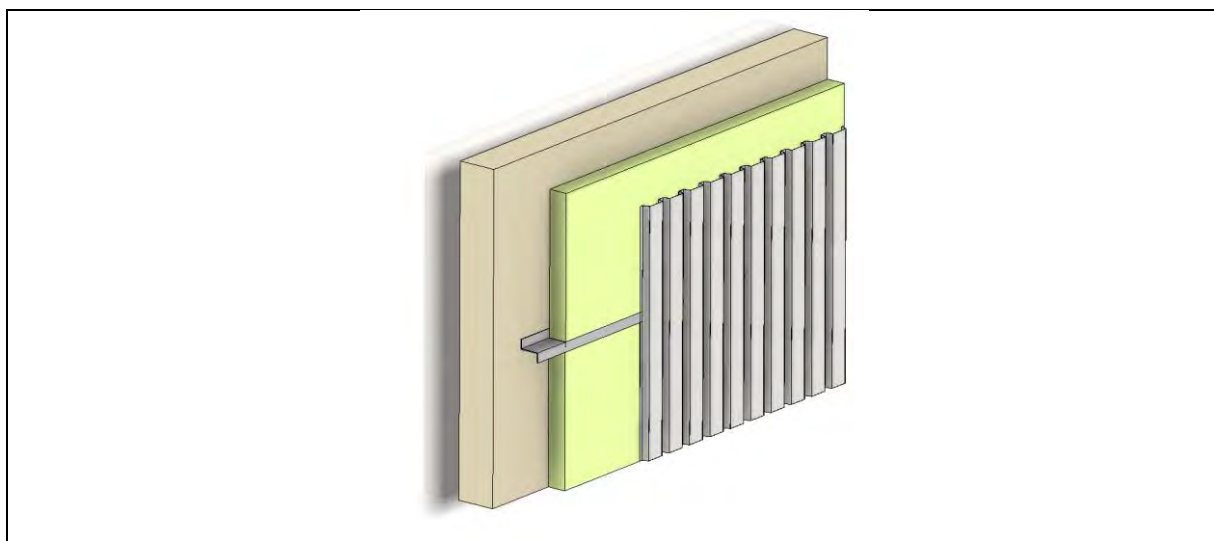


Abbildung 4-240: Sanierung einer massiven Fassade mit Trapezprofilen

Figure 4-240: Solid façade renovation with trapezoidal profile

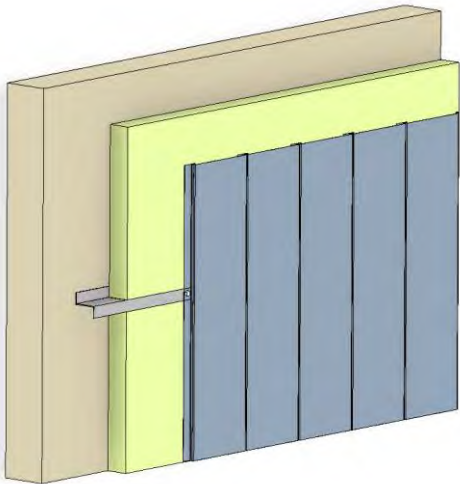
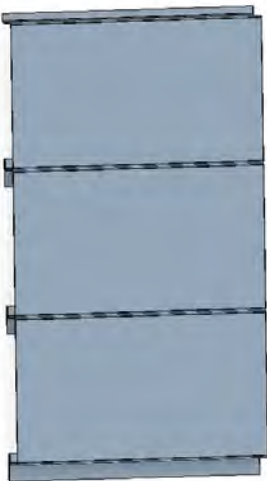
Bei der Sanierung massiver Fassaden mit Trapez- und Wellprofilen sind quer zur Spannrichtung der Profile verlaufende Linienlager erforderlich. Wesentliche Vor- und Nachteile dieser Ausführungsvariante sind in der folgenden Tabelle 4-68 dargestellt.

Tabelle 4-68: Vor- und Nachteile einer Sanierung mit Trapez- und Wellprofilen

Table 4-68: Pros and cons of Renovation with trapezoidal and corrugated sheets

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Modularer Aufbau erlaubt einfache Erweiterung, Rückbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmebrücke bei klassischer Befestigung
<ul style="list-style-type: none"> • Dämmung kann variabel eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausschließlich linienförmiges Erscheinungsbild der Fassade
<ul style="list-style-type: none"> • Brandschutzeigenschaften bei Verwendung von Mineralwoll-Dämmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtbare Befestigung

4.4.3.2 Sanierung mit gestalterisch optimierten Fassadenprofilen
Renovation with visually optimized façade profiles

	
<p>Abbildung 4-241: Sanierung einer massiven Fassade mit Fassadenprofilen Figure 4-241: Solid façade renovation with cladding profiles</p>	<p>Abbildung 4-242: Fassadenprofile Figure 4-242: Cladding profiles</p>

Die wesentlichen Vor- und Nachteile von gestalterisch optimierten Fassadenprofilen sind in der folgenden Tabelle 4-69 dargestellt.

Tabelle 4-69: Vor- und Nachteile einer Sanierung mit gestalterisch optimierten Fassadenprofilen
 Table 4-69: Pros and cons of Renovation with visually optimized façade profiles

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Optisch ansprechenderes Erscheinungsbild, u. A. durch nicht sichtbare Befestigung mit hersteller-spezifischen Systemlösungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Fertigungs- und Montageaufwand
<ul style="list-style-type: none"> • Wärmebrückenreduzierte Befestigung möglich 	
<ul style="list-style-type: none"> • Modularer Aufbau erlaubt einfache Erweiterung, einfachen Rückbau und einfaches Recycling der Baustoffe 	
<ul style="list-style-type: none"> • Dämmung kann variabel eingesetzt werden 	
<ul style="list-style-type: none"> • Brandschutzeigenschaften bei Verwendung von Mineralwoll-Dämmung 	

4.4.3.3 Sanierung mit modularen VHF-Systemen Renovation with modular rear-ventilated façades

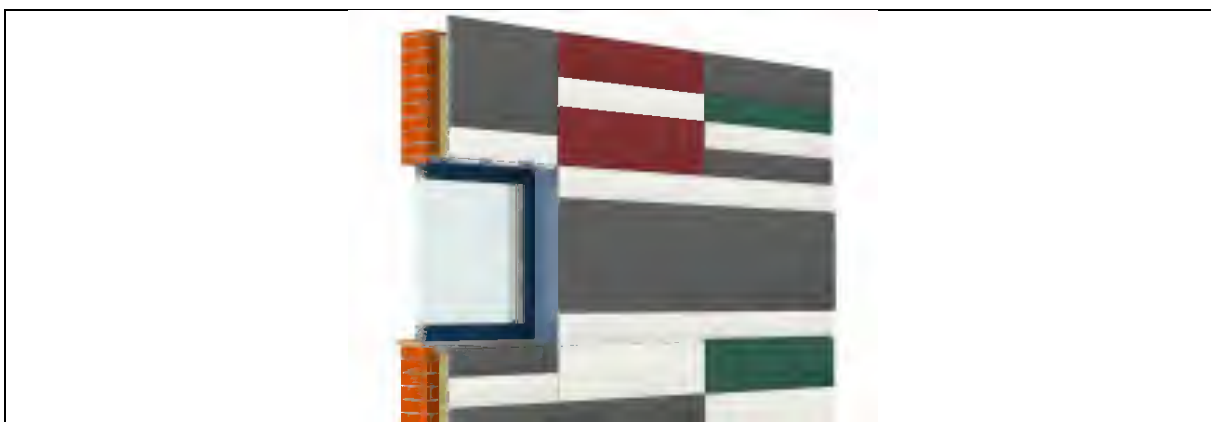


Abbildung 4-243: Produktbeispiel VHF-System [96]

Figure 4-243: Product sample rear-ventilated façade [96]

Die wesentlichen Vor- und Nachteile von modularen VHF-Systemen sind in der folgenden Tabelle 4-70 dargestellt.

Tabelle 4-70: Vor- und Nachteile einer Sanierung mit modularen VHF-Systemen

Table 4-70: Pros and cons of Renovation with modular rear-ventilated façades

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Optisch hochwertiges Erscheinungsbild 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Fertigungs- und Montageaufwand
<ul style="list-style-type: none"> • Integration von Fenster- und Türöffnungen 	
<ul style="list-style-type: none"> • Wärmebrückenfreie Befestigung mit Befestigern aus technischen Kunststoffen möglich 	
<ul style="list-style-type: none"> • Modularer Aufbau erlaubt einfache Erweiterung, einfachen Rückbau und einfaches Recycling der Baustoffe 	
<ul style="list-style-type: none"> • Dämmung kann variabel eingesetzt werden 	
<ul style="list-style-type: none"> • Brandschutzeigenschaften bei Verwendung von Mineralwoll-Dämmung 	

4.4.3.4 Sanierung mit Sandwichelementen Renovation with sandwich panels

Massive Fassaden können auch mit üblichen, kontinuierlich gefertigten Sandwichelementen energetisch saniert werden. Die wesentlichen Vorteile dieser Variante sind die geringe Bauzeit und die Möglichkeit der einheitlichen Gestaltung unterschiedlicher Bauabschnitte. Es wird empfohlen, die Sandwichprofile zum Ausgleich von vorhandenen Toleranzen an einer Zwischenebene aus Hut- oder Z-Profilen zu befestigen. Dabei sollten die Profile abhängig von den Toleranzen der Bestandsfassade eine Höhe von mindestens 30 bis 40 mm aufweisen, um die

Bohrspitzen üblicher Sandwichbefestiger aufnehmen zu können. Die folgende Abbildung 4-244 zeigt schematisch diese Sanierungsvariante.

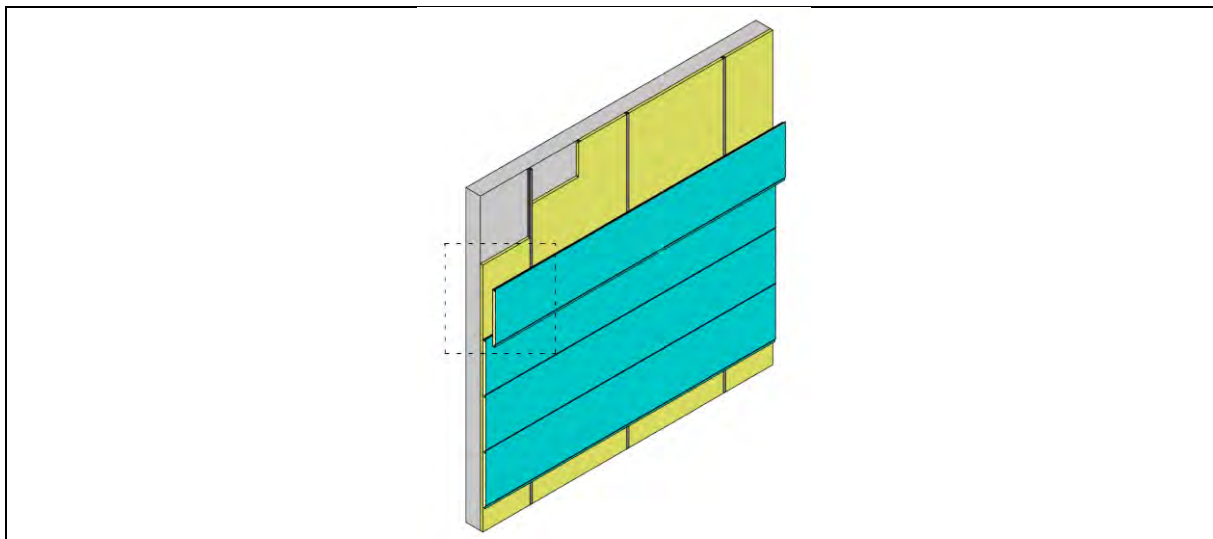


Abbildung 4-244: Sanierung einer massiven Fassade mit Sandwichelementen

Figure 4-244: Solid façade renovation with sandwich panels

Der Zwischenraum zwischen massiver Bestandsfassade und Sandwichelement sollte aus bauphysikalischen Gründen gedämmt werden. Dabei sollte die Dämmung ausreichend nachgiebig sein, um infolge Temperaturdifferenz am Sandwichelement auftretende Verformungen nicht zu behindern. Empfohlen wird ein Zwischenraum von 40 mm.

Die Sandwichelemente können aus bauphysikalischen Gesichtspunkten dimensioniert werden, die Profile in der Zwischenebene müssen den statischen Anforderungen genügen. Dazu können der Abstand der Profile untereinander und der Abstand der Befestigungspunkte angepasst werden. Zur Lasteinleitung in die Bestandsfassade wird auf Kapitel 4.4.2.2 verwiesen. Zusätzlich müssen die in den bauaufsichtlichen Zulassungen der Sandwichelemente geforderten Mindestauflagerbreiten eingehalten werden und geeignete konstruktive Lösungen zum Abtrag vertikaler Lasten infolge Eigengewicht gewählt werden.

4.4.4 Beispiel: Energetische Sanierung einer massiven Fassade **Example: Energy-oriented refurbishment of a solid façade**

Im Rahmen der Sanierung eines Mehrzweckstahlhallenkomplexes wurden auch die Bauabschnitte mit massiven Fassaden energetisch saniert. Dazu wurden vor dem bestehenden Klinkermauerwerk Sandwichelemente an einer Unterkonstruktion aus Hutprofilen verlegt.

Die folgende Abbildung 4-245 und Abbildung 4-246 zeigen die Montage der Hutprofile. Hier konnte auf Grund der hohen Ausführungsqualität des bestehenden Mauerwerks auf weitere Maßnahmen zum Ausgleich von Toleranzen verzichtet werden. Klinker-Vollsteine eignen sich ausreichend für eine punktuelle Verankerung.



Abbildung 4-245: Montage Hutprofile
Figure 4-245: Hat profile assembly



Abbildung 4-246: Montage Sandwichelement an
Hutprofil
Figure 4-246: Sandwich panel assembly

Die Hutprofile wurden horizontal verlegt, folglich wurden die Sandwichelemente vertikal verlegt. Die folgende Abbildung 4-247 zeigt die massive Fassade nach Montage der Sandwichelemente.

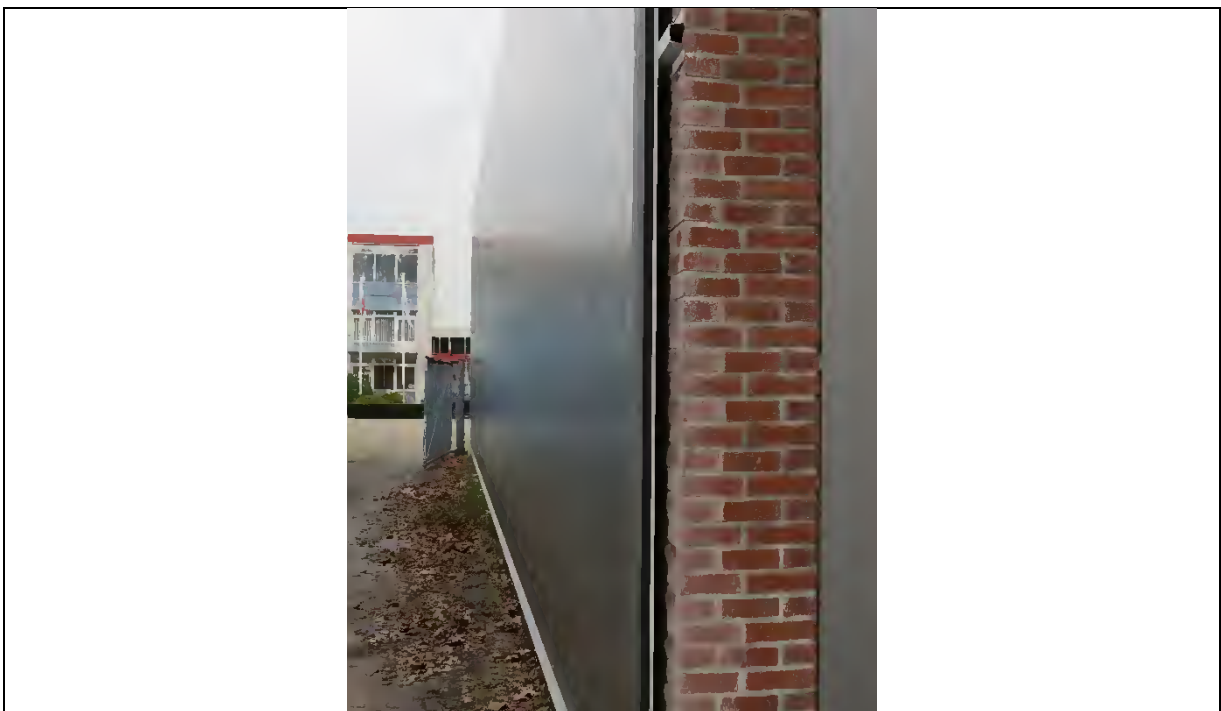


Abbildung 4-247: Massive Fassade nach Montage der Sandwichelemente
Figure 4-247: Solid façade after renovation with sandwich panels

Aus statischer Sicht können derartige Sanierungen unbedenklich ausgeführt werden, solange die in Kapitel 4.4.3.4 genannten Punkte beachtet werden. Aus bauphysikalischer Sicht sollte der Zwischenraum zwischen Bestandsfassade und Sandwichelement gedämmt werden. Die Kerndicke der Sandwichelemente kann aus bauphysikalischen Gesichtspunkten gewählt werden.

4.4.5 Zusammenfassung Summary

Massive Fassaden können in der Regel aus statischer Sicht unbedenklich in Stahlleichtbauweise saniert werden. Auf Grund des im Verhältnis zu den zusätzlich einwirkenden Lasten hohen Eigengewichts der Bestandsfassaden können die globalen Tragfähigkeitsnachweise erbracht werden. Die lokale Lasteinleitung in die Bestandsfassade muss abhängig vom Untergrund sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Bei der Nachweisführung müssen veränderte Lastannahmen berücksichtigt werden. Bei massiven Fassaden können große Toleranzen auftreten. Im Bestand muss auch mit Toleranzen außerhalb der zulässigen Werte gerechnet werden. Grundsätzlich wird zur Planung energetischer Sanierungen eine umfangreiche Bestandsaufnahme empfohlen.

4.5 Sanierung von Dächern Roof refurbishment

4.5.1 Allgemeines Preface

Für eine ganzheitlich energetische Sanierung der Gebäudehülle muss neben der Fassade auch das Dach betrachtet werden. Auf die Wahl geeigneter Sanierungskonzepte haben unterschiedliche Faktoren, beispielsweise bauphysikalische wie Schall-, Brand- und Wärmeschutz oder ökonomische wie Kosten und mögliche Förderprogramme Einfluss. Auf die aus statischer Sicht relevanten Einflussfaktoren bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden in Stahlleichtbauweise wird in diesem Abschnitt näher eingegangen.

4.5.2 Veränderte Lastannahmen Changed load assumptions

Auch bei der Sanierung von Dächern müssen unmittelbar von der Änderung berührte Bauteile mit aktuellen Lastannahmen erneut statisch nachgewiesen werden, vgl. Kapitel 2.3.2. Dies betrifft bei der Sanierung von Dächern neben den Windlasten auch Schneelasten.

Die normativen Vorgaben der Windlastannahmen für Dächer wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte teilweise stark verändert. Dabei wurde bei den im Nichtwohnungsbau üblichen Dächern mit geringer Dachneigung der anzusetzende Windsog in den Randbereichen und Gebäudeecken teilweise derart erhöht, dass der statische Nachweis der Bestandsbauteile ohne statische Ertüchtigung nicht mehr möglich ist. Dies kann in Einzelfällen auch in anderen Bereichen des Daches zutreffen. Mit den in Kapitel 4.1 vorgestellten Arbeitshilfen (Diagramme und Berechnungsverfahren) kann die Änderung der Windlastannahmen für Dächer in Abhängigkeit von Gebäudealter, -standort und -geometrie nun einfach bestimmt werden.

Auch die normativen Vorgaben der Schneelastannahmen wurden in den letzten Jahrzehnten teilweise stark verändert. Auch hier können erhöhte Lastannahmen dazu

führen, dass der statische Nachweis der Bestandskonstruktionen ohne zusätzliche statische Ertüchtigung nicht mehr möglich ist. Gleichzeitig können reduzierte Schneelastannahmen die erforderlichen Tragreserven für zusätzliche Dämmung bereitstellen. Beides kann mit den in Kapitel 4.1 vorgestellten Arbeitshilfen nun einfach ermittelt werden.

4.5.3 Bestandsaufnahme aus statischer Sicht sanierungsfähiger Dachtypen **Inventory of roof types being capable for renovation from a static viewpoint**

4.5.3.1 Flachdächer in massiver Bauweise **Solid Flat roofs**

Flachdächer in massiver Bauweise haben in der Regel eine Stahlbeton-Tragschicht. Auf dieser Tragschicht befindet sich der bauphysikalisch erforderliche Dachaufbau:

- Bituminöse (Vor-) Anstriche
- Dampfsperren
- Dämmschichten
- Abdichtungsschichten

Im Bestand weit verbreitet sind zusätzliche Kiesschichten oberhalb der Abdichtungsschichten, um diese vor Sonnenstrahlung und zu starker Austrocknung zu schützen. Bei einer Sanierung kann der Rückbau dieser Kiesaufschüttung zusätzliche Tragreserven bereitstellen.

In der Regel bleibt bei der Sanierung von massiven Flachdächern die Stahlbeton-Tragschicht erhalten, da diese noch funktionsfähig ist und nur mit großem Aufwand zurückgebaut werden kann. Eventuell vorhandene Dämmschichten können ausgetauscht oder ergänzt werden.

Massive Flachdächer stellen keine zusätzlichen statischen Anforderungen an eine mögliche Dachhaut. Diese kann flächig oder in geringem Abstand aufgelagert werden und muss nicht zur Gebäudeaussteifung beitragen.

Betonflachdächer werden häufig durch einfache Ergänzung zusätzlicher Dämmung saniert. Alternativ kann auch eine optisch ansprechendere Dachhaut in Stahlleichtbauweise ergänzt werden. Durch Aufständern einer an der Massivkonstruktion verankerten Stahlleichtbau-Tragstruktur kann dazu einfach und kostengünstig die Dachform angepasst werden. Diese Ausführungsvariante ist aus statischer Sicht unbedenklich, wenn die zusätzlichen Lasten von der Bestandskonstruktion aufgenommen werden können. Dabei muss Kapitel 4.5.2 beachtet werden.

4.5.3.2 Holzdächer **Timber roofs**

Dächer mit einer tragenden Unterkonstruktion bzw. einer Dachschalung aus Holz zählen zu den Leichtbaudächern mit einem geringen Verhältnis von Konstruktionseigengewicht zu Nutzlast. Auch bei diesen Dächern befindet sich im Bestand oberhalb der Dachschalung häufig der folgende Dachaufbau:

- Dampfsperre
- Dämmschicht
- Abdichtungsschicht

Auch Holzdächer können in einigen Fällen durch einfache Ergänzung zusätzlicher Dämmung saniert werden. Hierbei müssen die in Kapitel 4.5.2 genannten Änderungen der Lastannahmen und das zusätzliche Gewicht der Dämmung berücksichtigt werden, was auf Grund des geringeren Konstruktionseigengewichtes einen größeren Einfluss als bei massiven Dächern hat.

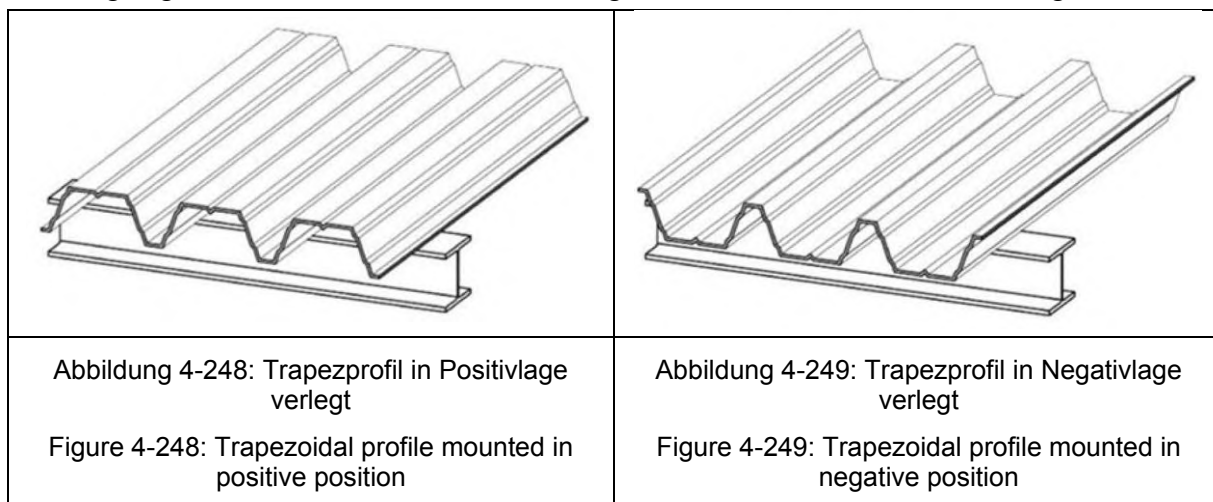
Bei Holzdächern muss bei der Planung einer Dachsanierung zusätzlich der aktuelle Zustand der Bausubstanz untersucht werden, da Holz sehr anfällig für Witterung und Alterung sein kann. Grundsätzlich kann Holz beispielsweise mit Epoxidharzsystemen saniert werden, der vollständige Rückbau der Dachhaut kann aber wirtschaftlicher sein. In diesem Fall können Lösungen in Stahlleichtbauweise, beispielsweise Sandwichelemente, direkt an der primären Tragstruktur befestigt werden, da diese die Funktionen „Tragen“ und „Dämmen“ vereinen.

4.5.3.3 Dächer in Stahlleichtbauweise Lightweight steel construction roofs

Sanierungsfähige Stahlleichtbau-Dächer von Industrie- und Gewerbebauten wurden vorwiegend mit Trapezprofilen oder Sandwichelementen ausgeführt.

Es werden zwei Verlegearten von Trapezprofilen unterschieden, vgl. Kap. 2.3.1.4:

Zur Ausbildung eines Warmdaches werden die Trapezprofile in Positivlage verlegt, siehe Abbildung 4-248. Hier liegen die breiten Gurte außen und oberhalb der Trapezprofile werden Dämmung und wasserführende Schicht angeordnet. Die Befestigung an der Unterkonstruktion erfolgt direkt in den schmalen Untergurten.

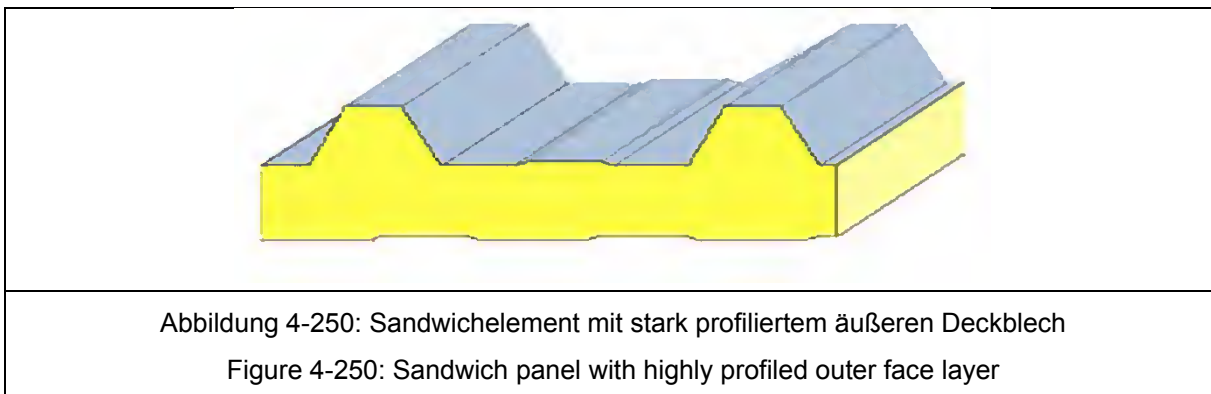


Zur Ausbildung eines Kaltdaches werden die Trapezprofile in Negativlage verlegt, siehe Abbildung 4-249. Im Industriebau werden Trapezprofile vorwiegend als tragende Unterschale in Positivlage verlegt. Eine Verlegung in Negativlage wird gewählt, wenn die Trapezprofile die wasserführende Schicht bilden. In diesem Fall liegt der Längsstoß der Trapezprofile witterungsgeschützt an der Außenseite des Daches und nicht in den Tiefsicken. Die Befestigung der in Negativlage verlegten Trapezprofile erfolgt

außerhalb der wasserführenden breiten Gurte statisch ungünstig mithilfe von Kalotten an den schmalen Obergurten.

Trapezprofile können in ihrer Ebene ein Schubfeld ausbilden und so zur Gebäudeaussteifung beitragen, vgl. Kapitel 2.3.1.4.2. Zur Ausbildung eines statisch wirksamen Schubfeldes müssen die Trapezprofile allseitig kraftschlüssig mit ihrer Unterkonstruktion verbunden werden. Die Schubsteifigkeit ist dabei vorwiegend abhängig von der Blechdicke und der Höhe der Trapezprofile. Soll ein Gebäude mit als Schubfeld ausgebildetem Trapezprofildach durch Rückbau der Dachkonstruktion energetisch saniert werden, ist sicherzustellen, dass die Aussteifung in der Dachebene wiederhergestellt wird. Dies kann erneut flächig, oder durch zusätzliche Diagonalverbände erfolgen. Auch Bauzustände müssen bei der Sanierung berücksichtigt werden. Bei einer Änderung ist in diesen Fällen ein erneuter statischer Nachweis der Gebäudeaussteifung erforderlich.

Im Dachbereich werden in der Regel Sandwichelemente mit einem stark profilierten äußeren Deckblech eingesetzt, vgl. Kapitel 2.3.1.2. Dies geschieht einerseits, um eine Längsstoßausführung oberhalb der wasserführenden Tiefsicken ausführen zu können und andererseits, um durch die vorhandene Eigensteifigkeit der Deckschicht mögliche Kriechverformungen infolge Eigengewicht des Gesamtquerschnitts zu reduzieren. (Übliche Sandwichelement-Kernmaterialien neigen zu zeitabhängigen Verformungen, Stahl nicht.)



Auch die Befestigung der Sandwichelemente im Dachbereich erfolgt in der Regel an den Hochpunkten der schmalen Gurte des äußeren Deckbleches, um Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Bei der Sanierung von Sandwichdächern ohne Rückbau der Sandwichelemente, durch Addition zusätzlicher Bauteile, müssen hier also eventuell vorhandene Schraubenköpfe berücksichtigt werden.

Bestehende Sandwichdächer mit geringer Dämmdicke, deren energetische Sanierung aus ökologischen und ökonomischen Gründen zu diesem Zeitpunkt sinnvoll erscheint wurden in der Regel noch nicht als Schubfeld bemessen, auch wenn dies durch Forschung in der jüngeren Vergangenheit nun möglich ist. Grundsätzlich ist dies im Einzelfall jedoch zu prüfen.

Grundsätzlich könnten Trapezprofildächer und Sandwichelementdächer durch vollständigen Rückbau oder durch Addition zusätzlicher Dämmschichten saniert werden. Bei der Wahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen ist neben ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten der statische Nachweis in der Regel maßgebend. Ob dieser mit zusätzlichem Konstruktionsgewicht unter Berücksichtigung der in Kapitel

4.5.2 beschriebenen veränderten Lastannahmen geführt werden kann ist im Einzelfall zu prüfen.

4.5.4 Mögliche Sanierungsmaßnahmen in Stahlleichtbauweise **Possible renovation actions in lightweight steel construction**

4.5.4.1 Allgemeines **Preface**

Für die energetische Sanierung bestehender Dächer in Stahlleichtbauweise stehen unterschiedliche Varianten zur Verfügung. In diesem Abschnitt werden die Sanierungsbauteile

- Sandwichelement
- Trapezprofil
- Stehfalzprofil

vorgelegt und hinsichtlich ihrer statischen Eignung zur Sanierung der in Kapitel 4.5.3 vorgestellten Bestandsdächer bewertet.

Für den Einsatz als nicht tragende äußere Deckschale zum Schutz der Dämmung vor Witterungseinflüssen und zur Gestaltung der Gebäudehülle werden im Nichtwohnungsbau Trapez- und Wellprofile Bauhöhen bis ca. 75 mm oder Stehfalzprofile eingesetzt. Stehfalzprofile sind dabei mit verdeckter, wärmebrückenfreier Befestigung und verbördelten Längsfugen speziell für den Einsatz als nicht tragende Außenschale optimiert.

Grundsätzlich können aus optischen oder weiteren Gründen auch Wellprofile als äußere Deckschale im Dachbereich eingesetzt werden. In diesen Fällen lassen sich die Anmerkungen und Hinweise für Trapezprofile übertragen.

4.5.4.2 Massivdach – Sandwichelemente **Solid roof – sandwich panels**

Sandwichelemente können aus statischer Sicht zur Sanierung von Massivdächern verwendet werden. Dazu könnten die Sandwichelemente direkt oberhalb der bestehenden Dämmschicht verlegt werden, siehe Abbildung 4-251. Hierbei muss geprüft werden, ob ausreichend Gefälle zur Dachentwässerung vorhanden ist und ob sich Zwangsverformungen infolge Temperaturdifferenz der Deckschichten frei einstellen können. Insbesondere bei harter Dämmung ist dies für den Lastfall Temperatur Winter kritisch zu prüfen.

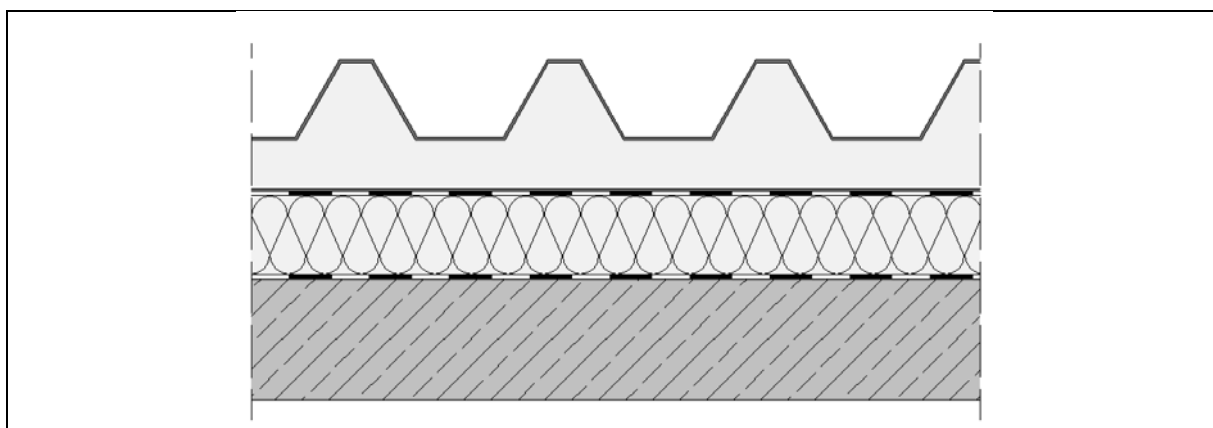


Abbildung 4-251: Schematisch: Sanierung Massivdach mit Sandwichelement [97]

Figure 4-251: Sketch: Refurbishment solid roof with sandwich panel [97]

Alternativ kann mit Stahlleichtbauprofilen einfach eine Unterkonstruktion mit beliebiger Dachneigung ausgebildet werden. Dies kann auch aus gestalterischen Gründen erfolgen. Diese Variante ist aus statischer Sicht unbedenklich.

Die Befestigung der Sandwichelemente oder der zugehörigen Unterkonstruktion an einem massiven Bestandsdach ist in der Regel unkritisch. Gegenüber einer einfachen Addition von zusätzlicher Dämmung muss bei der Sanierung mit Sandwichelementen zusätzliches Eigengewicht berücksichtigt werden. Die Längsfugenstöße von Sandwichelementen können auch im Dachbereich einfach ausgeführt werden, wegen der großen möglichen Lieferlängen der Sandwichelemente (bis ca. 24 m) können viele Dächer ohne aufwendigeren Querstoß ausgeführt werden.

4.5.4.3 Massivdach – Trapez- und Stehfalzprofile **Solid roof – trapezoidal- and standing seam profiles**

Eine Tragschicht aus Trapezprofilen in Positivlage ist bei der Sanierung von Massivdächern nur erforderlich, wenn der statische Nachweis der Bestandskonstruktion mit den veränderten Lastannahmen nicht erfüllt werden kann.

Trapezprofile in Negativlage und Stehfalzprofile können bei der Sanierung von Massivdächern als äußeres Abschlussprofil oberhalb der Dämmung aus statischer Sicht unkritisch verwendet werden. Hierbei ist eine direkte Verlegung oberhalb der Dämmung oder eine Verlegung auf einer zusätzlichen Unterkonstruktion möglich.

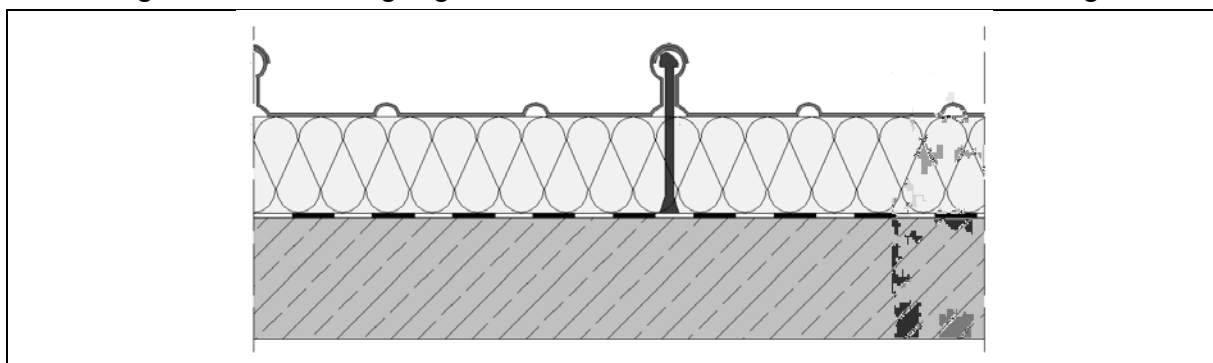


Abbildung 4-252: Schematisch: Sanierung Massivdach mit Stehfalzprofilen [97]

Figure 4-252: Sketch: Refurbishment solid roof with standing seam profiles [97]

Gegenüber einer Deckschale aus Trapezprofilen in Negativlage haben Stehfalzprofile die folgenden Vorteile:

- Optisch ansprechenderes Erscheinungsbild
- Verdeckte, wärmebrückenfreie Befestigung möglich
- Dauerhaft dichte Ausführung der Längsfugen durch verbördeln möglich

Unterschiedliche Hersteller stellen für die Sanierung von massiven Flachdächern mit Stehfalzprofilen Systemlösungen bereit. Bei der Wahl einer geeigneten Deckschale müssen auch bauphysikalische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

4.5.4.4 Sandwichelementdach – Sandwichelemente **Sandwich panel roof – sandwich panel**

Bestehende Sandwichelementdächer mit bauphysikalisch nicht mehr ausreichenden Eigenschaften können mit zusätzlichen Sandwichelementen erweitert werden. Dabei kann das zusätzliche Sandwichelement derart dimensioniert werden, dass es alleine den statischen Anforderungen genügt. Das bestehende Sandwichelement verbleibt als „Dämmung“ ohne statische Funktion im Dachaufbau. Zur Montage der zusätzlichen Sandwichelemente ist gegebenenfalls eine einfache separate Unterkonstruktion zwischen den Elementen erforderlich, da bei sichtbar befestigten Sandwichelementen (im Bestand üblich) die vorhandenen Schraubköpfe eine direkte Montage übereinander verhindern. Andernfalls kann die Unterkonstruktion in den Tiefsicken der Bestandselemente ausgebildet werden. Dabei müssen die Hochsicken versetzt angeordnet werden, siehe Abbildung 4-253. Dieser Versatz muss bei der Planung an den Rändern des Daches berücksichtigt werden.

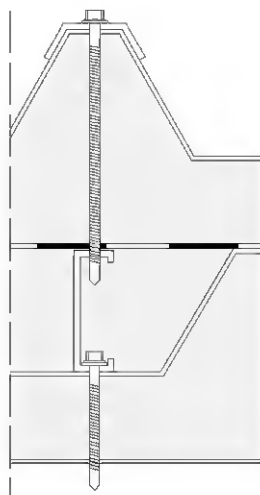


Abbildung 4-253: Skizze: Befestigung Sandwichelement auf Sandwichelement [97]

Figure 4-253: Sketch: Sandwich panel mounted on sandwich panel [97]

4.5.4.5 Sandwichelementdach – Trapez- und Stehfalzprofile **Sandwich panel roof – trapezoidal- and standing seam profiles**

Die energetische Sanierung von Sandwichdächern durch Addition zusätzlicher Dämmung mit einer Außenschale aus Stehfalzprofilen oder Trapezprofilen in Negativlage ist grundsätzlich möglich. Diese Variante ist in ihrer Ausführung sehr

aufwendig. Zunächst müssen Tiefsicken der äußeren Profilierung mit ausgedämmt werden. Anschließend müssen zusätzliche Dämmung und eine Unterkonstruktion für die Deckschale montiert werden. Hierbei können gegebenenfalls Befestiger für Solaranlagen oder ähnliche Bauteile verwendet werden. Auch bei dieser Variante ist im Einzelfall zu prüfen, ob ein statischer Nachweis der Bestandsbauteile mit den veränderten Lastannahmen (siehe dazu Kapitel 4.5.2) und dem zusätzlichen Eigengewicht noch möglich ist. Hinweis: Durch die zusätzliche Außenschale wird bei dieser Sanierungsvariante die Temperaturdifferenz der Deckschichten der Sandwichelemente erheblich reduziert, was sich bei den statischen Nachweisen positiv auswirken wird.

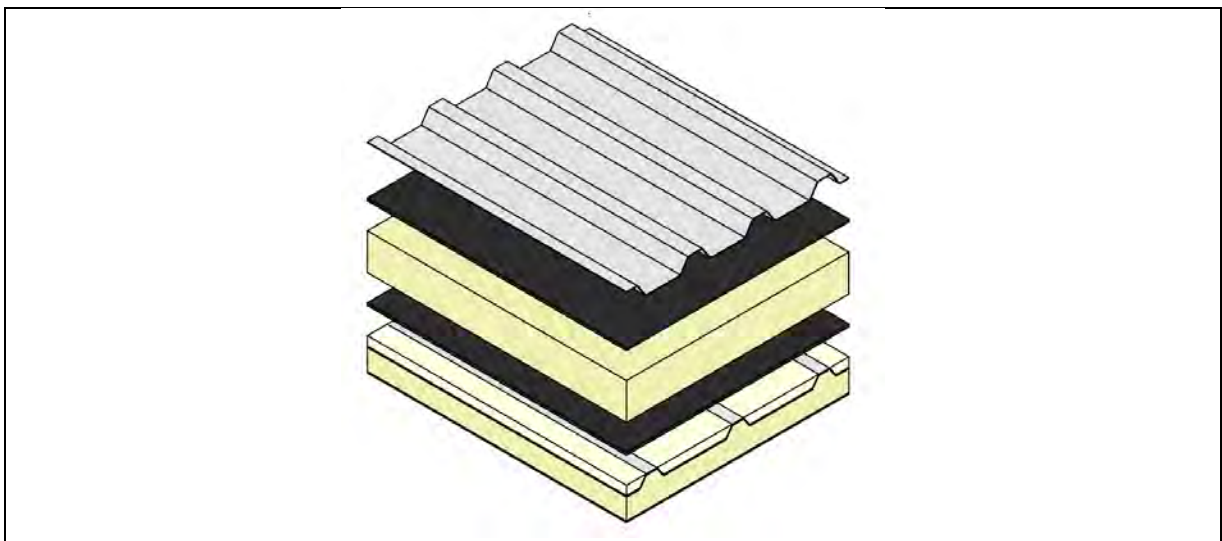


Abbildung 4-254: Skizze: Sandwichelementdach mit zusätzlicher Dämmung und Trapezprofilaußenschale

Figure 4-254: Sketch: Sandwich panel roof with additional insulation and trapezoidal outer shell

4.5.4.6 Trapezprofildach – Trapez- und Stehfalzprofile Trapezoidal profile roof – trapezoidal- and standing seam profiles

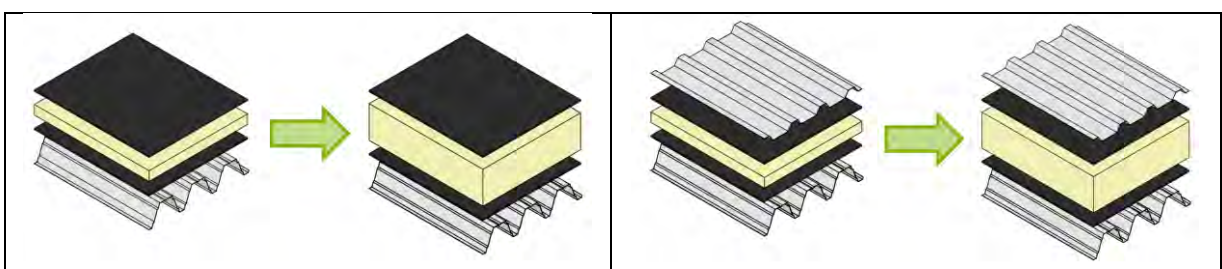


Abbildung 4-255: Skizze: Erweiterung der Dämmung einschaliges Trapezdach

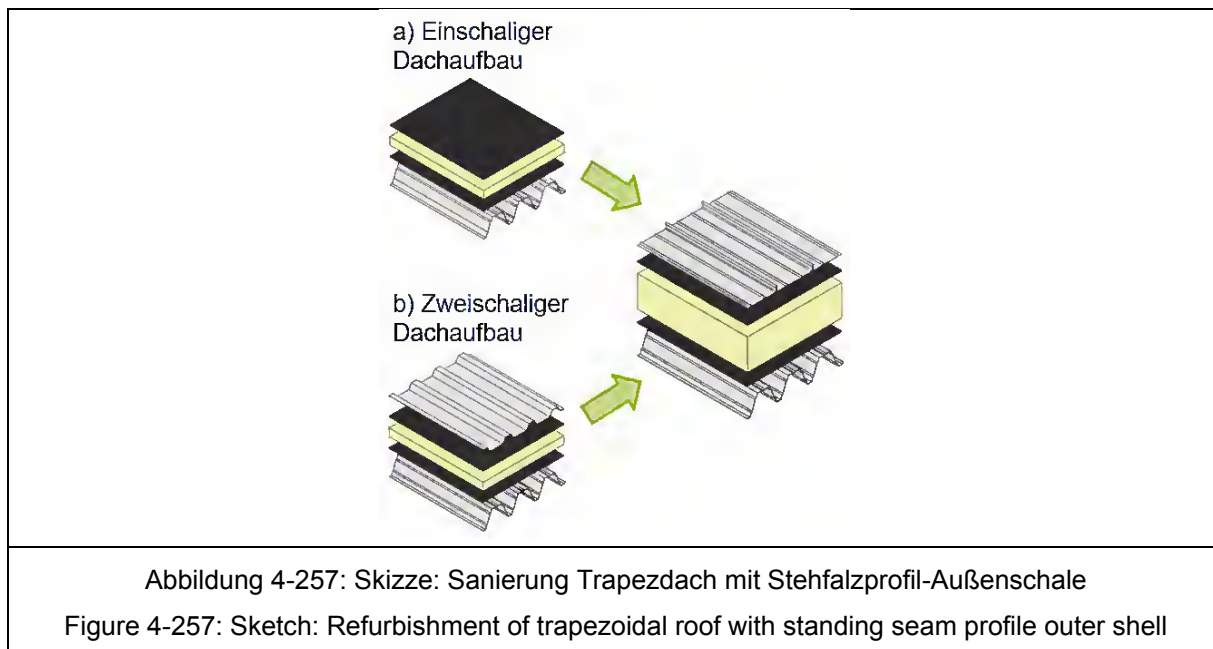
Figure 4-255: Sketch: Insulation add-on single-layer trapezoidal roof

Abbildung 4-256: Skizze: Erweiterung der Dämmung zweischaliges Trapezdach

Figure 4-256: Sketch: Insulation add-on double-layer trapezoidal roof

Trapezprofildächer können wegen ihres modularen Aufbaus aus statischer Sicht sehr gut energetisch saniert werden. Dabei kann vorhandene Dämmung, in Abhängigkeit von ihrem Zustand und weiteren Randbedingungen, ausgetauscht oder erweitert werden. Auch die energetische Sanierung ungedämmter Trapezdächer mit

zusätzlicher Dämmung ist grundsätzlich möglich. Bei allen Varianten ist im Einzelfall zu prüfen, ob ein statischer Nachweis der Bestandsbauteile mit den veränderten Lastannahmen (siehe dazu Kapitel 4.5.2) und dem zusätzlichen Eigengewicht möglich ist. Die folgenden Abbildungen zeigen schematisch die Erweiterung der Dämmung ein- und zweischaliger Trapezprofildächer (Abbildung 4-255, Abbildung 4-256).



Alternativ können auch Stehfalzprofile als äußere Deckschale verwendet werden, siehe Abbildung 4-257. Dies ermöglicht eine verdeckte, nicht sichtbare und wärmebrückenoptimierte Befestigung. Für die Sanierung von Trapezprofildächern mit Stehfalzprofilen bieten unterschiedliche Hersteller Systemlösungen an. Auch bei dieser Variante ist im Einzelfall zu prüfen, ob ein statischer Nachweis der Bestandsbauteile mit den veränderten Lastannahmen (siehe dazu Kapitel 4.5.2) und dem zusätzlichen Eigengewicht möglich ist.

4.5.4.7 Trapezprofildach – Sandwichelemente

Trapezoidal profile roof – trapezoidal- and standing seam profiles

Trapezprofildächer können aus statischer Sicht einfach ohne vollständigen Rückbau mit Sandwichelementen saniert werden. Dabei dienen die Sandwichelemente als zusätzliche Außenschale, die oberhalb der bestehenden Dachkonstruktion verlegt und direkt durch die Trapezprofilebene an der Unterkonstruktion oder der primären Tragstruktur befestigt wird. Eventuell vorhandene Dämmung kann zwischen Trapezprofil und Sandwichelement verbleiben.

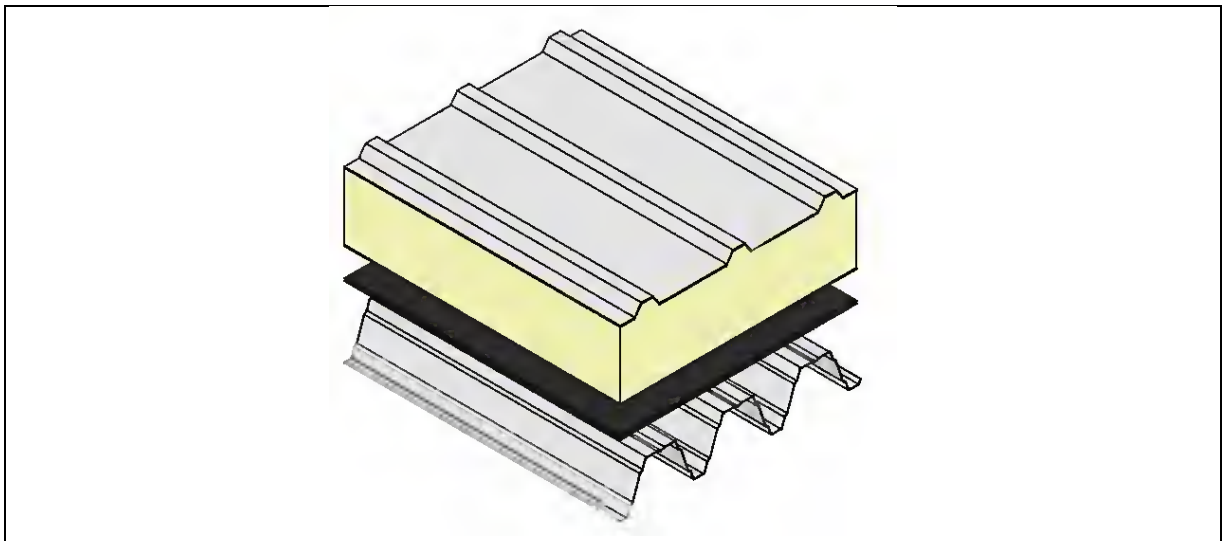


Abbildung 4-258: Sanierung Trapezdach mit Sandwichelement
Figure 4-258: Refurbishment of trapezoidal roof with sandwich panel

Mit dieser Sanierungsvariante können auch die Trapezprofildächer saniert werden, bei denen der erneute statische Nachweis mit den in Kapitel 4.5.2 beschriebenen veränderten Lastannahmen oder zusätzlichem Konstruktionseigengewicht nicht möglich ist. Die Sandwichelemente können entsprechend den statischen Erfordernissen bemessen werden und der bestehende Dachaufbau verbleibt ohne statische Funktion.

4.5.4.8 Tabellarische Zusammenfassung
Tabular summary

In der folgenden Tabelle 4-71 sind die wesentlichen Ergebnisse der vorgestellten theoretischen Untersuchungen zusammengefasst.

Tabelle 4-71: Mögliche Sanierungsmaßnahmen in Stahlleichtbauweise

Table 4-71: Possible refurbishments in lightweight steel construction

Bauweise	Bestands-konstruktion	Sanierungs-fähigkeit	Sanierungs-maßnahme	Anmerkungen
Massive Bauweise	Stahlbeton Flachdach	++	Sandwich-elemente	+ schnelle Montage; + guter Wärmeschutz; - Ressourcenverbrauch; - Nachhaltigkeit
			Stehfalz-profile	+ Nachhaltigkeit; + Erweiterung möglich; + nahezu wärmebrückenfrei
			Trapez-profile	- leichte konstruktive Nachteile gegenüber Falzprofilen
Stahlleicht-bauweise	Sandwich-element	?	Sandwich-elemente	+ schnelle Montage; + statische Ertüchtigung möglich (?); - Nachhaltigkeit
			Stehfalz-profile	+ Reduktion Lastfall Temperatur; - zusätzliches Eigengewicht
			Trapez-profile	- leichte konstruktive Nachteile gegenüber Falzprofilen
	Aufbau mit Trapez-Tragschale	++ (?)	Sandwich-elemente	+ schnelle Montage; + statische Ertüchtigung möglich (?); - Nachhaltigkeit
			Stehfalz-profile	+ Gestaltungsmöglichkeiten; + Nachhaltigkeit; + nahezu wärmebrückenfrei
			Trapez-profile	+ modularer Aufbau erlaubt nachträgliche Erweiterung der Dämmung

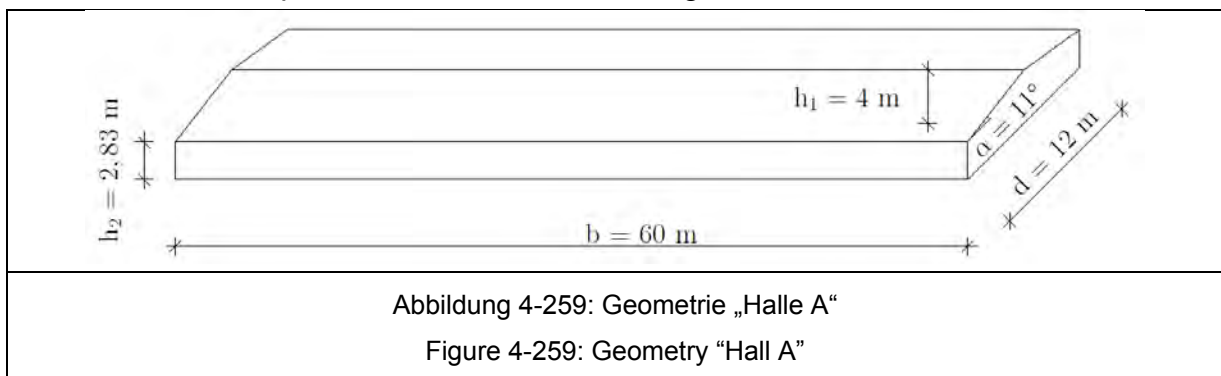
4.5.5 Beispielrechnungen: Sanierung Trapezdach Example calculation: Refurbishment trapezoidal roof

4.5.5.1 Allgemeines Preface

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zahlreiche statische Berechnungen zur Dachsanierung bestehender Gebäude durchgeführt. Beispielhaft werden im Folgenden die erforderlichen Grundlagen für die energetische Sanierung einer Typenhalle mit Trapezdach dargestellt und einige Besonderheiten erläutert.

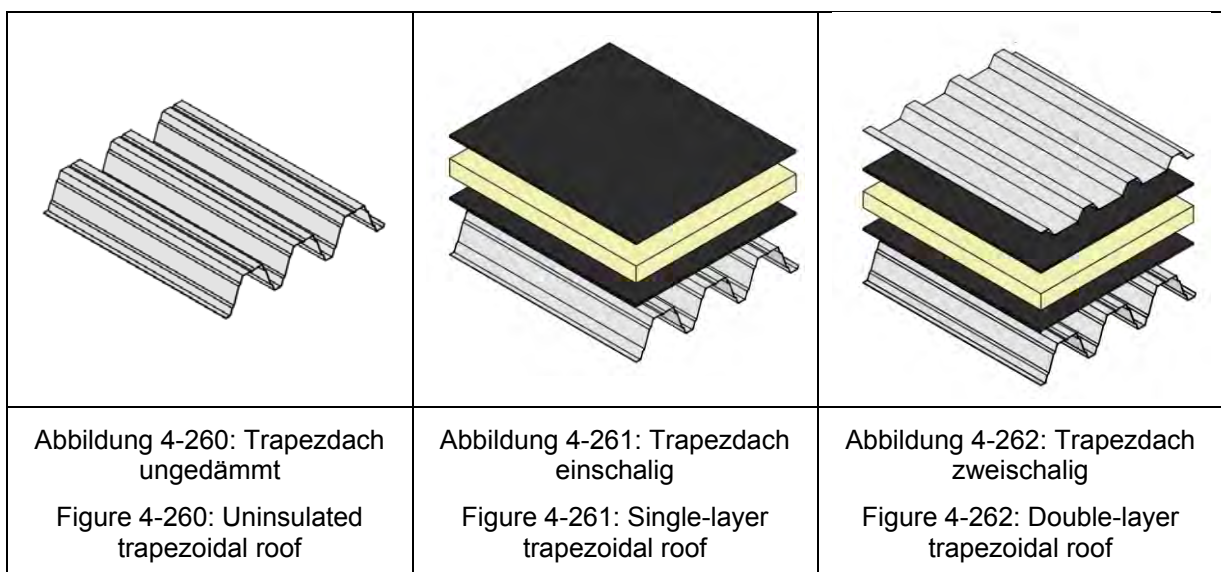
4.5.5.2 Beschreibung Beispielgebäude Description sample building

Betrachtet wird eine Stahlhalle mit Binderabstand 6,0 m und 11° Dachneigung. Diese wurde bereits in Kapitel 4.1.4.2 als „Halle A“ vorgestellt.



4.5.5.3 Betrachtete Dachkonstruktionen Considered roof types

Es werden die in den folgenden Abbildungen dargestellten Dachkonstruktionen betrachtet:



4.5.5.4 Eigengewicht der Dachkonstruktion Roof construction weight

In der folgenden Tabelle 4-72 ist das Eigengewicht der einzelnen Konstruktionsbauteile zusammengestellt.

Tabelle 4-72: Eigengewicht Konstruktionsbauteile Trapezdach

Table 4-72: Construction weights trapezoidal roof

Bauteil	Anmerkungen	Eigengewicht [kN/m ²]
Tragendes Trapezprofil und Dampfsperre		
Trapezprofil t = 1,0 mm, h = 135 mm	mögliches Profil bei 6,00 m Spannweite	0,097
Dampfsperre		0,070
Außenschale		
Bitumen-Dichtbahn	für einschaligen Dachaufbau	0,070
Trapez-Außenschale	für zweischaligen Dachaufbau; mögliches Profil mit geringer Blechdicke und Bauhöhe 40 mm	0,068
Dämmung		
14 cm Dämmung Mineralwolle druckbelastbar	für einschaligen Dachaufbau	0,190 - 0,230
14 cm Dämmung Mineralwolle nicht druckbelastbar	kann bei zweischaligem Dachaufbau verwendet werden	0,130

Tabelle 4-72 kann entnommen werden, dass wegen des ähnlichen Gewichtes von üblichen Bitumen-Dichtbahnen und Stahlprofil-Außenschalen ein zweischaliger Dachaufbau bei Verwendung nicht druckbelastbarer Mineralwolldämmung zu einem geringeren Konstruktionseigengewicht führen kann. Dies ist im Einzelfall unter Berücksichtigung der notwendigen Unterkonstruktionen zu prüfen.

Grundsätzlich haben ein- und zweischalige gedämmte Trapezdächer deutlich höheres Konstruktionseigengewicht als ungedämmte Trapezdächer.

4.5.5.5 Veränderliche Lasten Variable loads

Unter der Annahme, dass die Beispielhalle 1987 errichtet wurde, ergeben sich für die Beispielstandorte Aachen und Dortmund die in der folgenden Tabelle 4-73 dargestellten Einwirkungen. Die charakteristische Schneelast wurde bei 11° Dachneigung auf die Dachfläche bezogen. Die charakteristischen Windlasten wurden für den bei der Bemessung maßgebenden Randbereich des Daches bestimmt.

Bei den im Industriebau üblichen Dächern mit geringer Dachneigung hat der Lastfall Winddruck keinen maßgebenden Einfluss auf die statischen Nachweise. Der Lastfall Schnee wurde für den Standort Aachen um 12 % erhöht, der Lastfall Windsog wurde um 7,5 % reduziert. Für den Standort Dortmund wurden die charakteristischen Lasten

beider Lastfälle reduziert. Die Schneelast wurde um 13,5 % und der Windsog um 29 % reduziert.

Tabelle 4-73: Veränderliche Lasten Beispielhalle

Table 4-73: Variable loads example hall

	Standort			
	Aachen		Dortmund	
	1987	heute	1987	heute
Schneelast auf Dachfläche	0,74 kN/m ²	0,83 kN/m ²	0,74 kN/m ²	0,64 kN/m ²
Winddruck	0,00 kN/m ²	0,08 kN/m ²	0,00 kN/m ²	0,06 kN/m ²
Windsog	- 1,60 kN/m ²	- 1,48 kN/m ²	- 1,60 kN/m ²	- 1,14 kN/m ²

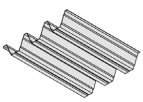
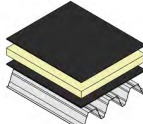
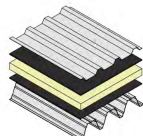
4.5.5.6 Bemessung der Trapezprofile Design of trapezoidal profiles

Bei der Bemessung von Trapezprofilen muss beachtet werden, dass sich die Widerstandswerte für Trapezprofile bei abhebenden und andrückenden Lasten unterscheiden können. Dies ist insbesondere bei Mehrfeldträgern zu beachten.

Für die Standorte Aachen und Dortmund ergeben sich bei der Bestandsbemessung 1987 mit den oben genannten Lasten für ein gewähltes Trapezprofil $h = 135$ mm (als Einfeldträger) eines bestimmten Herstellers die folgenden Ausnutzungsgrade:

Tabelle 4-74: Ausnutzungsgrad statischer Nachweis 1987

Table 4-74: Utilisation rate static proof 1987

Variante	Belastung	Ausnutzung [%]
 Negativlage	andrückend	51,5
	abhebend	90,4
 10 cm Dämmung	andrückend	68,2
	abhebend	84,0
 10 cm Dämmung	andrückend	68,2
	abhebend	84,0

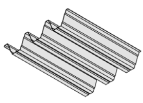
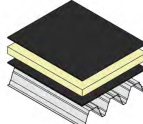
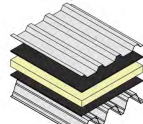
Für dieses Beispiel ist in allen drei Fällen die Lastkombination mit abhebenden Lasten maßgebend. Die Ausnutzungsgrade liegen zwischen 84 und 91 %, siehe Tabelle 4-74.

Es wird davon ausgegangen, dass für eine sinnvolle energetische Sanierung die Dämmstärke auf 24 cm erhöht werden soll. Wegen der geringen Ausnutzung bei andrückender Lastfallkombination stehen in diesem Beispiel auch unter

Berücksichtigung der veränderten Lastannahmen für alle drei Varianten an beiden Standorten ausreichend Tragreserven zur Verfügung, siehe Tabelle 4-75. Durch das zusätzliche Konstruktionseigengewicht wird der Lastfall „Druck“ zwar maßgebend, kann aber mit ausreichend Reserve erfüllt werden.

Tabelle 4-75: Ausnutzungsgrad statischer Nachweis 2017

Table 4-75: Utilisation rate static proof 2017

Variante	Belastung	Ausnutzung [%]	
		Aachen	Dortmund
 + 24 cm Dämmung	andrückend	88,6	76,6
	abhebend	61,7	41,3
 10 +14 cm Dämmung	andrückend	88,6	76,6
	abhebend	61,7	41,3
 10 + 14 cm Dämmung	andrückend	83,2	71,0
	abhebend	65,9	45,5

4.5.6 Zusammenfassung Summary

Grundsätzlich müssen bei der energetischen Sanierung von Dächern veränderte Schnee- und Windlastannahmen berücksichtigt werden, mit denen der statische Nachweis unmittelbar von der Änderung berührter Bauteile erneut geführt werden muss. Zusätzlich ist das Eigengewicht der Sanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Massive Dächer können in der Regel aus statischer Sicht unbedenklich in Stahlleichtbauweise saniert werden. Sanierungsbauteile können einfach an der Bestandskonstruktion befestigt werden und unterliegen keinen zusätzlichen statischen Anforderungen.

Bei Holzdächern wird eine genaue Bestandsaufnahme empfohlen. Bei schlechtem Zustand können diese einfach zurückgebaut und durch Sandwichelemente ersetzt werden.

Bestehende Sandwichelementdächer können mit zusätzlichen Stahlleichtbaukonstruktionen erweitert oder zurückgebaut und ersetzt werden. Auch die einfache Montage zusätzlicher Sandwichelemente ist aus statischer Sicht möglich. Diese Variante ist wirtschaftlicher und ressourcenschonender.

Trapezprofil-dächer können wegen ihres modularen Aufbaus einfach durch Addition zusätzlicher Dämmung energetisch saniert werden. Kann der statische Nachweis im Sanierungsfall nicht erbracht werden, ist die Montage einer zusätzlichen Außenschale aus tragenden Sandwichelementen möglich.

5 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis Summary and recommendations for practice

Kurzfassung

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes gliederten sich in zwei Abschnitte. Neben Fragestellungen, die sich unmittelbar aus dem Forschungsansatz der energetischen Optimierung ergeben – d.h. thermische Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung hygrothermischer Wechselwirkungen – wurden auch Aspekte und Themen bedient, die sich als Konsequenz aus den normativ-gesetzlichen Entwicklungen im Bereich Lastannahmen und Tragverhalten ergeben. Hier wurden die bisherigen Ansätze aufgearbeitet und in entsprechenden Handlungs- und Bemessungshinweisen zusammengefasst. Dabei wurden historischen Entwicklungen ebenso berücksichtigt, wie auch der innovative Ansatz, wonach Bauteile, die aus energetischer Sicht erforderlich sind, auch einen entsprechenden Beitrag zum statischen Nachweis leisten können. Eine Bewertung der praktisch erreichbaren Energieeinsparungen ist genauso enthalten wie auch eine umfassende Versuchsdokumentation.

Abstract

The investigations in the framework of this project were divided into two sections. In addition to questions that arise directly from the research approach of energetic optimization - i.e. thermal investigations with special consideration of hygrothermal interactions - were also served aspects and topics, which result as a consequence of the legal developments in the area of load assumptions and load bearing behavior. Here, the previous approaches have been worked up and summarized in corresponding action and design notes. This took account of historical developments as well as the innovative approach whereby components which are required from an energy point of view can also make a corresponding contribution to static verification. An evaluation of the practically achievable energy savings is included as well as a comprehensive experimental documentation.

Die energetische Sanierung von Gebäudehüllen kann thermisch sehr effektiv mit Sandelementen als von außen zu installierende Bauteile erfolgen. Die Bauweise des konkret vorliegenden Bestandssystems sollte dabei zwar Beachtung finden, beeinflusst die Auswahl des Sanierungssystems aber nur insofern, als dass ggf. weitere Maßnahmen durchzuführen sind.

Fragestellungen, die sich in Zusammenhang mit Wärme- und Feuchteschutz ergeben haben, sind Gegenstand von Untersuchungen an vorhandenen Bestands- und sanierten Bauteilen gewesen.

Für die innerhalb des Forschungsprojektes untersuchten Bestandskonstruktionen wurden jeweils verschiedene Möglichkeiten der energetischen Sanierung betrachtet. Neben Sandwichelementen wurden dabei auch sog. modulare

Stahlleichtbaukonstruktionen hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Verbesserungspotentiale und Auswirkungen bewertet. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Kombination aus Bestandskassettensfassaden mit Sandwichelementen als Ertüchtigungsmaßnahme, da das thermische Verhalten dieser „Hybridelemente“ als besonders günstig einzustufen ist. Außer der rein thermischen Untersuchung und Beurteilung der jeweiligen Sanierungsmaßnahme waren auch die hygrischen bzw. die kombiniert hygrothermischen Bauteileigenschaften Gegenstand des Forschungsvorhabens. Ergänzend zu den numerischen Berechnungen wurden für ausgewählte Bausysteme auch experimentell Versuche durchgeführt. Zusätzlich zu bauphysikalischen Erkenntnissen standen dabei auch Aspekte, die die Wechselwirkung zwischen Tragverhalten und Bauphysik betreffen, im Focus der Betrachtung. Abschließend wurde die zuvor auf Ebene der Einzelbauteile ermittelte energetische Qualität der sanierten Bauteile auf die Gesamtgebäudeebene übertragen und in Bezug zu den übrigen Einflussparametern vor dem Hintergrund praktischer Energieeinsparpotentiale bewertet.

Soll ein Bestandsgebäude ohne vollständigen Rückbau der Gebäudeaußenhülle energetisch saniert werden, müssen von der Sanierung berührte Bestandsbauteile mit aktuellen Lastannahmen erneut statisch nachgewiesen werden. Die Wind- und Schneelastannahmen unterlagen in den letzten Jahrzehnten starken Veränderungen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine umfangreiche Arbeitshilfe erstellt, die es Planern ermöglicht, die Veränderungen der Lastannahmen in Abhängigkeit von Gebäudealter, -standort und -geometrie einfach abzuschätzen.

Moderne Stahlleichtbausysteme werden mit hoher Präzision gefertigt und stellen hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit ihrer Unterkonstruktion. Neben dem optischen Erscheinungsbild können unberücksichtigte Maßtoleranzen im Stahlleichtbau auch die Tragfähigkeit erheblich beeinflussen (und so zu Bauschäden führen). An zwei beispielhaft vermessenen Bestandsgebäuden konnte gezeigt werden, dass normative Vorgaben an Toleranzen teilweise nicht eingehalten werden. Folglich wird empfohlen, bei der Planung einer energetischen Sanierung eine genaue Bestandsaufnahme durchzuführen und Sanierungsmaßnahmen derart zu planen, dass vorhandene Toleranzen ausgeglichen werden können.

Sandwichelementfassaden können einfach zurückgebaut und ersetzt werden. Eine Sanierung ohne vollständigen Rückbau kann die Kosten der Sanierung erheblich reduzieren und Ressourcen schonen. Diese Variante sollte daher stets geprüft werden.

Kassettensprofilfassaden eignen sich wegen ihres modularen Aufbaus hervorragend für energetische Sanierungen ohne vollständigen Rückbau. Wird die vorhandene Außenschale durch übliche Sandwichelemente ersetzt, spricht man von einer Hybridfassade. Bei der Planung von Hybridfassaden mit vertikal verlegten Sandwichelementen muss berücksichtigt werden, dass bei nicht sichtbarer Befestigung der Sandwichelemente in den Längsfugen der gemäß den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen vieler im Bestand verbauter Kassettensprofile zulässige Abstand der seitlichen Halterung der schmalen Kassettengurte überschritten wird. Unter beispielhaft gewählten Randbedingungen hatte dies keinen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten. Zusätzlich muss bei der Bemessung von Hybridfassaden der Lastfall Temperaturdifferenz am Sandwichelement berücksichtigt werden. Bisherige

Bemessungsansätze für diesen Lastfall führen in Hybridfassaden zu einer deutlichen Überschätzung der auftretenden Zwangskräfte, was dazu führt, dass der statische Nachweis der Kassettenprofile bislang oft nicht erbracht werden kann. Geeignete Ansätze zur Erfassung der tatsächlich in Hybridfassaden auftretenden Zwangskräfte infolge Temperaturdifferenz am Sandwichelement wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bereitgestellt. Wegen der geringen Blechdicken der Kassettenprofile ist die Montage der Sandwichelemente an den Kassettenprofilen fehleranfällig. Sie sollte daher stets sehr sorgsam erfolgen. Auch der Neubau von Hybridfassaden ist aus statischer Sicht möglich.

Massive Fassaden können in der Regel aus statischer Sicht unbedenklich in Stahlleichtbauweise saniert werden. Abhängig von der Bauart und dem Zustand der Bestandsfassade muss die lokale Lasteinleitung in die Bestandsfassade sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Dabei müssen auch die im Massivbau üblichen Toleranzen ausgeglichen werden.

Dächer in massiver Bauweise können in der Regel aus statischer Sicht unbedenklich in Stahlleichtbauweise saniert werden. Holzdächer können erweitert, oder zurückgebaut und durch Sandwichelemente ersetzt werden. Der Zustand tragender Holzstrukturen sollte im Bestand genau untersucht werden. Sandwichelement- und Trapezprofildächer können grundsätzlich einfach zurückgebaut und ersetzt werden. Es wird jedoch empfohlen, zu prüfen, ob eine Erweiterung der bestehenden Konstruktion ohne vollständigen Rückbau möglich ist. Insbesondere Trapezprofildächer können wegen ihres modularen Aufbaus einfach durch Addition zusätzlicher Dämmung energetisch saniert werden. Dabei müssen veränderte Lastannahmen berücksichtigt werden.

6 Ausblick und weitere Forschung Perspective and further research

Das Forschungsprojekt „Bauen im Bestand – Lösung für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise“ konnte einen Beitrag dazu leisten, das im Sanierungsbereich vorhandene Potential hervorzuheben und die Chancen für Sanierungslösungen in Stahlleichtbauweise aufzuzeigen. Die erzielbaren energetischen Einsparpotentiale sind insbesondere bei der Anwendung von Sandwichelementen besonders vielversprechend. Zusätzlich sind Ansätze erforscht worden, um die Sanierungsmaßnahme als zusätzliche Unterstützung für die Lastabtragung heranzuziehen.

Aus bauphysikalischer Sicht sind weiterhin Fragestellungen des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens der Bauteile von Interesse. Aspekte, die sich beispielweise aus dem Einfluss von Fehlstellen ergeben, bedürfen einer weitergehenden Untersuchung. Auch auf Materialebene sind bisher nicht alle Themen – z.B. das mittel- und langfristige Verhalten von durchfeuchteten Dämmstoffen – abschließend geklärt.

Der Einfluss unterschiedlicher Abdichtungsmaßnahmen sollte ebenso Gegenstand der zukünftigen Forschung sein, wie auch die Untersuchung bzw. Erarbeitung von fehlertoleranten Anschlussdetails. Diese Anschlussdetails sind im Rahmen des Forschungsprojektes bewusst ausgeklammert worden, um die grundlegenden Fragestellungen zunächst im vergleichsweise einfachen Regelquerschnittbereich zu betrachten.

Aufgrund der Komplexität des im Projektmittelpunkt stehenden Bauteils „Hybridelement“ erscheint es für weitere Forschungsansätze sinnvoll, nicht nur die Kombination mehrere Bauteile zu untersuchen, sondern auch grundlegende Aspekte an den isolierten Einzelbauteilen – in diesem Fall Sandwichelemente bzw. Kassettenelement – im Detail zu beleuchten.

Die Berechnung der für die statischen Nachweise einer Hybridfassade erforderlichen Schnittgrößen ist bislang sehr aufwendig. Insbesondere die infolge Temperaturdifferenz am Sandwichelement auftretenden Zwangskräfte können realitätsnah nur mit geeigneten Stabwerksprogrammen berechnet werden. Hier sollten praxisgerechte Nachweisverfahren entwickelt werden, die eine wirtschaftliche Bemessung ermöglichen.

Die direkte Befestigung von Sandwichelementen an Kassettensprofilen mit üblichen Sandwichbefestigern ist technisch möglich, wird jedoch bislang nicht von den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Sandwichbefestiger erfasst, weil die Befestigung in diesem Fall je Kreuzungspunkt an zwei schmalen Kassettengurten erfolgt. Folglich sollten die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Sandwichbefestiger für eine Befestigung an zwei Bauteilen erweitert werden.

7 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

- [Kuh17] Kuhnhenne, Brieden, Ungermann, Wiegand: Bauen im Bestand – Lösungen für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise. In: Stahlbau 86 (2017), Heft 10, DOI: 10.1002/stab.201710535.
- [Sei15] Seidel: Gebäudesanierung in modularer Stahlleichtbauweise – Stahlkassettenkonstruktion. Bachelorarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2015.
- [Fla15] Flaake: Potentiale für eine energetische Sanierung unterschiedlicher Fassadentypen an Bestandsgebäuden in Stahlleichtbauweise. Masterarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2015.
- [Hee16] Heermann: Toleranzen von Bestandsfassaden im Hinblick auf energetische Sanierungsmaßnahmen in Stahlleichtbauweise. Bachelorarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2016.
- [Sch16] Schweyher: Numerische Simulation zum Tragverhalten eines Kassettenprofils. Bachelorarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2016.
- [Egg16] Eggersgluß: Analytische und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Stahl-Kassettenprofilen mit einer Außenschale aus Sandwichelementen. Masterarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund 2016
- [Pöt16] Pötting: Vergleichende Bemessung von Stahlkassettenprofilen nach DIN und Eurocode. Bachelorarbeit, Institut Stahlbau der TU Dortmund, 2016
- [Kei16] Keiten-Schmitz: Experimentelle und numerische Untersuchung von neuartigen Stahl-Sandwichkonstruktionen. Masterarbeit, Institut für Stahlbau RWTH Aachen mit Institut Stahlbau TU Dortmund, 2016.
- [Bei17] Beilenhoff: Energetische Dachsanierung von Industriebauten in Stahlleichtbauweise. Bachelorarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2017.
- [Boh17] Bohn: Untersuchung zur nachträglichen statischen Ertüchtigung von Stahl-Kassettenprofilen mit Leichtbauprofilen. Masterarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2017.
- [Ent17] Entrup: Experimentelle Untersuchung zum hygrothermischen Verhalten von Hybridkonstruktionen aus Kassetten- und Sandwichelementen. Masterarbeit, Institut für Stahlbau RWTH Aachen, 2017.
- [Sei17] Seidel: Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Stahl-Kassettenprofilen mit einer Außenschale aus Sandwichelementen. Masterarbeit, Institut Stahlbau TU Dortmund, 2017.

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung der Projektergebnisse in Stahlbau 87 (2018), Heft 11

8 Literaturverzeichnis Bibliography

- [1] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – 28. September 2010 – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Abteilung KI.
- [2] Hansen: Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO₂-Einsparpotenzial bis 2030 – Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energieforschung (IEF), 2009.
- [3] Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) vom 18.11.2013.
- [4] DIN 4108-2 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2013/02.
- [5] E DIN 4108-3 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung – Entwurf – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2012/01.
- [6] Ornth: Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 30. Juli 2009 – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009.
- [7] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau: 3.03 – Produktinformation – Metall-Polyurethan(PUR)-Sandwichelemente – Düsseldorf, 2009.
- [8] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau: 3.04 – Produktinformation – Stahl-Mineralwolle(MW)-Sandwichelemente – Düsseldorf, 2011.
- [9] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau: 4.03 – Bauphysik – Wärmebrückenatlas der Metall-Sandwichbauweise – Düsseldorf, 2010.
- [10] Holm; Tremli; Sprengard: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen – Forschungsbericht – FIW München, FO-12/12, 2013.
- [11] Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804 – Sandwichelemente mit beidseitigen Deckschichten aus Stahl und einem Kern aus Mineralwolle – IFBS – EPD-IFBS-20130171-CBG1-DE – Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 12.09.2013.
- [12] Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen – Landesbauordnung – BauO NRW – Bauaufsicht für Bauwesen, Raumordnung und Städtebau – 2000/03.
- [13] Hinweise und Beispiele zum Vorgehen beim Nachweis der Standsicherheit beim Bauen im Bestand – Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) – DIBt, 2008/04 – URL https://www.dibt.de/de/Geschaeftsfelder/data/Hinweis_Bauen_im_Bestand.pdf.
- [14] DIN 1055-4 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2005/03.

- [15] DIN EN 1991-1-4 – Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.
- [16] DIN EN 1991-1-4/NA – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.
- [17] Möller; Pöter; Schwarze: Planen und Bauen mit Trapezprofilen und Sandwichelementen – Ernst & Sohn – Berlin, 2011.
- [18] Pöter: Dokumentation 558 – Bausysteme aus Stahl für Dach und Fassade – Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, 2010.
- [19] Kohler; et al.: Methode zur kombinierten Berechnung von Energiebedarf, Umweltbelastung und Baukosten in frühen Planungsstadien – DBU-Projekt KOBOK – Schlussbericht – Karlsruhe, 1996.
- [20] Projekt Nr. 19 W 400 3 A des BMBF: eLife – Lebenszyklusbetrachtung und Optimierung von Instandsetzungsprozessen im Wohnungsbau – TU Darmstadt et.al. Forschungsbericht. 2007.
- [21] Ungermann; et al.: Bauen im Bestand – Potentiale und Chancen der Stahl(leicht)bauweise – FOSTA Forschungsprojekt P 845, 2010 – 2013.
- [22] „Sanierungsbedarf im Gebäudebestand“ – Studie – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2014.
- [23] „Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen – Konzept Nachhaltigkeit“, Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages, 1999.
- [24] „Bauen und Wohnen – Baugenehmigungen / Baufertigstellungen 2014“, Statistisches Bundesamt, 2015.
- [25] DIN EN ISO 6946 – Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2008/04.
- [26] DIN EN ISO 10211 – Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2008/04.
- [27] DIN 4108-4 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2013/02.
- [28] DIN EN ISO 10456 – Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/05.
- [29] DIN EN 14509 – Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – Werkmäßig hergestellte Produkte – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2013/12.
- [30] DIN EN ISO 13788 – Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2013/05.
- [31] DIN EN 12114 – Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Luftdurchlässigkeit von Bauteilen – Laborprüfverfahren – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2000/04.

- [32] DIN EN 13829 – Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2001/02.
- [33] DIN EN 15026 – Wärme- und feuchtechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2007/07.
- [34] DIN 4108-7 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2011/01.
- [35] Feldmann; et al.: Mehrdimensional energieoptimierte Gebäudehüllen in Stahlleichtbauweise für den Industrie- und Gewerbebau – FOSTA Forschungsprojekt P 880, 2010 – 2013.
- [36] Kuhnhenne: Energetische Qualität von Gebäudehüllen in Stahl-Sandwichbauweise – Dissertation – Aachen, 2010.
- [37] Kuhnhenne; Feldmann; Döring; Spranger: Luftdichtheit im Stahlleichtbau – Gebäudehüllen in Sandwichbauweise – 2. Europäisches BlowerDoor-Symposium März 2007.
- [38] Kuhnhenne; Feldmann; Döring: Grundsätze und Lösungen zur Wärmebrückenreduktion im Metalleichtbau – Stahlbau 79 (2010), Heft 5.
- [39] Baehre; Buca: Der Einfluß der Schubsteifigkeit der Außenschale auf das Tragverhalten von zweischaligen Dünnschalen-Fassadenkonstruktionen – Bauingenieur 68, 1993.
- [40] Böttcher; et al.: Dokumentation 588 – Dach- und Fassadenelemente aus Stahl – Erfolgreich planen und konstruieren – Düsseldorf, Stahl-Informations-Zentrum, 2007.
- [41] Feldmann; Pyschny; Brieden; Kuhnhenne: Effektive Wärmedämmung bei Anwendung von Stahl-Kassettenprofilen – Stahlbau 82, 2013. S. 819–827.
- [42] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau: 5.02 – Stahltrapezprofile – Schubfeldbeanspruchung: Bemessung von Stahltrapezprofilen für Schubfeldbeanspruchung – Düsseldorf, 2007.
- [43] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau: 3.01 – Produkte – Stahlkassettenprofile – Düsseldorf, 2009.
- [44] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau: 8.01 – Montage – Richtlinie für die Planung und Ausführung von Dach-, Wand- und Deckenkonstruktionen aus Metallprofiltafeln – Düsseldorf, 2009.
- [45] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau – Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-10.4-345 – Sandwichelemente mit PUR-Schaumkern und Stahldeckschichten für Dach und Wand.
- [46] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau – Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-14.4-407 – Verbindungselemente zur Verwendung bei Konstruktionen mit Sandwichbauteilen.
- [47] Koschade: Sandwichbauweise – Konstruktion, Systembauteile, Ökologie – München: Inst. für intern. Architektur-Dok, 2011.
- [48] Kuhlmann (Hg.): 2010 Stahlbau Kalender – Berlin – Ernst & Sohn a Wiley company, 2010.
- [49] Lange; Berner: Sandwichelemente im Hochbau. In: Kuhlmann, U. (Hg.): 2010 Stahlbau Kalender. Berlin: Ernst & Sohn a Wiley company, 2010. S. 643–699.
- [50] Stamm; Witte: Sandwichkonstruktionen: Berechnung, Fertigung, Ausführung. Vienna: Springer, 1974.

- [51] Ungermann; Floerke; Fritzsche; Wiegand: Architektonisch qualitätvolle Sandwichfassaden. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, April 2016.
- [52] Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU): Hinweise und Beispiele zum Vorgehen beim Nachweis der Standsicherheit beim Bauen im Bestand: DIBt. Ausgabe April 2008.
- [53] DIN 18807-3 – Trapezprofile im Hochbau – Stahltrapezprofile – Festigkeitsnachweis und konstruktive Ausbildung – Änderung A1 – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2001/05.
- [54] DIN EN 1993-1-3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.
- [55] Landesbauordnung 2016 – BauO NRW 2016. Ministerium des Inneren des Landes Nordrhein-Westfalen: Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen 2016. Ausgabe 2016.
- [56] DIN 1055-4 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2001/03.
- [57] DIN 1055-4 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2005/03.
- [58] DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2005/07.
- [59] DIN 1055 Blatt 4 – Lastannahmen im Hochbau – Verkehrslasten, Windlast – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1938/06.
- [60] DIN 1055 Blatt 5 – Lastannahmen im Hochbau – Verkehrslasten, Schneelast – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1936/12.
- [61] DIN 1055 Teil 4 – Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1977/05.
- [62] DIN 1055 Teil 4 – Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1986/08.
- [63] DIN 1055 Teil 5 – Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Schneelast und Eislast – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1975/06.
- [64] DIN 1055 Teil 5 – Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten, Schneelast und Eislast – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1994/04.
- [65] DIN EN 1991-1-3/NA – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2012/10.
- [66] DIN EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.
- [67] DIN EN 1991-1-3 – Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.
- [68] DIN EN 1991-1-3/A1 – Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2015/12.
- [69] DIN EN 1991-1-4 – Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.

- [70] E DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2001/04.
- [71] E DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2004/02.
- [72] TGL 20167 Blatt 1 – Lastannahmen für Bauten – Grenzlastfaktoren, Normlasten infolge Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung – Deutsche Demokratische Republik, VEB Fachbuchverlag, 1964/02.
- [73] TGL 20167 Blatt 1 – Lastannahmen für Bauten – Grenzlastfaktoren, Normlasten infolge Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung – Windbelastung – Deutsche Demokratische Republik, VEB Fachbuchverlag, 1971/05.
- [74] TGL 32274/05 – Lastannahmen für Bauwerke – Schneelasten – Windbelastung – Deutsche Demokratische Republik, VEB Fachbuchverlag, 1976/12.
- [75] TGL 32274/07 – Lastannahmen für Bauten – Windlasten – Windbelastung – Deutsche Demokratische Republik, VEB Fachbuchverlag, 1976/12.
- [76] European Association for Panels and Profiles – Qualitätsrichtlinien für Sandwichelemente und Profile – Krefeld, 2017.
- [77] Heermann: Toleranzen von Bestandsfassaden im Hinblick auf energetische Sanierungsmaßnahmen in Stahlleichtbauweise – Bachelorthesis: TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2016.
- [78] IFBS – Internationaler Verband für den Metalleichtbau – Fachregeln des Metalleichtbaus – Zusammenstellung nationaler und europäischer Herstelltoleranzen für Produkte des Metalleichtbaus – Düsseldorf, 2014.
- [79] DIN 18202 – Toleranzen im Hochbau – Bauwerke – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1997/04.
- [80] DIN 18202 – Toleranzen im Hochbau – Bauwerke – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2013/04.
- [81] DIN 18203-3 – Toleranzen im Hochbau – Teil 3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2008/08.
- [82] DIN EN 508-1 – Dachdeckungs- und Wandbekleidungsprodukte aus Metallblech – Spezifikation für selbsttragende Dachdeckungsprodukte aus Stahlblech, Aluminiumblech oder nichtrostendem Stahlblech – Teil 1: Stahl – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2014/08.
- [83] DIN EN 10143 – Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Blech und Band aus Stahl – Grenzabmaße und Formtoleranzen – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2006/09.
- [84] DIN EN 14782 – Selbsttragende Dachdeckungs- und Wandbekleidungselemente für die Innen- und Außenanwendung aus Metallblech – Produktspezifikation und Anforderungen – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2006/03.
- [85] E DIN 18201 – Maßtoleranzen im Hochbau – Allgemeine Begriffe und Zahlenwerte – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 1956/11.
- [86] prEN 1090-4 – Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 4: Technische Anforderungen an tragende, dünnwandige, kaltgeformte Bauelemente und Bauteile für Dach-, Decken-, Boden- und Wandanwendungen aus Stahl – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, in Vorbereitung.
- [87] Beahre, R., Buca, I.: Die wirksame Breite des Zuggurtes von biegebeanspruchten Kassetten. Stahlbau 55, 1986. S. 276–285.
- [88] Bohn, N.: Untersuchungen zur nachträglichen statischen Ertüchtigung von Stahl-Kassettenprofilen mit Leichtbauprofilen. Masterthesis: TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2017.

- [89] Eggersgluß, L.: Analytische und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Stahl-Kassettenprofilen mit einer Außenschale aus Sandwichelementen. Masterthesis: TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2016.
- [90] Heil, W.: Stabilisierung von biegedrillknickgefährdeten Trägern durch Trapezblechscheiben. Stahlbau 63, 1994. S. 169–178.
- [91] Käpplein, S., Misiek, T.: Stabilisierung von Bauteilen durch Sandwichelemente - Kopplung mit quasi-starren Auflagern. Stahlbau 82, 2013. S. 828–832.
- [92] Käpplein, S., Ummenhofer, T., Berner, K.: Stabilisierung von Bauteilen durch Sandwichelemente. Stahlbau 81, 2012. S. 951–958.
- [93] Lange, J., Suppes, A.: Prüfbericht Nr. 12-49p (Rev. c) Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Hybridkonstruktionen. Darmstadt, 2013.
- [94] Raabe, O., Pfaff, U.: Gutachterliche Stellungnahme Nr. Z-1310: für Kassetten Typ K 100/600.1 und K 160/600.1 mit Trapezprofilen Typ T40.1 bzw. Sandwichelementen Typ isowand vario ML80 im Rahmen von orientierenden Vorversuchen. Darmstadt, 2013.
- [95] DIN EN 1993-1-5: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5 – Plattenförmige Bauteile – Deutsches Institut für Normung e.V. – Berlin, 2010/12.
- [96] Hoesch Bausysteme GmbH: Hoesch Siding Plus. Produktbroschüre 2018.
- [97] Beilenhoff: Energetische Dachsanierung von Industriebauten in Stahlleichtbauweise – Bachelorthesis: TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2017.

Anhang B1

Vergleich der anzusetzenden Wind- und Schneelasten bei der Sanierung von Bestandsgebäuden

Das IGF-Vorhaben „Bauen im Bestand – Lösungen für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise“, IGF-Projekt Nr. 18623 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	9
2	Veränderung der Windlastnormen	11
2.1	1938	11
2.2	1977	13
2.3	1986	14
2.4	2001	18
2.5	2005	22
2.6	2010	25
3	Veränderungen der Windlastnormen der DDR	27
3.1	1964	27
3.2	1971	29
3.3	1976	30
4	Beispielhallen für die Auswertung	33
4.1	Halle A	33
4.2	Halle B	38
4.3	Halle C	43
5	Auswertung	48
5.1	Windlast auf Wände für die globale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010	49
5.1.1	Halle A in der Windzone 1 Binnenland	50
5.1.2	Halle A in der Windzone 2 Binnenland	51
5.1.3	Halle A in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	52
5.1.4	Halle A in der Windzone 3 Binnenland	53
5.1.5	Halle A in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	54
5.1.6	Halle A in der Windzone 4 Binnenland	55
5.1.7	Halle A in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	56
5.1.8	Halle A in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	57
5.1.9	Halle B in der Windzone 1 Binnenland	58
5.1.10	Halle B in der Windzone 2 Binnenland	59
5.1.11	Halle B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	60
5.1.12	Halle B in der Windzone 3 Binnenland	61
5.1.13	Halle B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	62
5.1.14	Halle B in der Windzone 4 Binnenland	63

5.1.15	Halle B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	64
5.1.16	Halle B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	65
5.1.17	Halle C in der Windzone 1 Binnenland	66
5.1.18	Halle C in der Windzone 2 Binnenland	67
5.1.19	Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	68
5.1.20	Halle C in der Windzone 3 Binnenland	69
5.1.21	Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	70
5.1.22	Halle C in der Windzone 4 Binnenland	71
5.1.23	Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	72
5.1.24	Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	73
5.2	Windlast auf Wände für die globale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010	74
5.2.1	Halle A (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	75
5.2.2	Halle A (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	76
5.2.3	Halle A (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	77
5.2.4	Halle A (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	78
5.2.5	Halle A (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	79
5.2.6	Halle A (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	80
5.2.7	Halle A (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	81
5.2.8	Halle A (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	82
5.2.9	Halle B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	83
5.2.10	Halle B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	84
5.2.11	Halle B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	85
5.2.12	Halle B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	86
5.2.13	Halle B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	87
5.2.14	Halle B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	88
5.2.15	Halle B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	89
5.2.16	Halle B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	90
5.2.17	Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	91
5.2.18	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	92
5.2.19	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	93
5.2.20	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	94
5.2.21	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	95
5.2.22	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	96

5.2.23	Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	97
5.2.24	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	98
5.3	Windlast auf Dächern für die globale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010	99
5.3.1	Halle A und B in der Windzone 1 Binnenland	100
5.3.2	Halle A und B in der Windzone 2 Binnenland	101
5.3.3	Halle A und B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee . . .	102
5.3.4	Halle A und B in der Windzone 3 Binnenland	103
5.3.5	Halle A und B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . . .	104
5.3.6	Halle A und B in der Windzone 4 Binnenland	105
5.3.7	Halle A und B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	106
5.3.8	Halle A und B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	107
5.3.9	Halle C in der Windzone 1 Binnenland	108
5.3.10	Halle C in der Windzone 2 Binnenland	109
5.3.11	Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	110
5.3.12	Halle C in der Windzone 3 Binnenland	111
5.3.13	Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	112
5.3.14	Halle C in der Windzone 4 Binnenland	113
5.3.15	Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	114
5.3.16	Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	115
5.4	Windlast auf Dächern für die globale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010	116
5.4.1	Halle A und B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	117
5.4.2	Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	118
5.4.3	Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	119
5.4.4	Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	120
5.4.5	Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	121
5.4.6	Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	122
5.4.7	Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	123
5.4.8	Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	124
5.4.9	Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	125
5.4.10	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	126
5.4.11	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee . .	127
5.4.12	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	128
5.4.13	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . .	129

5.4.14	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	130
5.4.15	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	131
5.4.16	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	132
5.5	Windlast auf Wände für die lokale Bemessung in der Bundesrepublik Deutsch- land von 1938 bis 2010	133
5.5.1	Halle A in der Windzone 1 Binnenland	134
5.5.2	Halle A in der Windzone 2 Binnenland	135
5.5.3	Halle A in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	136
5.5.4	Halle A in der Windzone 3 Binnenland	137
5.5.5	Halle A in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	138
5.5.6	Halle A in der Windzone 4 Binnenland	139
5.5.7	Halle A in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	140
5.5.8	Halle A in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	141
5.5.9	Halle B in der Windzone 1 Binnenland	142
5.5.10	Halle B in der Windzone 2 Binnenland	143
5.5.11	Halle B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	144
5.5.12	Halle B in der Windzone 3 Binnenland	145
5.5.13	Halle B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	146
5.5.14	Halle B in der Windzone 4 Binnenland	147
5.5.15	Halle B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	148
5.5.16	Halle B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	149
5.5.17	Halle C in der Windzone 1 Binnenland	150
5.5.18	Halle C in der Windzone 2 Binnenland	151
5.5.19	Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	152
5.5.20	Halle C in der Windzone 3 Binnenland	153
5.5.21	Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	154
5.5.22	Halle C in der Windzone 4 Binnenland	155
5.5.23	Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	156
5.5.24	Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	157
5.6	Windlast auf Wände für die lokale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010	158
5.6.1	Halle A (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	159
5.6.2	Halle A (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	160
5.6.3	Halle A (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	161
5.6.4	Halle A (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	162

5.6.5	Halle A (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . . .	163
5.6.6	Halle A (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	164
5.6.7	Halle A (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	165
5.6.8	Halle A (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	166
5.6.9	Halle B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	167
5.6.10	Halle B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	168
5.6.11	Halle B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee . . .	169
5.6.12	Halle B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	170
5.6.13	Halle B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . . .	171
5.6.14	Halle B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	172
5.6.15	Halle B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	173
5.6.16	Halle B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	174
5.6.17	Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	175
5.6.18	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	176
5.6.19	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee . . .	177
5.6.20	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	178
5.6.21	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . . .	179
5.6.22	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	180
5.6.23	Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	181
5.6.24	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	182
5.7	Windlast auf Dächern für die lokale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010	183
5.7.1	Halle A und B in der Windzone 1 Binnenland	184
5.7.2	Halle A und B in der Windzone 2 Binnenland	185
5.7.3	Halle A und B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee . . .	186
5.7.4	Halle A und B in der Windzone 3 Binnenland	187
5.7.5	Halle A und B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . . .	188
5.7.6	Halle A und B in der Windzone 4 Binnenland	189
5.7.7	Halle A und B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	190
5.7.8	Halle A und B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	191
5.7.9	Halle C in der Windzone 1 Binnenland	192
5.7.10	Halle C in der Windzone 2 Binnenland	193
5.7.11	Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	194
5.7.12	Halle C in der Windzone 3 Binnenland	195
5.7.13	Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	196

5.7.14	Halle C in der Windzone 4 Binnenland	197
5.7.15	Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	198
5.7.16	Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	199
5.8	Windlast auf Dächern für die lokale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010	200
5.8.1	Halle A und B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	201
5.8.2	Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	202
5.8.3	Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee	203
5.8.4	Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	204
5.8.5	Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee	205
5.8.6	Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	206
5.8.7	Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	207
5.8.8	Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	208
5.8.9	Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland	209
5.8.10	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland	210
5.8.11	Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee . .	211
5.8.12	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland	212
5.8.13	Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee . .	213
5.8.14	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland	214
5.8.15	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	215
5.8.16	Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee	216
6	Fazit - Wind	217
7	Veränderungen der Schneelastnormen	218
7.1	1936	218
7.2	1975	219
7.3	1994	222
7.4	2001	223
7.5	2004	226
7.6	2005	229
7.7	2010	230
8	Veränderungen der Schneelastnormen der DDR	231
8.1	1964	231
8.2	1971	233
8.3	1976	234

9	Auswertung der Schneelastveränderung	236
9.1	Vergleich der Schneelast am Standort Dortmund	238
9.2	Vergleich der Schneelast am Standort Aachen	238
9.3	Vergleich der Schneelast am Standort München	239
9.4	Vergleich der Schneelast am Standort Garmisch-Partenkirchen	239
9.5	Vergleich der Schneelast am Standort Hamburg	240
9.6	Vergleich der Schneelast am Standort Rostock	240
9.7	Vergleich der Schneelast am Standort Dresden	241
9.8	Vergleich der Schneelast am Standort Blankenburg	242
10	Fazit - Schnee	243
11	Literaturverzeichnis	244
12	Anhang	246
12.1	Umrechnungsverfahren für Hallen mit Flachdächern	246
12.2	Beispiel 1 - Baujahr 1940	248
12.3	Beispiel 2 - Baujahr 1990	249

1 Motivation

Bei der Sanierung von Hallenfassaden und -dacheindeckungen stellt sich die Frage, inwieweit die angesetzten Wind- und Schneelasten aus der Statik übernommen werden können beziehungsweise angepasst werden müssen.

Diese Arbeit dient dazu einen Überblick über die Veränderungen der Windlastnorm DIN 1055-4 seit 1938 bis zur DIN EN 1991-1-4 und der Schneelastnorm DIN 1055-5 seit 1936 bis zur DIN EN 1991-1-3 zu geben, mit der Fragestellung, ob ein einfacher Ansatz zur Umrechnung der anzusetzenden Belastungen existiert.

Im 2. Kapitel werden die Windnormen, begonnen mit der DIN 1055-4 aus dem Jahr 1938, kurz vorgestellt und die Veränderungen skizziert. Das 3. Kapitel beschäftigt sich mit den in der DDR gültigen Normen zur Windlastbestimmung.

Anhand von drei unterschiedlichen Hallengeometrien werden die anzusetzenden Windlasten in Abhängigkeit vom Baujahr und Standort miteinander verglichen.

Bei dieser Betrachtung werden die vereinfachten Geschwindigkeitsdrücke des Eurocodes verwendet, da die Berechnungsfunktion für die vorhandenen Drücke nicht linear sind und somit die Komplexibilität eines Vergleiches deutlich zunimmt.

Im Kapitel 7 wird die Entwicklung der Schneelastnormen beginnend mit der DIN 1055-5 von 1936 dargestellt. Die Schneelastnormen der DDR werden in Kapitel 8 betrachtet.

Eine Übersicht der betrachteten Ausgaben der Windnorm liefert Tabelle 1.

Normtitel	Ausgabe	Anhänge / Kommentare
DIN 1055-4	1938-06	
	1977-05	
	1986-08	A1: 1987
	2001-03	(Entwurf)
	2005-03	B1:2006-03
DIN EN 1991-1-4	2010-12	A1, NA

Tabelle 1: Übersicht der Normausgaben zur Bestimmung der Windlast

Eine Übersicht der Schneenormen liefert die nachfolgende Tabelle.

Normtitel	Ausgabe	Anhänge / Kommentare
DIN 1055-5	1936-12	
	1975-06	
	1994-04	A1
	2001-04	(Entwurf)
	2004-02	(Entwurf)
	2005-07	
DIN EN 1991-1-3	2010-12	NA und A1

Tabelle 2: Übersicht der Normausgaben zur Bestimmung der Schneelast

Um einen Überblick über die Veränderungen der Wind- und Schneelastnormen in ganz Deutschland erlangen zu können, werden zusätzlich die Normen der DDR vorgestellt.

Eine Übersicht der Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (TGL) liefert Tabelle 3.

Normtitel	Ausgabe	Kommentar
TGL 20167	1963	Entwurf
TGL 20167	1967	
TGL 20167	1971	Entwurf
TGL 32274/07	1976	
TGL 32274/05	1976	

Tabelle 3: Übersicht der Normausgaben der DDR

2 Veränderung der Windlastnormen

2.1 1938

Nach der DIN 1055-4 aus dem Jahr 1938 berechnet sich die Windlast, die auf ein Bauwerk einwirkt nach der Formel

$$w = c \cdot q$$

mit dem Staudruck q in $\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$ und einem einheitslosen Beiwert c , welcher die Gebäudegeometrie berücksichtigt. Diese Formel behält ihre Gültigkeit für alle nachfolgenden Normen. Lediglich die Notation ändert sich.

Der Staudruck q variierte dabei abhängig von der Höhe. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Staudrücke.

1	2	3
Höhe über Gelände m	Windgeschwindigkeit v m/s	Staudruck q kp/m ²
von 0 bis 8	28,3	50
über 8 bis 20	35,8	80
über 20 bis 100	42,0	110
über 100	45,6	130

Abbildung 1: Staudruck q [1]

Der Beiwert c gibt jeweils einen Faktor für den Druck- bzw. Soganteil des angreifenden Windes an.

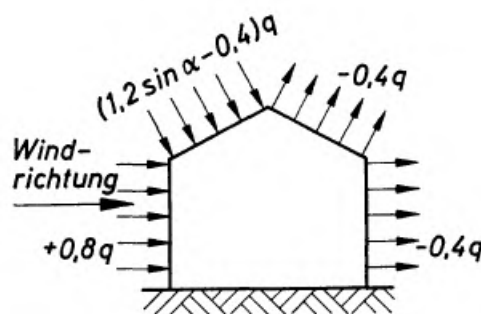


Abbildung 2: Beiwert c [1]

Somit wurde zwischen zwei unterschiedlichen Wandbereichen unterschieden: Die Seite, welche dem Winddruck direkt ausgesetzt ist, und die Oberfläche, die sich auf der gegenüberliegenden Seite befindet. Sog parallel zum Wind wurde nicht berücksichtigt. Die Windlast auf Dächern entspricht auf der windabgewandten Seite dem Wert für die Wandfläche. Auf der windzugewandten Seite ist die Last abhängig vom Dachneigungswinkel. Diese Verteilung gilt für die Haupttragwerke. Bei der Bemessung der einzelnen Tragglieder müssen die Druckwerte um 25 % erhöht werden.

Zusätzlich wird in der Norm darauf hingewiesen, dass Sogspitzen am Übergang von Wand zur Dachfläche auftreten können. Genauere Angaben werden jedoch nicht getroffen.

Bei Gebäuden, welche auf Anhebungen, die sich deutlich über dem umliegenden Gelände befinden, errichtet wurden, ist ein Mindeststaudruck von $100 \frac{\text{kP}}{\text{m}^2}$ anzusetzen.

2.2 1977

Im Jahr 1977 wurde die DIN 1055-4:1977 eingeführt, deren Geltungsbereich sich auf nicht schwingungsanfällige Bauwerke beschränkt (dazu zählen beispielsweise ohne Nachweis Industriegebäude mit einer Schlankheit von $h/b \leq 5$). Der Staudruck wurde von nun an nicht mehr in der Einheit $\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$ sondern in $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ angegeben. Abbildung 3 zeigt die Staudrücke in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe.

1	2	3
Höhe über Gelände m	Windgeschwindigkeit v m/s	Staudruck q kN/m ² (kp/m ²)
von 0 bis 8	28,3	0,5 (50)
über 8 bis 20	35,8	0,8 (80)
über 20 bis 100	42,0	1,1 (110)
über 100	45,6	1,3 (130)

Abbildung 3: Staudruck q [2]

Der Umrechnungsfaktor zwischen $\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$ und $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ beträgt 10^{-2} .

Die Größen für den Staudruck haben sich demnach im Vergleich zur Vorgängernorm nicht verändert.

Zu dem Beiwert c werden in dieser Normausgabe keine Angaben gemacht. Diese Beiwerte sind dem Entwurf der DIN 1055 Teil 45 „Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Aerodynamische Formbeiwerte für Baukörper“ zu entnehmen, aus dem später die nachfolgende Norm entwickelt wurde.

Für die Bemessung der einzelnen Tragglieder sind die Werte für Druck auch in dieser Normausgabe um 25 % zu erhöhen.

2.3 1986

Mit der Veröffentlichung der DIN 1055-4:1986 wurden die Vorschriften aus der DIN 1055-4:1977 und der DIN 1055-45 in einem Normteil zusammengefasst.

Im Vergleich zu Normausgabe von 1938 wurden Flächen, die parallel zur Windrichtung verlaufen, mit einem separaten Beiwert berücksichtigt.

Die entsprechende Grafik der Norm zeigt Abbildung 4.

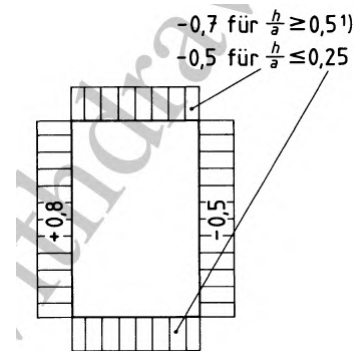


Abbildung 4: Druck- und Sogverteilung eines Bauwerks [3]

Die Beiwerte für Flächen, auf die der Wind senkrecht einwirkt, wurden ebenfalls angepasst. Wohingegen die Staudruckwerte weiterhin unverändert geblieben sind.

Die Berechnung der Belastung auf Dachflächen wurde sowohl für die Luv- als auch für die Leeseite abhängig vom Dachneigungswinkel.

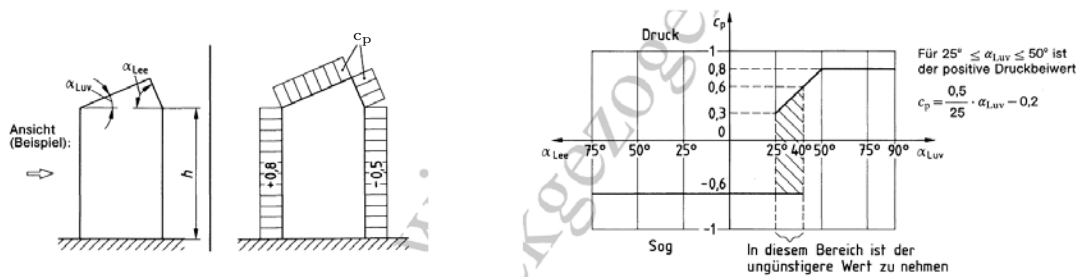


Abbildung 5: Lastbild und Beiwerte c_p [3]

Zusätzlich zu dem Windzug an der Gebäudeseite kann es in den Eckbereichen zu Sogspitzen kommen. Abbildung 6 zeigt die Angriffsfläche und den Beiwert dieser Sogspitzen.

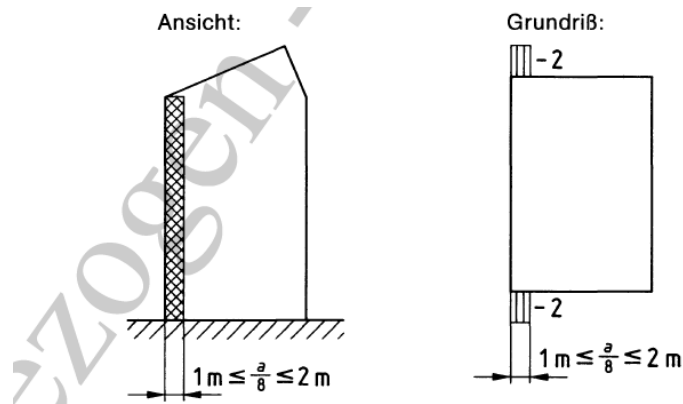


Abbildung 6: Sogspitzen an Gebäudeecken [3]

Für den Lastfall, dass der Windangriff unter einem Winkel von 45° zur Wand erfolgt, ergeben sich zusätzlich Sogspitzen in den Randbereichen des Dachs. Hierbei wird zwischen Flachdächern und Satteldächern unterschieden.

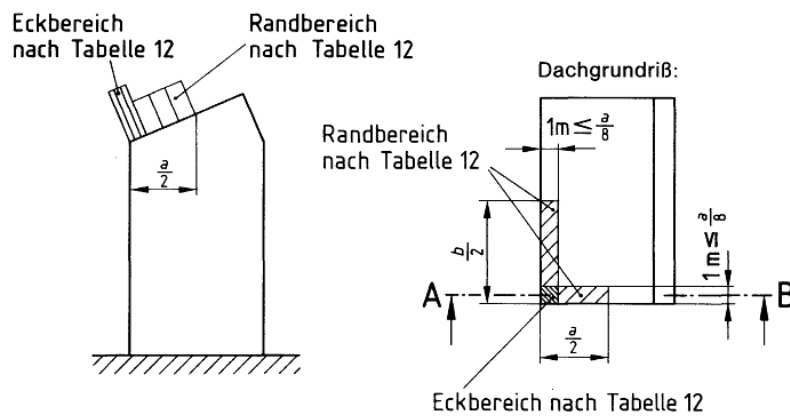


Abbildung 7: Sogspitzen bei Satteldächern [3]

Für Flachdächer werden genauere Werte angegeben.

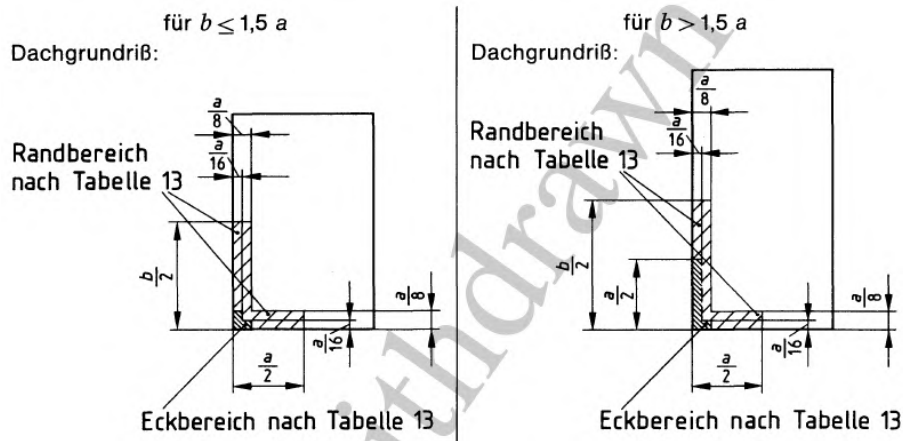


Abbildung 8: Sogspitzen bei Flachdächern [3]

Die Beiwerte c_p können der Abbildung 9 entnommen werden.

Tabelle 12.

Sogspitzen für angegebene Teilbereiche von Dächern beliebiger Neigung		
Dachneigungswinkel α	Beiwert c_p	
	im Eckbereich	im Randbereich
$\leq 25^\circ$	- 3,2	- 1,8
$25^\circ < \alpha \leq 35^\circ$	- 1,8	- 1,1
$> 35^\circ$	keine „Sogspitzen“	

Tabelle 13.

Sogspitzen für angegebene Teilbereiche von Flachdächern			
Abmessungsverhältnisse		Beiwert c_p	
b/a	h/a	im Eckbereich	im Randbereich
$\leq 1,5$	$\leq 0,4$	- 2	- 1
	$> 0,4$	- 2,8	- 1,5
$> 1,5$	$\leq 0,4$	- 2,5	- 1
	$> 0,4$	- 3	- 1,7

Abbildung 9: Beiwerte c_p für flache und geneigte Dächer [3]

Diese Sogspitzen dienen lediglich der Bemessung von Einzelbauteilen. Als Beispiel für Einzelbauteile führt die Norm Dach- und Wandtafeln auf. Die Werte für Druck sind auch in dieser Norm für die Bemessung einzelner Bauteile um 25 % zu erhöhen.

In dieser Normausgabe wird darauf hingewiesen, dass das beschriebene Windlastmodell sehr vereinfacht ist. So ist beispielsweise die Auftretenswahrscheinlichkeit der maximalen Windlasten je nach Region unterschiedlich. Die Norm verweist dabei auf die Windgeschwindigkeitszonenkarte der DIN 1056: 1984 „Freistehende Schornsteine in Massivbau“, siehe Abbildung 10. „Für wirklichkeitsnähere Ansätze muss generell auf die Grundlagen der modernen Windlasttheorie zurückgegriffen werden“, [3].



Abbildung 10: Windgeschwindigkeitszonenkarte [14]

2.4 2001

Der Normentwurf aus dem Jahr 2001 brachte eine große Umstrukturierung mit sich. Eine vereinfachte Ermittlung des Staudrucks, welcher jetzt als Geschwindigkeitsdruck bezeichnet wurde, war nur noch bei einer Gebäudehöhe bis zu 10 m über Geländeoberfläche zulässig. Außerdem wurde eine Windzonenkarte in die Norm integriert, sodass der Geschwindigkeitsdruck abhängig von der Region, in der sich das Bauwerk befindet, wurde, siehe Abbildung 11.

Windlastzone	Geschwindigkeitsdruck q kN/m^2
1	0,7
2	0,9
3	1,2
4	1,5

Abbildung 11: Geschwindigkeitsdrücke der Windlastzonen [5]

Abbildung 12 zeigt die Windzonenkarte, die Deutschland in vier verschiedene Bereiche gliedert, in denen jeweils ein separater Geschwindigkeitsdruck anzusetzen ist.

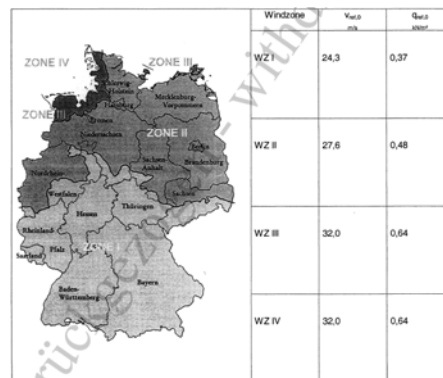


Abbildung 12: Windzonenkarte Deutschlands [5]

Neben dem vereinfachten Verfahren zur Ermittlung des Geschwindigkeitsdrucks, kann dieser auch über eine Formel in Abhängigkeit der Gebäudehöhe z und des Beiwertes $q_{ref,0}$ bestimmt werden. Sowohl dieser Beiwert, als auch die zugrundeliegende Formel sind von der Windlastzone abhängig.

Für die Windlastzonen 1 bis 3 errechnen sich die Geschwindigkeitsdrücke zu

$$z > 4,0 \text{ m} \quad q = 2,1 \cdot q_{\text{ref},0} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24}$$

$$z \leq 4,0 \text{ m} \quad q = 1,7 \cdot q_{\text{ref},0}$$

Für die Windlastzone 4 lassen sich die Geschwindigkeitsdrücke wie folgt berechnen:

$$z > 2,0 \text{ m} \quad q = 2,6 \cdot q_{\text{ref},0} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19}$$

$$z \leq 4,0 \text{ m} \quad q = 1,9 \cdot q_{\text{ref},0}$$

Eine zusätzliche Änderung besteht in der Aufteilung der Bauwerksoberflächen. Es wird nicht mehr nur in Druck und Sog, senkrecht und parallel zur Windrichtung unterschieden. Stattdessen werden die Gebäudeaußenwände in insgesamt 5 Bereiche gegliedert, auf denen jeweils eine andere Windbelastung anzusetzen ist. Abbildung 13 zeigt die anzunehmende Gebäudeaufteilung. Für jeden Bereich existiert ein eigener Druckbeiwert $c_{pe,10}$ bzw. $c_{pe,1}$. Der Beiwert $c_{pe,10}$ wird verwendet, wenn die Lasteinzugsfläche größer 10 m^2 ist. Ist die Lasteinzugsfläche kleiner oder gleich 1 m^2 , wird der Druckbeiwert $c_{pe,1}$ angewendet. Für Flächen, die zwischen diesen Größen liegen, kann mit der nachfolgenden Formel interpoliert werden.

$$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot \lg(A)$$

Mit der Lasteinzugsfläche A .

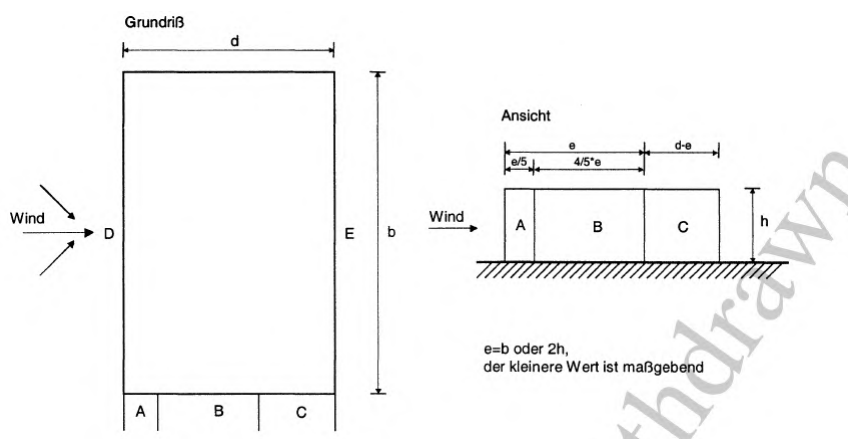


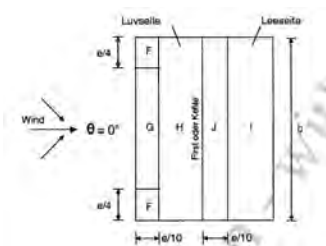
Abbildung 13: Gliederung in Gebäudebereiche [5]

Die zugehörigen Außendruckbeiwerte können der folgenden Abbildung entnommen werden.

Bereiche	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
≤ 1	-1,7	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	-0,5	+0,8	+1,0	-0,5	-0,5
≥ 4	-1,7	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	-0,5	+0,6	+1,0	-0,5	-0,5

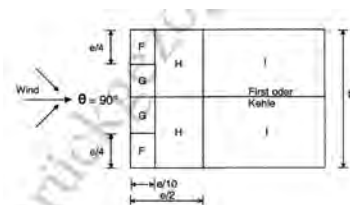
Abbildung 14: Außendruckbeiwerte für rechteckige Gebäude [5]

Die Dachfläche wurde ebenfalls in verschiedene Bereiche gegliedert, in denen unterschiedliche Druck- bzw. Sogbeanspruchungen angesetzt werden müssen. Hierbei wird zwischen zwei verschiedenen Windrichtungen unterschieden.



Neigungs- winkel α	Anströmrichtung $\theta = 0^\circ$									
	Bereich F		Bereich G		Bereich H		Bereich I		Bereich J	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8	-0,8	-0,6	-0,6	-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-0,5	-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,6	-0,6	+0,2	-0,6
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2	+0,2	-0,6	-0,6
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-1,0	-1,5
30°	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3
45°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,4	+0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-0,3
60°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3
75°	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3

Abbildung 15: Aufteilung der Dachfläche und Beiwerte für die Windrichtung 0° bei Satteldächern [5]

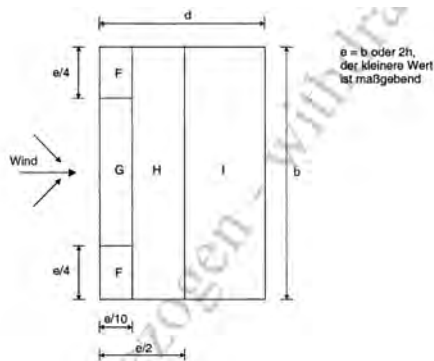


Neigungs- winkel α	Anströmrichtung $\theta = 90^\circ$									
	Bereich F		Bereich G		Bereich H		Bereich I		Bereich J	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-0,9	-1,2	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,8	-0,8	-1,2	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,6	-0,6	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-0,6	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-0,6	+0,2	+0,2
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

Für die Anströmrichtung $\theta = 0^\circ$ und einen Neigungswinkel von $\alpha = +15^\circ$ bis $+30^\circ$ ändert sich der Druck schnell zwischen positiven und negativen Werten; daher werden sowohl der positive als auch der negative Wert angegeben. Für Dachneigungen zwischen den angegebenen Werten darf linear interpoliert werden, sofern nicht das Vorzeichen der Druckbeiwerte wechselt.

Abbildung 16: Aufteilung der Dachfläche und Beiwerte für die Windrichtung 90° bei Satteldächern [5]

Für Flachdächer kann die Aufteilung der Geometrie der Abbildung 17 entnommen werden.



	Bereich							
	F		G		H		I	
	$c_{s,10}$	$c_{s,1}$	$c_{s,10}$	$c_{s,1}$	$c_{s,10}$	$c_{s,1}$	$c_{s,10}$	$c_{s,1}$
scharfkantiger Traufbereich	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	+0,2
$h_p/h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	-0,6	+0,2
mit Attika	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	-0,6	+0,2
$h_p/h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	-0,6	+0,2
abgerundeter Traufbereich	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4	-0,3	$\pm 0,2$
$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3	-0,3	-0,3	$\pm 0,2$
$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,6	-0,3	-0,3	-0,3	$\pm 0,2$
abgeschrägter Traufbereich	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3	-0,3	$\pm 0,2$
$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4	-0,4	-0,4	$\pm 0,2$
$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5	-0,5	-0,5	$\pm 0,2$

Abbildung 17: Aufteilung der Dachfläche und Beiwerte bei Flachdächern [5]

Bei den Nachweisen der Verankerung der Gebäudehülle und ihrer Standsicherheit sind die aerodynamischen Beiwerte um 10 % zu erhöhen.

2.5 2005

Im März 2005 erlangte dann die nächste Fassung der DIN 1055-4 ihre Gültigkeit. Die einzelnen Windzonen wurden weiter unterteilt in Unterzonen und die Geschwindigkeitsdrücke konnten ab jetzt bis zu einer Gebäudehöhe von 25 m vereinfacht bestimmt werden. Abbildung 18 stellt die vereinfachten Geschwindigkeitsdrücke dar.

Windzone		Geschwindigkeitsdruck q in kN/m^2 bei einer Gebäudehöhe h in den Grenzen von		
		$h \leq 10 \text{ m}$	$10 \text{ m} < h \leq 18 \text{ m}$	$18 \text{ m} < h \leq 25 \text{ m}$
1	Binnenland	0,50	0,65	0,75
2	Binnenland	0,65	0,80	0,90
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	1,00	1,10
3	Binnenland	0,80	0,95	1,10
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,20	1,30
4	Binnenland	0,95	1,15	1,30
	Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,25	1,40	1,55
	Inseln der Nordsee	1,40	–	–

Abbildung 18: Vereinfachte Geschwindigkeitsdrücke [6]

Die zugehörige Windzonenkarte zeigt Abbildung 19. Die Grenzen der einzelnen Windzonen haben sich im Vergleich zur DIN 1055-4:2001 verschoben. Außerdem haben sich die Werte für q_{ref} und v_{ref} verändert.

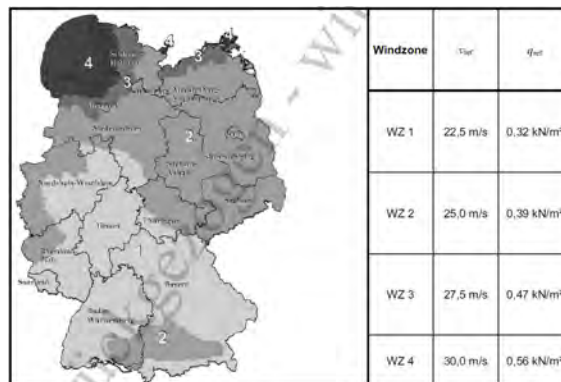


Abbildung 19: Windzonenkarte Deutschlands [6]

Die Formeln zur genaueren Berechnung der Geschwindigkeitsdrücke können Abbildung 20 entnommen werden.

a) im Binnenland (Mischprofil der Geländekategorien II und III):

$$q(z) = 1,5 \times q_{ref} \quad \text{für } z \leq 7 \text{ m} \quad (10)$$

$$q(z) = 1,7 \times q_{ref} \left(\frac{z}{10}\right)^{0,37} \quad \text{für } 7 \text{ m} < z \leq 50 \text{ m} \quad (11)$$

$$q(z) = 2,1 \times q_{ref} \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24} \quad \text{für } 50 \text{ m} < z \leq 300 \text{ m} \quad (12)$$

b) in küstennahen Gebieten sowie auf den Inseln der Ostsee (Mischprofil der Geländekategorien I und II):

$$q(z) = 1,8 \times q_{ref} \quad \text{für } z \leq 4 \text{ m} \quad (13)$$

$$q(z) = 2,3 \times q_{ref} \left(\frac{z}{10}\right)^{0,27} \quad \text{für } 4 \text{ m} < z \leq 50 \text{ m} \quad (14)$$

$$q(z) = 2,6 \times q_{ref} \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19} \quad \text{für } 50 \text{ m} < z \leq 300 \text{ m} \quad (15)$$

c) auf den Inseln der Nordsee (Geländekategorie I):

$$q(z) = 1,1 \text{ kN/m}^2 \quad \text{für } z \leq 2 \text{ m} \quad (16)$$

$$q(z) = 1,5 \times q_{ref} \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19} \text{ kN/m}^2 \quad \text{für } 2 \text{ m} < z \leq 300 \text{ m} \quad (17)$$

Abbildung 20: Genauere Berechnung der Geschwindigkeitsdrücke[6]

Fassaden wurden auch weiterhin in fünf Bereiche gegliedert. Die zugehörigen Außendruckbeiwerte können der nachfolgenden Abbildung 21 entnommen werden, wobei es sich bei den $c_{pe,10}$ -Werte des D-Bereiches um Druck handelt.

Bereich	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
≥ 5	-1,4	-1,7	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	-0,8	+1,0	-0,5	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	-0,8	+1,0	-0,5	-0,7
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	-0,8	+1,0	-0,3	-0,5

Abbildung 21: Außendruckbeiwerte für rechteckige Bauwerke [6]

Die $c_{pe,1}$ -Werte, sowie die Werte aller Lasteinzugsflächen $< 10 \text{ m}^2$, sind hierbei nur für die Ankerkraftberechnung von Bauteilen, die unmittelbar durch Windbelastung beansprucht werden, zu verwenden, sowie zum Verankerungsnachweis.

Bei Flachdächern sind sowohl die Unterteilung der Dachfläche als auch die Beiwerte identisch geblieben. Bei den Satteldächern erfolgte eine Erweiterung der Tabelle für eine

Dachneigung von 10° aus linearer Interpolation. Zusätzlich erfolgten ein paar geringfügige Änderungen. Die in Abbildung 22 rot markierten Bereiche sind die im Vergleich zum Normentwurf veränderten Werte.

Anströmrichtung $\theta = 0^\circ$									
Neigungswinkel α	Bereich								
	F		G		H		I		J
	e_{perp}	e_{par}	e_{perp}	e_{par}	e_{perp}	e_{par}	e_{perp}	e_{par}	e_{par}
-45°	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,6	-1,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-1,4
-15°	-2,5	-2,0	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-0,7	-1,2
5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,6 / + 0,2	-0,6 / + 0,2	
10°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6 / + 0,2	-0,6 / + 0,2	
15°	-1,3	-2,2	-1,0	-1,7	-0,4	-1,0	-0,5 / + 0,2	-0,6 / + 0,2	
30°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3	-0,8	-0,4	-1,0	-1,5
45°	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2
60°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
75°	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8

Anströmrichtung $\theta = 90^\circ$									
Neigungswinkel α	Bereich								
	F		G		H		I		J
	e_{perp}	e_{par}	e_{perp}	e_{par}	e_{perp}	e_{par}	e_{perp}	e_{par}	e_{par}
-45°	1,4	-2,0	1,2	-2,0	-1,0	-1,3	0,9	1,2	
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2	
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2	
5°	1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2	
10°	1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6 / + 0,2	-1,2	
15°	1,4	-2,1	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6 / + 0,2	-1,2	
30°	1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6	-1,2	
45°	1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	-1,2	
60°	1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-1,2	
75°	1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	-1,2	

Abbildung 22: Beiwerte für Satteldächer in Abhängigkeit der Anströmrichtung [6]

2.6 2010

Im Dezember 2010 wurde dann die erste europäische Windlastnorm EN 1991-1-4 eingeführt, welche sich kaum von der DIN 1055-4:2005 unterscheidet. Die Geschwindigkeitsdrücke der einzelnen Windzonen sind sowohl für die vereinfachte Ermittlung als auch für die genauere Ermittlung mittels Formeln identisch geblieben. Auch die Beiwerte für die Gebäudegeometrie wurden übernommen.

Die Einteilung der Wandflächen zeigt Abbildung 23.

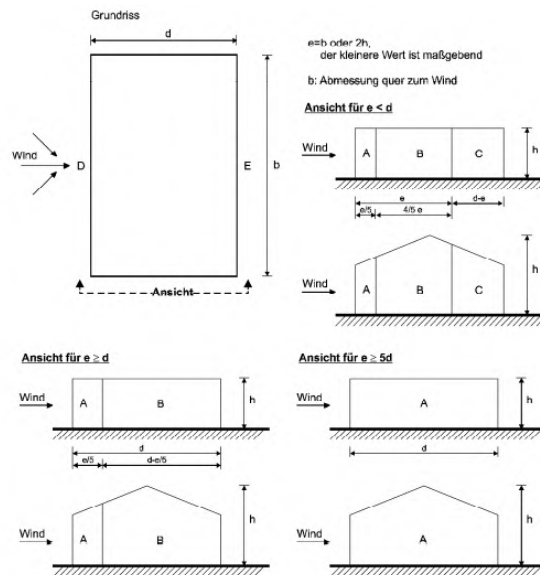


Abbildung 23: Einteilung der Wandflächen [18]

In Abbildung 24 sind die Außendruckbeiwerte für die unterschiedlichen Wandbereiche angegeben. Die Außendruckbeiwerte werden auch als globale ($c_{pe,10}$) und lokale ($c_{pe,1}$) Druckbeiwerte bezeichnet. Die lokalen werden hierbei zur Bemessung von Verankerungen oder kleiner Bauteile verwendet. Die Bemessung des Gesamttragwerks erfolgt mit den $c_{pe,10}$ -Werten.

Bereich	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
≥ 5	-1,4	-1,7	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	+0,8	+1,0	-0,5	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	-0,5

Abbildung 24: Außendruckbeiwerte für die Wandbereiche [19]

Die Aufteilung der Dachflächen erfolgt analog zur DIN 1055-4:2005. Bei den Außendruckbeiwerten ergaben sich geringfügige Abweichungen, welche den Abbildungen 25 und 26 entnommen werden können.

Dachtyp		Bereich							
		F		G		H		I	
		C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}
scharfkantiger Traufbereich		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
mit Attika	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Abgerundeter Traufbereich	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8		-0,4	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4		-0,3	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8		-0,3	+0,2	-0,2
mansardenartig abgeschrägter Traufbereich	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5		-0,3	+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9		-0,4	+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9		-0,5	+0,2	-0,2

Abbildung 25: Außendruckbeiwerte für Flachdächer [18]

Neigungswinkel α	Bereich für die Anströmrichtung $\theta = 0^\circ$									
	F		G		H		I		J	
	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}
-45°	-0,6		-0,6		-0,6		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8	-0,6	-0,6	-0,8	-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-0,7	-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,9	-1,2	+0,2		+0,2	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,9	-1,2	-0,6		+0,2	
15°	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	-0,6		-0,6	
30°	-0,8	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3	-0,4	-1,0		-1,5	
45°	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
60°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2	-0,4	-0,4		-0,5	
75°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,4	+0,0	+0,0		+0,0	
90°	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,2	-0,2	-0,3		-0,3	
105°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,6	+0,0	+0,0		+0,0	
135°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7		+0,7	

Neigungswinkel α	Bereich für die Anströmrichtung $\theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}	C _{pe,10}	C _{pe,1}
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	-1,2
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	-1,2
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	-1,2
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	-1,2
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	-1,2

Abbildung 26: Außendruckbeiwerte für Satteldächer [18]

3 Veränderungen der Windlastnormen der DDR

In der Deutschen Demokratischen Republik waren die DI-Normen der Bundesrepublik Deutschland nicht gültig. Lastannahmen für Bauten konnten den Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (kurz TGL) entnommen werden. Der Aufbau der Norm und die Windlastberechnung lassen sich gut mit den damaligen DI-Normen vergleichen.

3.1 1964

Im Februar 1964 erschien die TGL 20167, welche sich mit Lasten aus Verkehr-, Schnee- und Windbeanspruchungen auseinandersetzt. Sie unterschied sich in den Windlastannahmen nicht von dem im November 1963 erschienen Normentwurf. Analog zur DIN berechnet sich die so genannte Normlast p_n zu

$$p_n = q_0 \cdot c$$

mit dem Staudruck q_0 und dem Beiwert c , welcher die Gebäudegeometrie berücksichtigt.

Der Staudruck ist auch in der TGL abhängig von der Gebäudehöhe.

Höhe über Gelände m	Normgeschwindigkeit v des Windes m/s	Staudruck q_0 kp/m ²
0 bis 10	29,6	55
20	34,6	75
40	40,0	100
100	43,8	120
350 und mehr	51,4	165

Abbildung 27: Staudruck q [21]

Die so genannte Rechnungslast ergibt sich durch Multiplikation der Normlast mit dem Grenzlastfaktor n .

$$p = p_n \cdot n$$

Der Grenzlastfaktor kann der Abbildung 28 entnommen werden.

Bauwerk, Montagelastfall oder Bauzustand	Lastfaktor n
Wohn-, Gesellschafts-, Industrie- und Landwirtschaftsbauten	1,2
turmartige Bauwerke $\frac{\text{Bauwerkshöhe}}{\text{Bauwerksbreite}} \geq 5$	1,3 ^{x3)}
Montagelastfall oder kurzzeitige Bauzustände, wie sie bei einem kontinuierlichen Bauablauf auftreten	1,0 ^{x4)}

Abbildung 28: Grenzlastfaktoren [23]

Diese Staudrücke dürfen bei Gebäudehöhen $\leq 5,0$ m um 25 % abgemindert werden. Bei Bauwerken in bestehender geschlossener Bebauung kann der Staudruck auf 80 % verringert werden. Allerdings darf nur eine der beiden Abminderungen vorgenommen werden. Der aerodynamischer Beiwert c für Wand- und Dachflächen kann der Abbildung 29 entnommen werden.

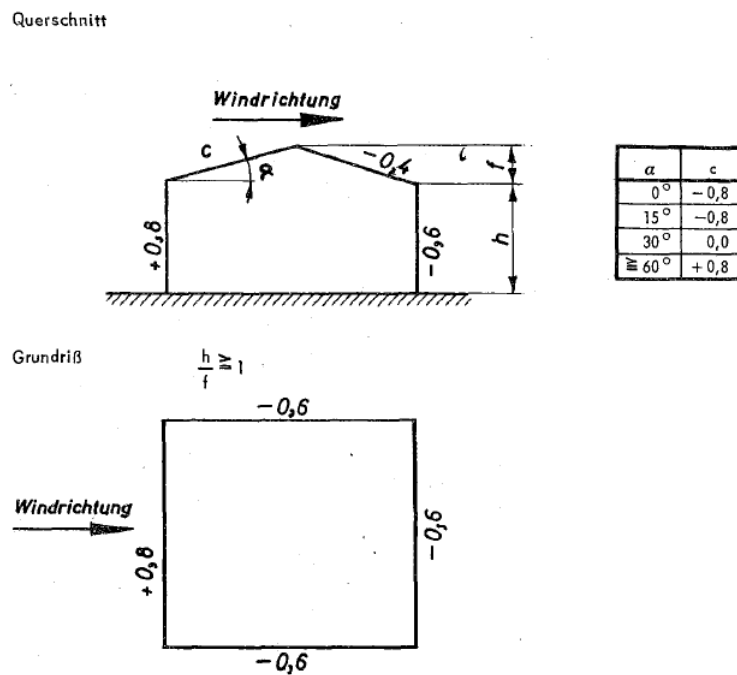


Abbildung 29: Aerodynamischer Beiwert c [21]

3.2 1971

Im Jahr 1971 erschien ein Normentwurf, der für Dachflächen den Beiwert c_s einführt, welcher Sogspitzen im First- und Randbereich berücksichtigt. Die anzusetzende Windlast auf Wandflächen ist identisch zur Normausgabe von 1964. Die aerodynamischen Beiwerte können der Abbildung 30 entnommen werden.

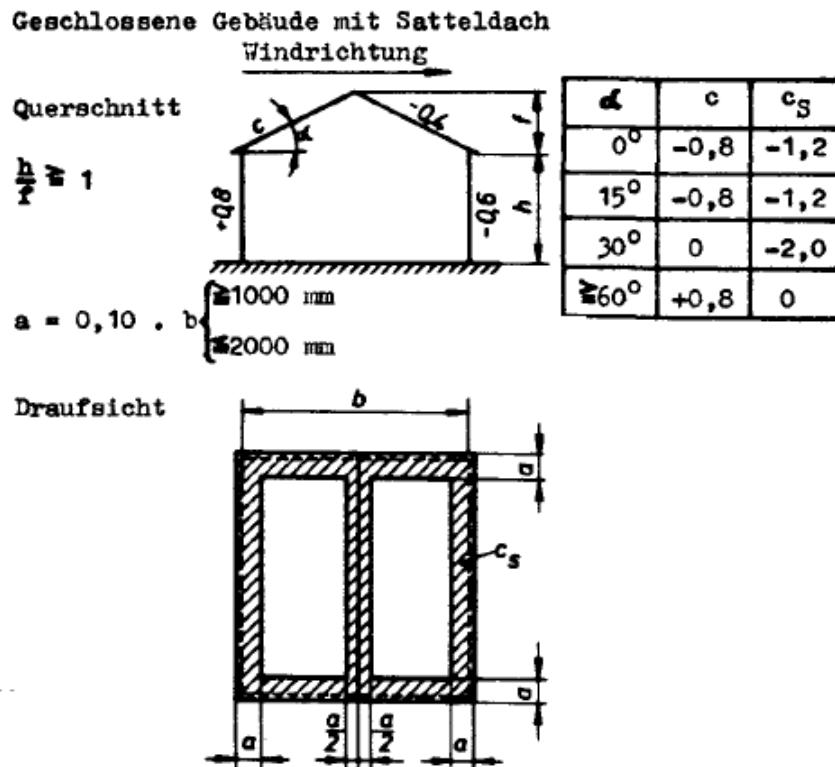


Abbildung 30: Aerodynamischer Beiwert c [22]

Die c_s -Werte werden dabei zusätzlich zu den c-Werten angesetzt, allerdings nur bei der Bemessung der Einzelementenverankerung. Bei den Standsicherheitsnachweisen findet der c_s -Wert keine Berücksichtigung.

Bei Dachneigungen zwischen $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ muss der c_s -Wert im Firstbereich nicht berücksichtigt werden.

3.3 1976

Mit der TGL 32274/07, welche eine reine Windlastnorm war, änderte sich die Einheit von $\frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$ zu $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$. Die Staudrücke änderten sich sonst jedoch nicht.

Höhe über Gelände m	Normgeschwindigkeit v m/s	Staudruck q_o kN/m ²
bis 10	29,6	0,55
20	34,6	0,75
40	40,0	1,00
100	43,8	1,20
ab 350	51,4	1,65

Abbildung 31: Staudruck q [23]

Eine Abminderung des Staudrucks auf 75 % ist bei Gebäudehöhen $\leq 5,0$ weiterhin zulässig. Außerdem kann eine Verringerung des anzusetzenden Drucks für Bauwerke in geschützter Lage nach Abbildung 32 erfolgen.

Höhe über Gelände in m	bis 10	über 10 bis 20	über 20 bis 40	über 40 bis 100	über 350
Abminderungsfaktor ω	0,65	0,71	0,77	0,86	1,00

Abbildung 32: Abminderungsfaktoren ω für Gebäude in geschützter Lage [23]

Die Grenzlastfaktoren sind in den Normausgaben von 1964 und 1976 identisch. Die aerodynamischen Beiwerte sind in dieser Normausgabe sowohl für Dach- als auch für Wandflächen abhängig vom Längen zu Breitenverhältnis und vom Höhen zu Breitenverhältnis.

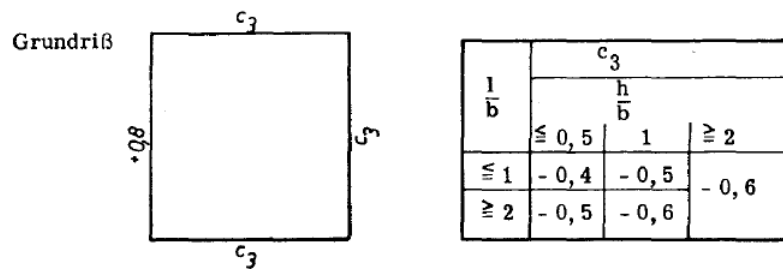


Abbildung 33: Aerodynamische Beiwerte [23]

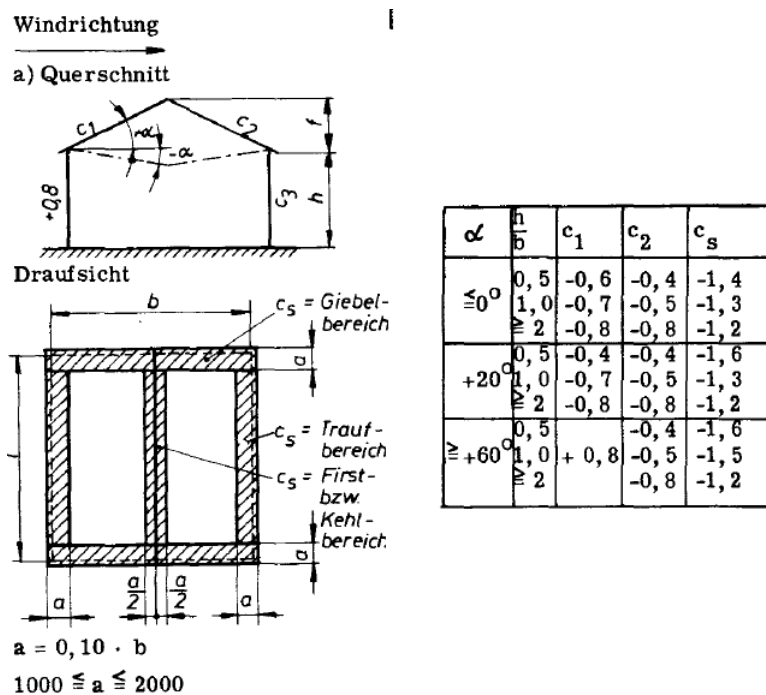


Abbildung 34: Aerodynamische Beiwerte für Dachflächen [23]

Die c_s -Wert ist hierbei zusätzlich zu dem aerodynamischen Beiwert c zu werden, allerdings nur bei der Verankerungsbemessung. Der Standsicherheitsnachweis des Bauwerks erfolgt unabhängig dieser c_s -Werte.

Bei Dachneigungen zwischen $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ darf auch nach dieser Normausgabe der c_s -Wert im Firstbereich vernachlässigt werden.

Bei Windbeanspruchung parallel zum First werden die aerodynamischen Beiwerte nach der Tabelle in Abbildung 34 für eine Dachneigung von $\alpha = 0^\circ$ bestimmt.

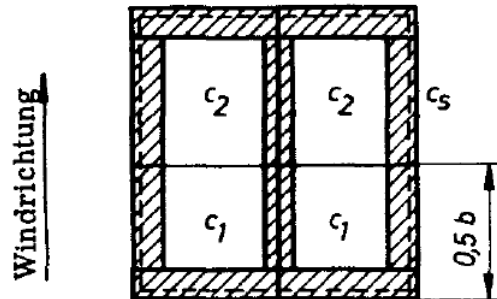


Abbildung 35: Aerodynamische Beiwerte für Dachflächen für Wind parallel zum First [23]

4 Beispielhallen für die Auswertung

Um einen konkreten Vergleich zwischen den anzusetzenden Windlasten aufstellen zu können, werden die Einwirkungen für drei fiktive Hallen ermittelt. Bei allen drei Bauwerken handelt es sich um gedrungene Hallengeometrien mit einem 11° geneigtem Satteldach. Bei zwei der drei Hallen wurde die Grundrissgeometrie von Musterhallen des Bauforums Stahl gewählt.

4.1 Halle A

Die erste Halle, im weiteren Verlauf als Halle A bezeichnet, hat eine Abmessung von $12\text{m} \times 60\text{m} \times 4\text{m}$.

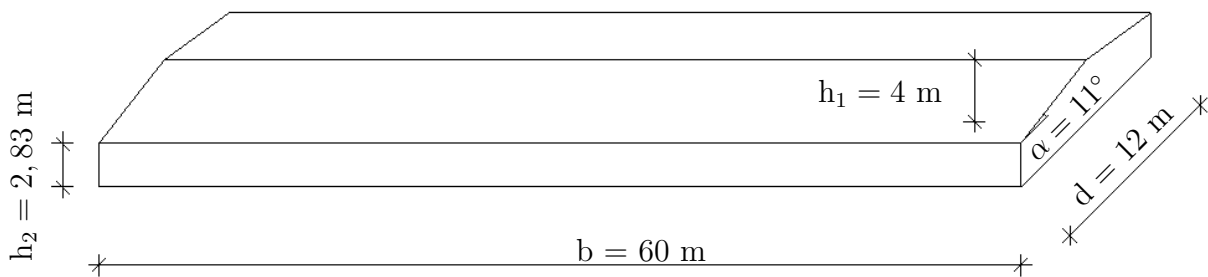


Abbildung 36: Geometrie Halle A

Unter der Annahme, dass der Wind senkrecht auf die längere Gebäudeseite trifft, ergeben sich nach unterschiedlichen Normen folgenden Lastbilder für die globale Bemessung (linkes bzw. oberes Lastbild) und für die lokale Bemessung (rechtes bzw. unteres Lastbild):

$-0,4 \cdot q$	$-0,4 \cdot q$
$-0,4 \cdot q$	$-0,4 \cdot q$
$-0,171 \cdot q$	$-0,171 \cdot q$
$0,8 \cdot q$	$1,0 \cdot q$

Abbildung 37: Lastbild Halle A 1938

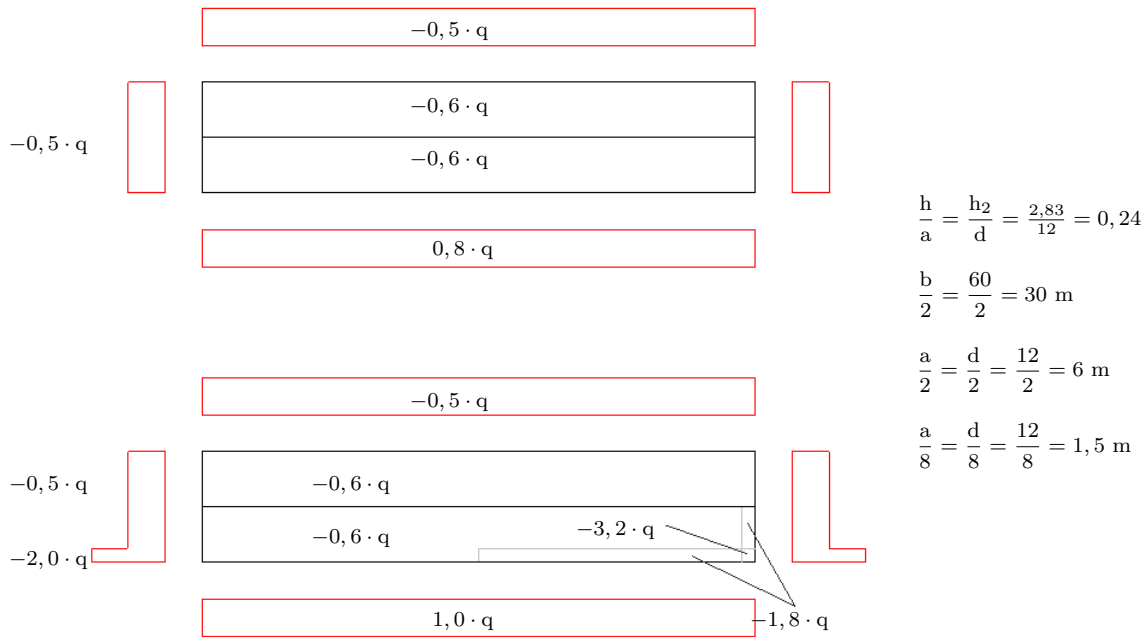


Abbildung 38: Lastbild Halle A 1986

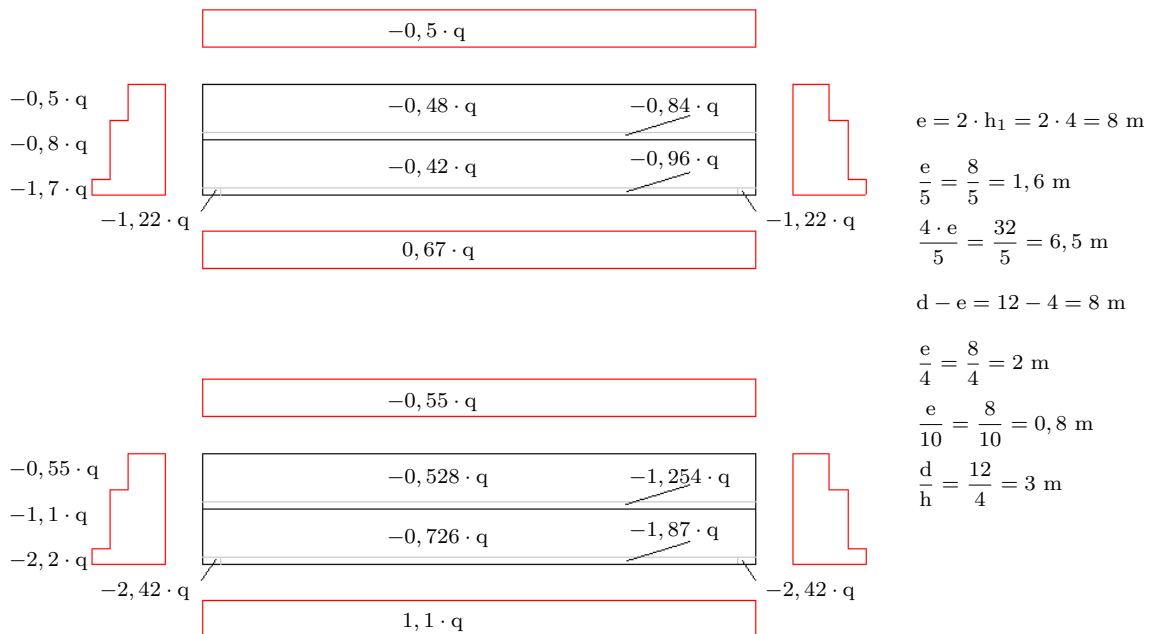


Abbildung 39: Lastbild Halle A 2001

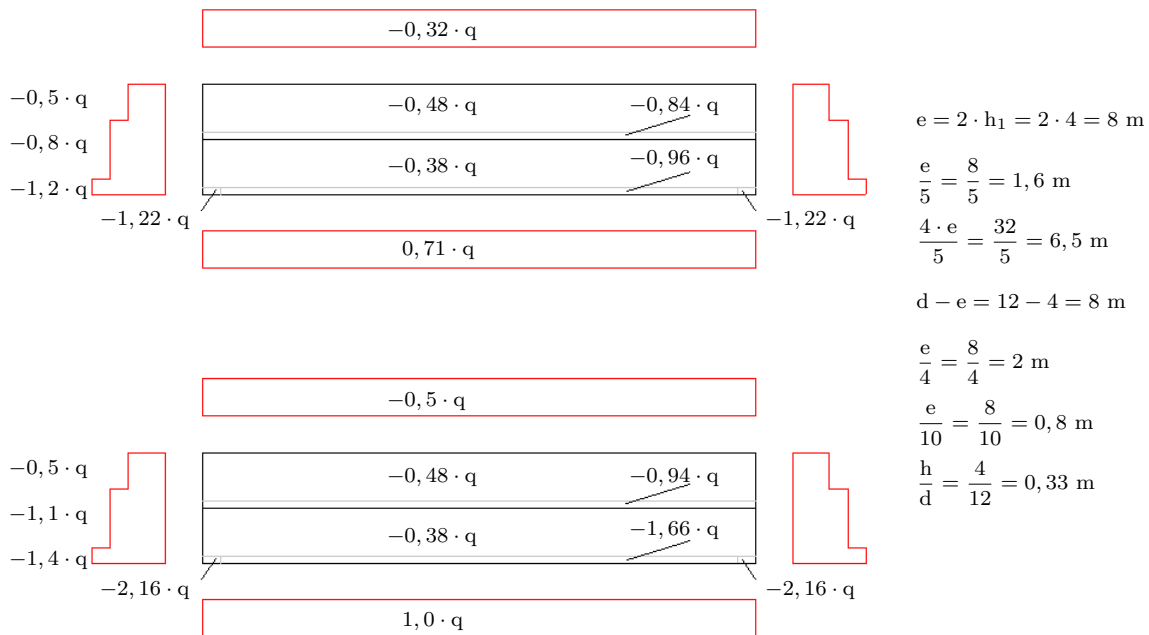


Abbildung 40: Lastbild Halle A 2005

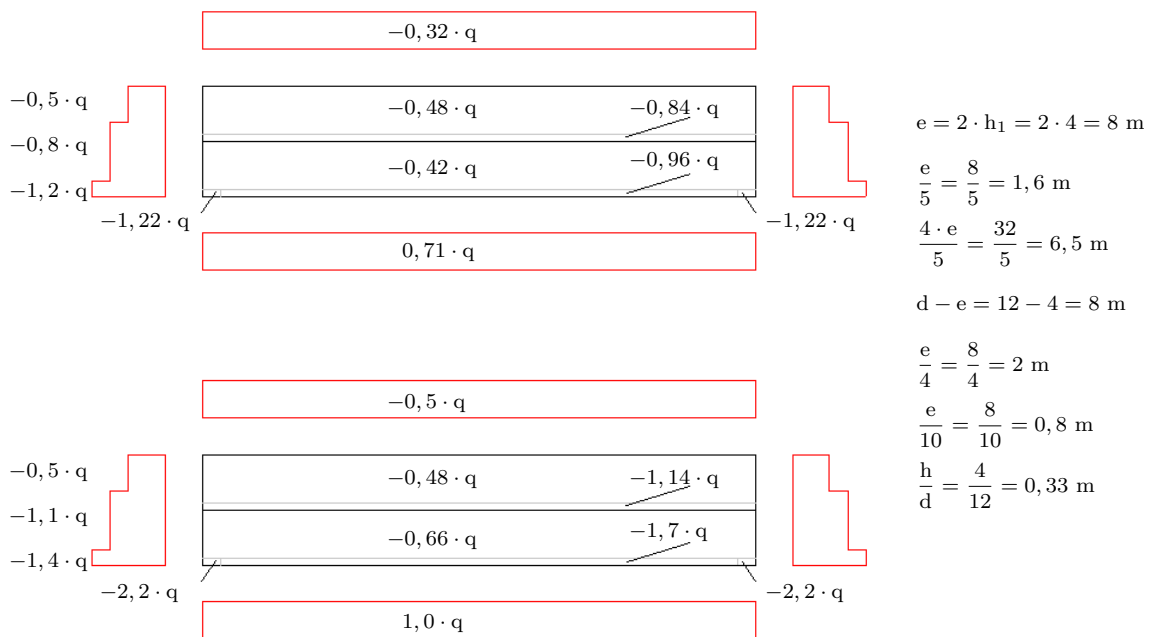


Abbildung 41: Lastbild Halle A 2010

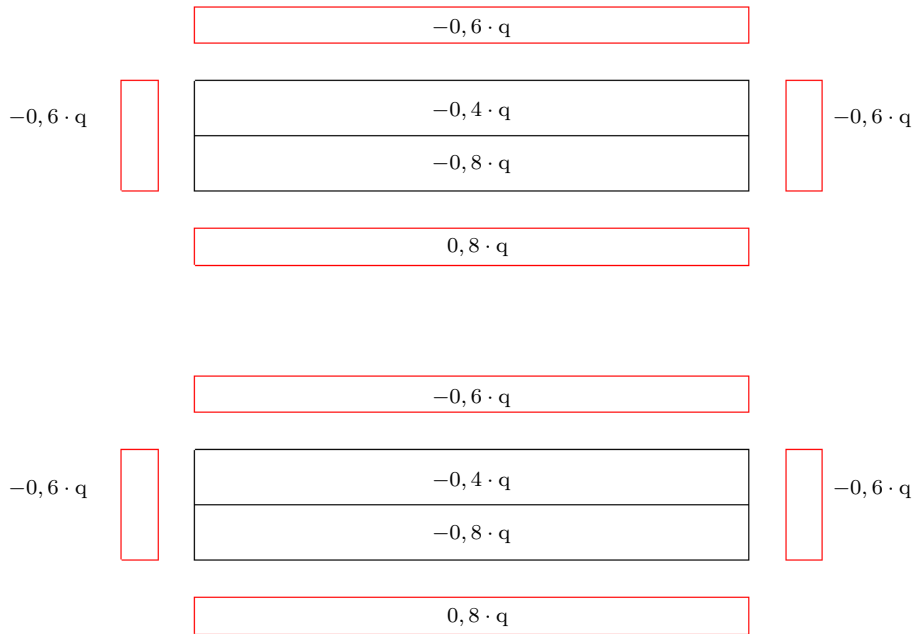


Abbildung 42: Lastbild Halle A nach TGL 1964

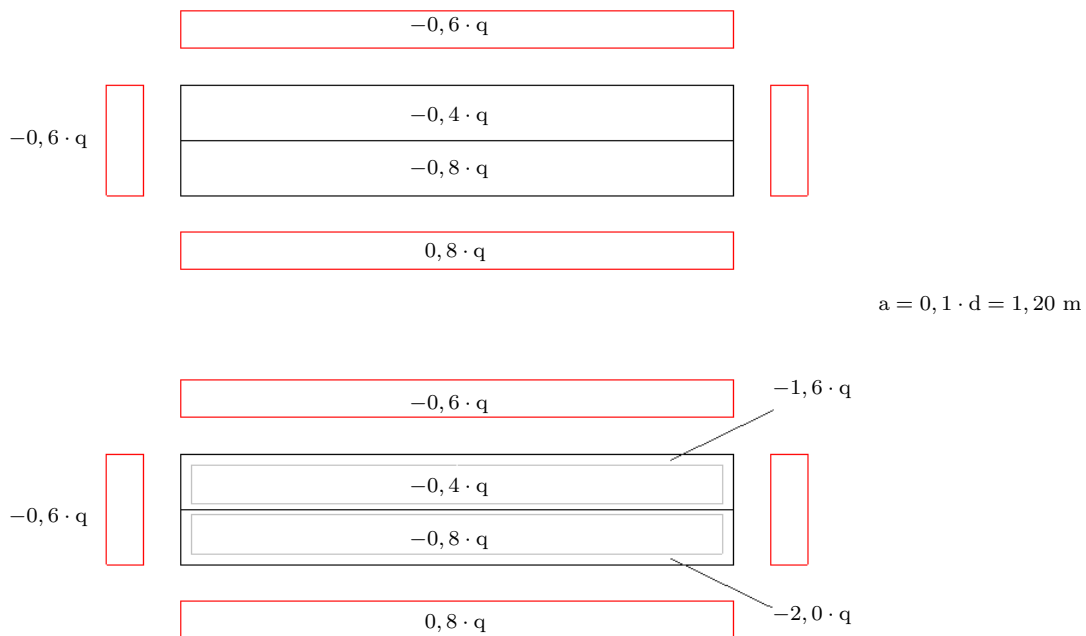


Abbildung 43: Lastbild Halle A nach TGL 1971

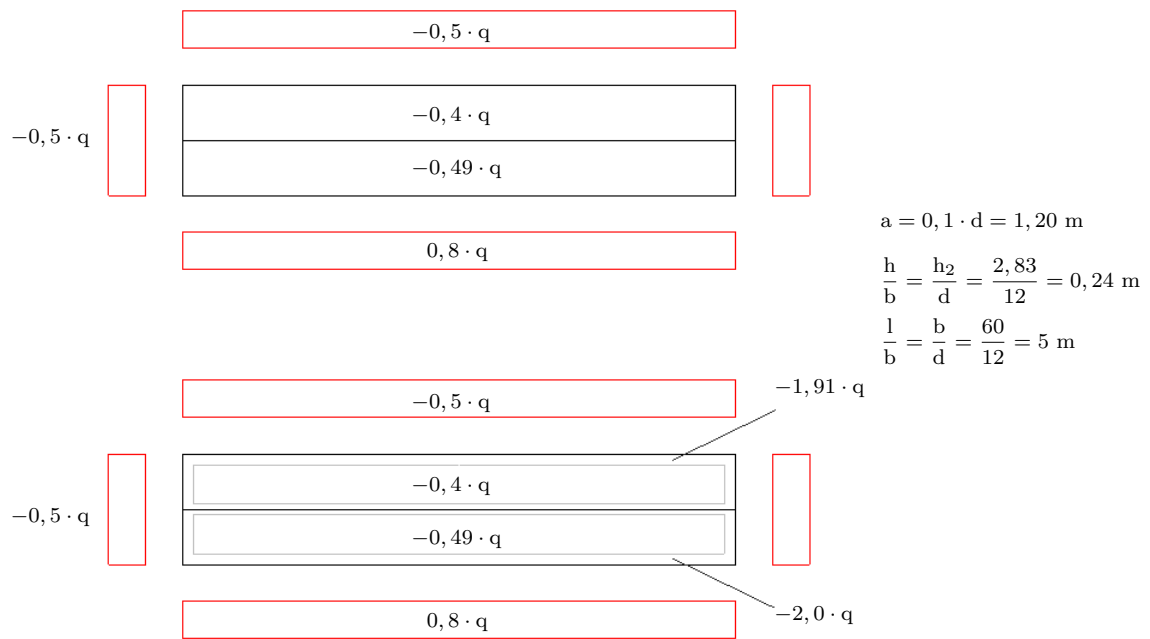


Abbildung 44: Lastbild Halle A nach TGL 1976

4.2 Halle B

Die Abmessungen der Halle B betragen 20m x 30m x 7m.

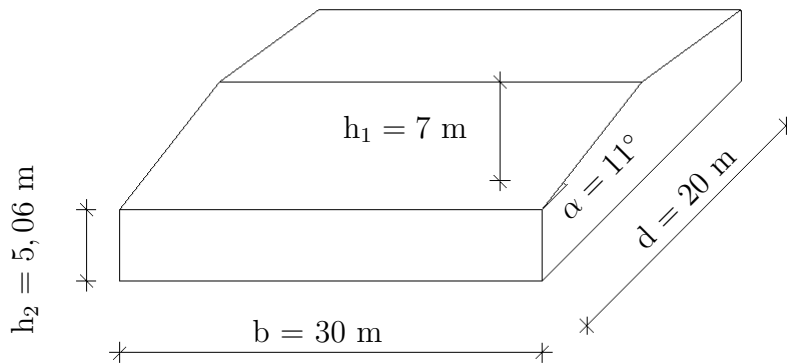


Abbildung 45: Geometrie Halle B

Unter der Annahme, dass der Wind senkrecht auf die längere Gebäudeseite trifft, ergeben sich nach unterschiedlichen Normen folgenden Lastbilder (auch hier links bzw. oben globale Betrachtung, rechts bzw. unten lokale Betrachtung):



Abbildung 46: Lastbild Halle B 1938

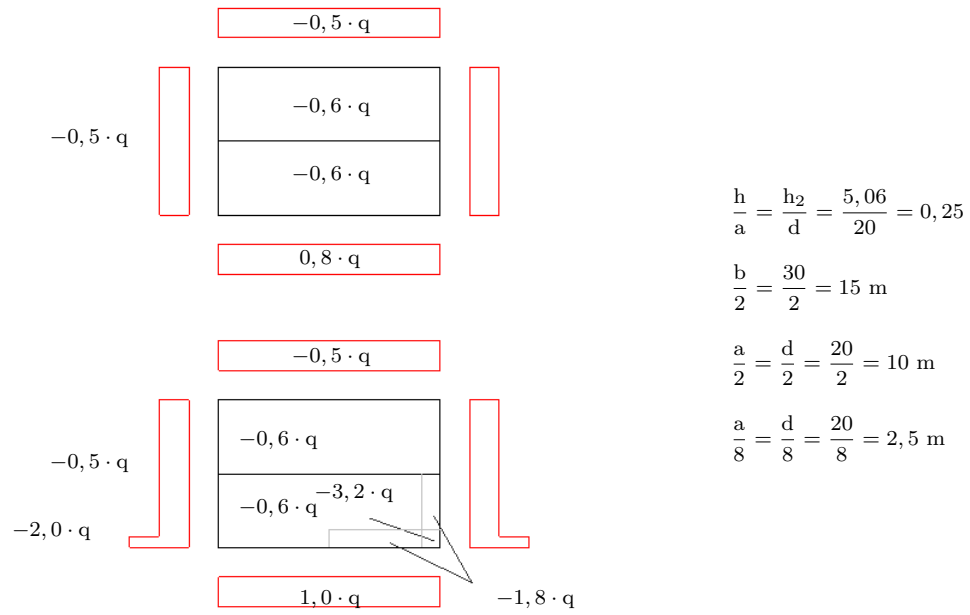


Abbildung 47: Lastbild Halle B 1986

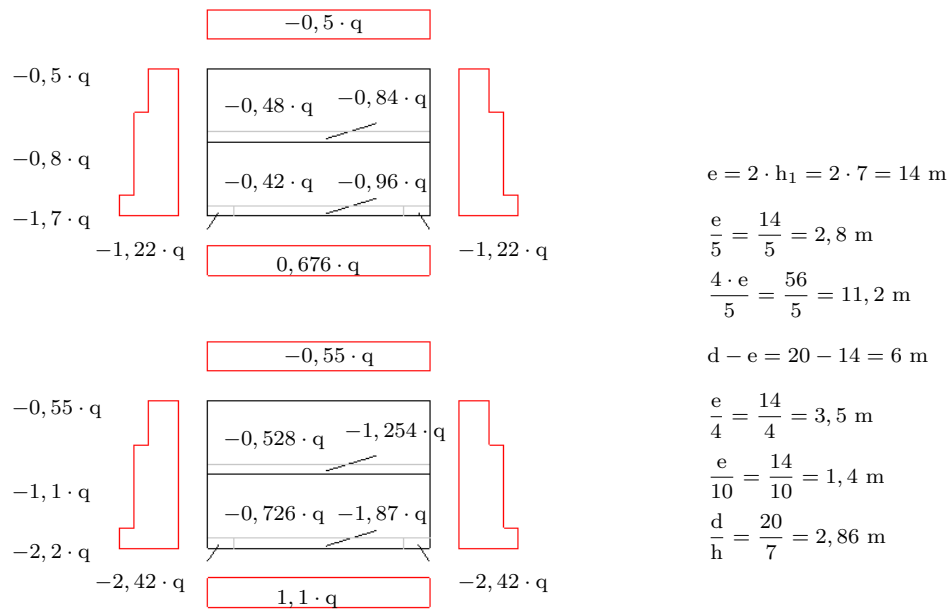


Abbildung 48: Lastbild Halle B 2001

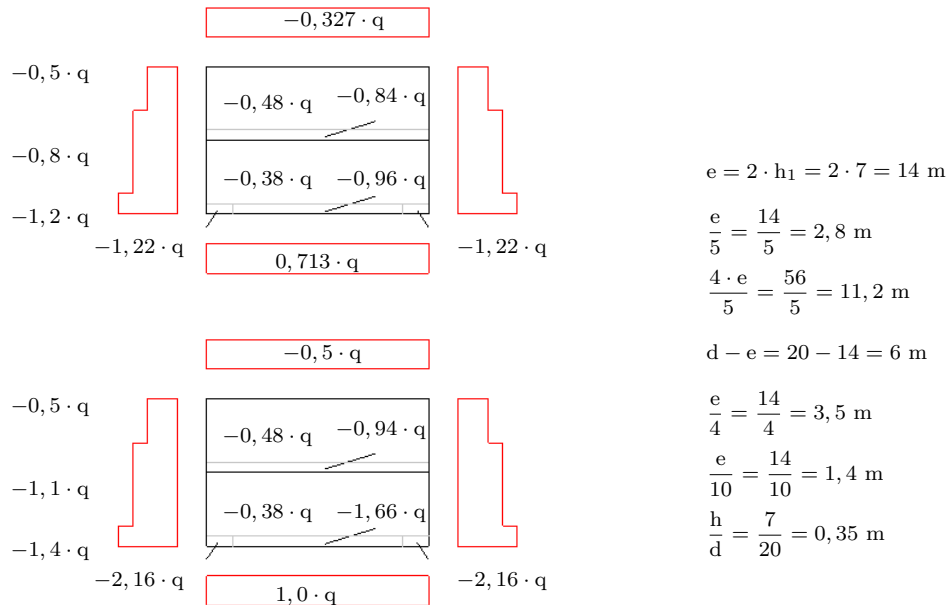


Abbildung 49: Lastbild Halle B 2005

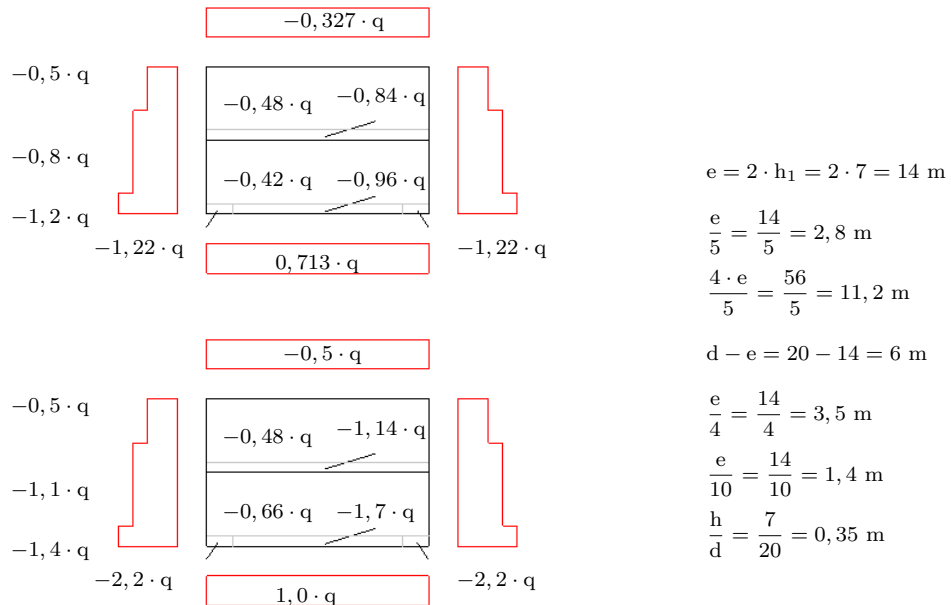


Abbildung 50: Lastbild Halle B 2010

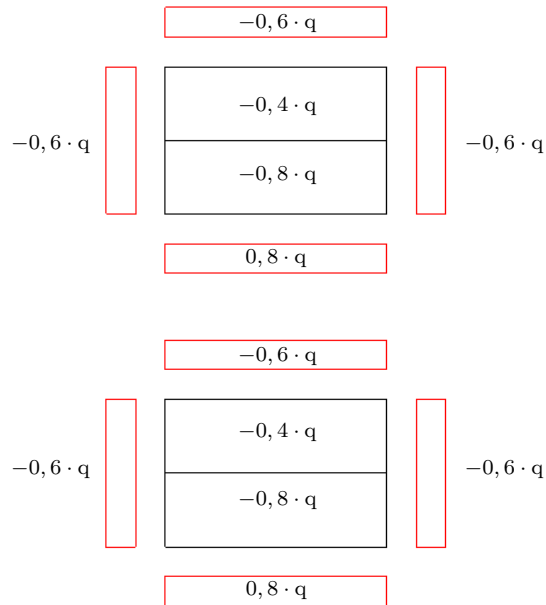


Abbildung 51: Lastbild Halle B nach TGL 1964

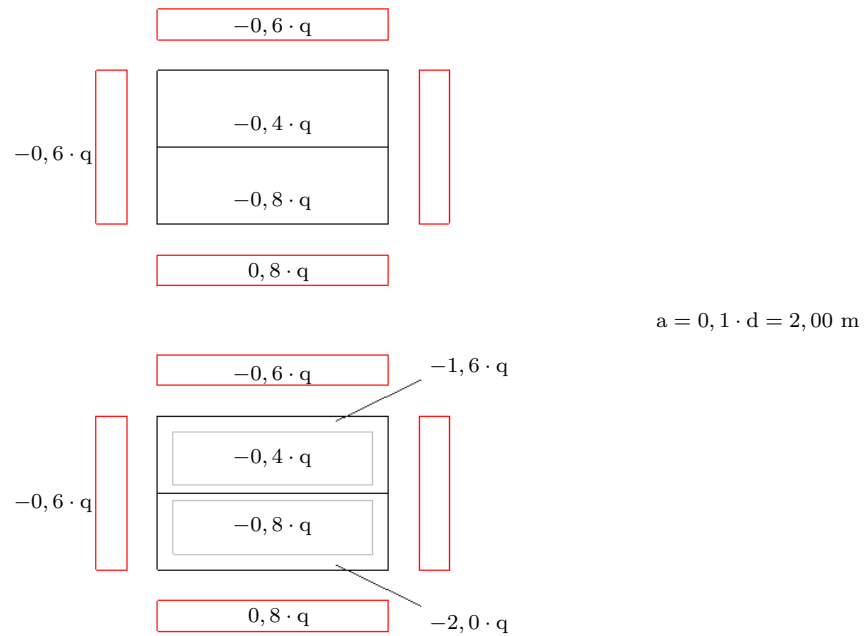


Abbildung 52: Lastbild Halle B nach TGL 1971

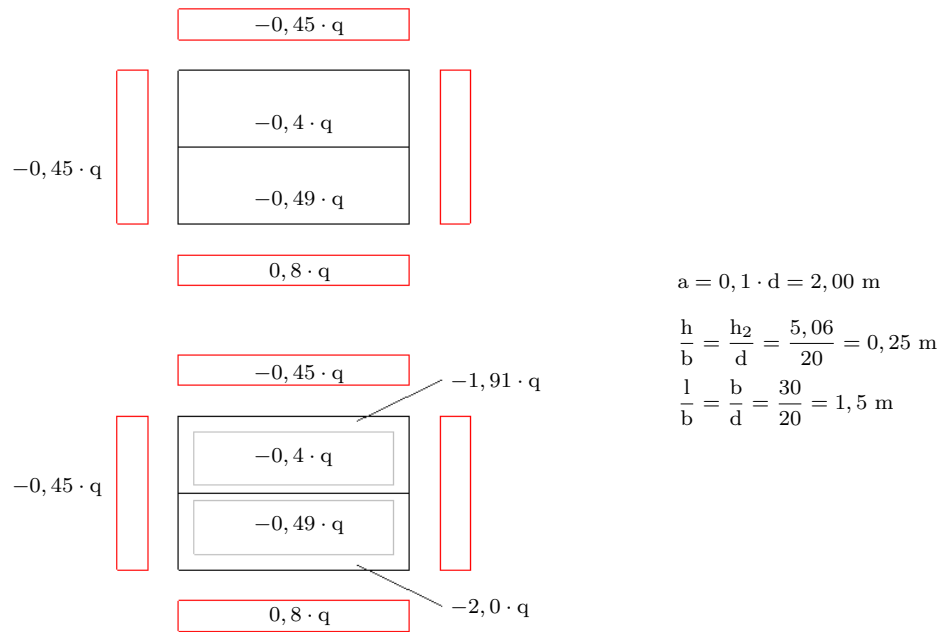


Abbildung 53: Lastbild Halle B nach TGL 1976

4.3 Halle C

Die Halle C hat Abmessungen von 10m x 60m x 10m. Bei der Berechnung der Windlast nach Eurocode und DIN 1055-4:2001 und 2005 entfällt aufgrund der Gebäudegeometrie der C-Bereich.

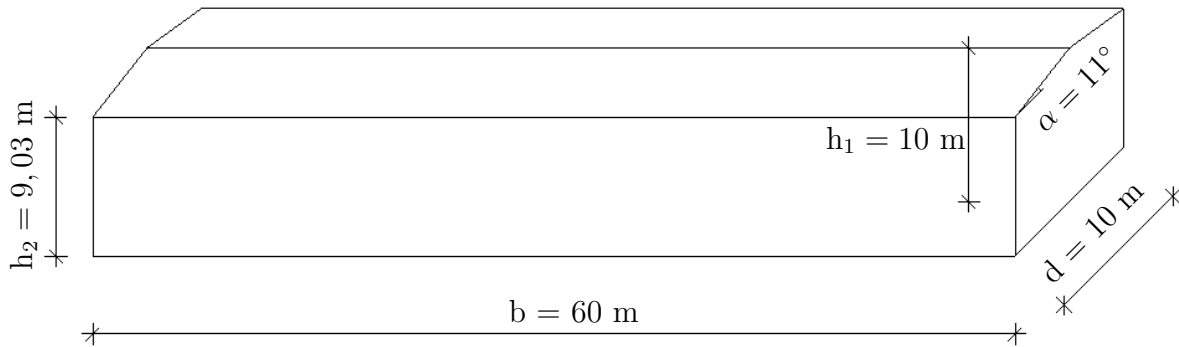


Abbildung 54: Geometrie Halle C

Nachfolgend sind links bzw. oben die globalen Beanspruchungen und rechts bzw. unten die lokalen Beanspruchungen dargestellt.

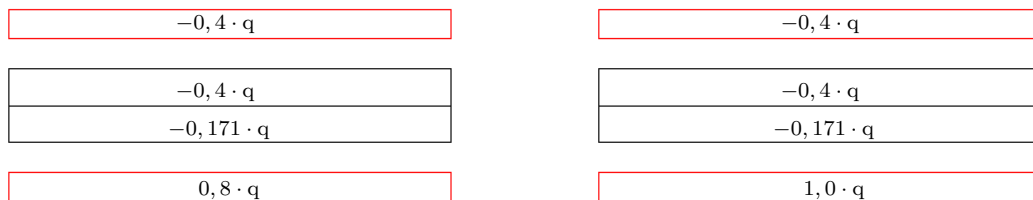


Abbildung 55: Lastbild Halle C 1938

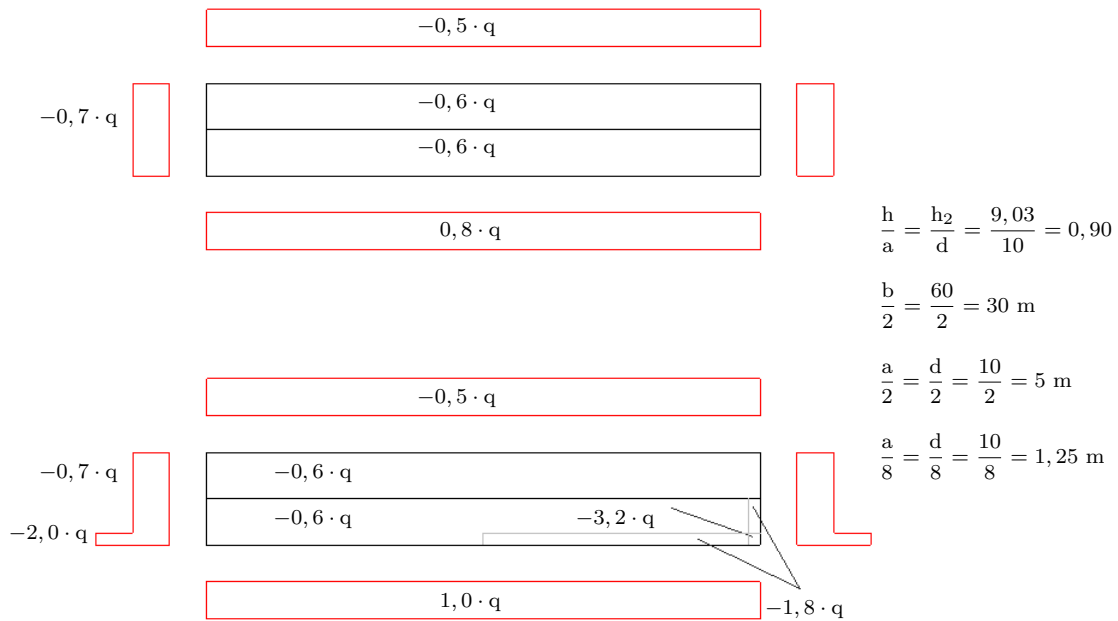


Abbildung 56: Lastbild Halle C 1986

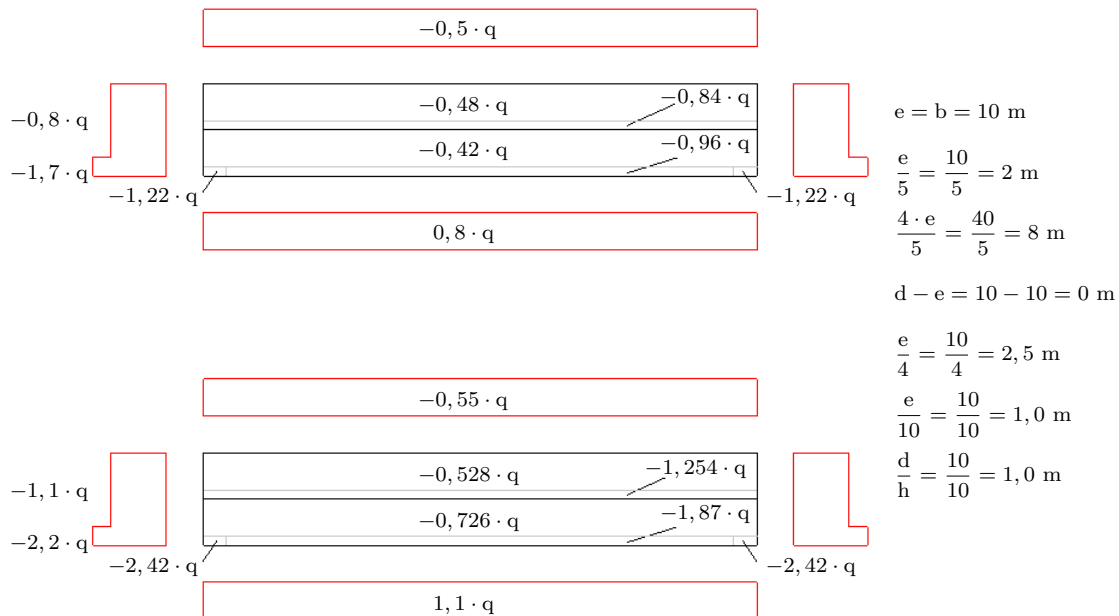


Abbildung 57: Lastbild Halle C 2001

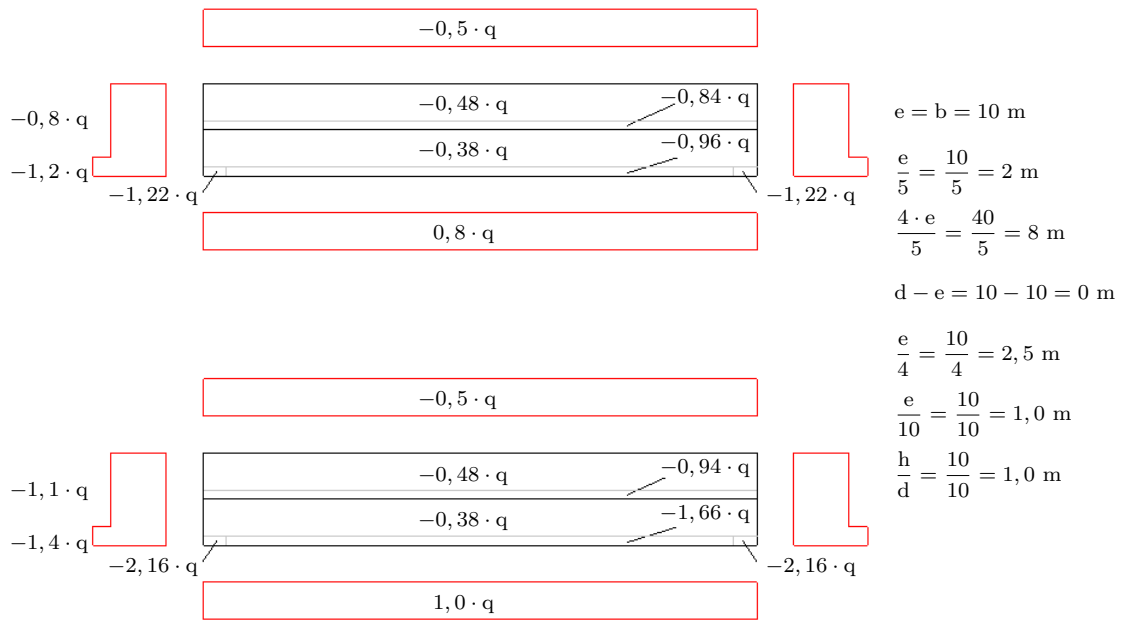


Abbildung 58: Lastbild Halle C 2005

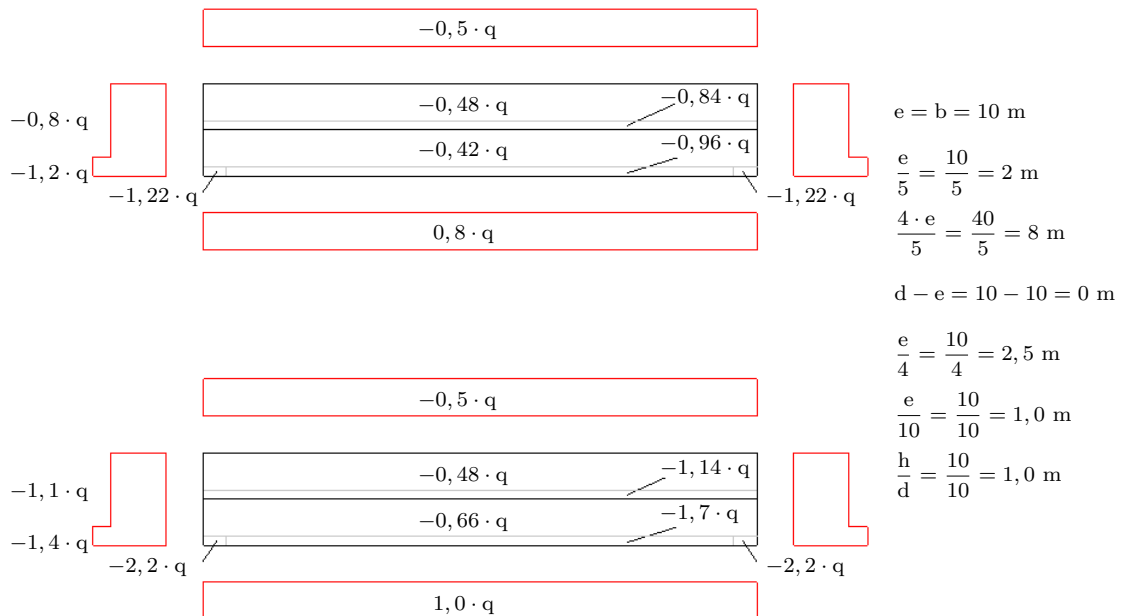


Abbildung 59: Lastbild Halle C 2010

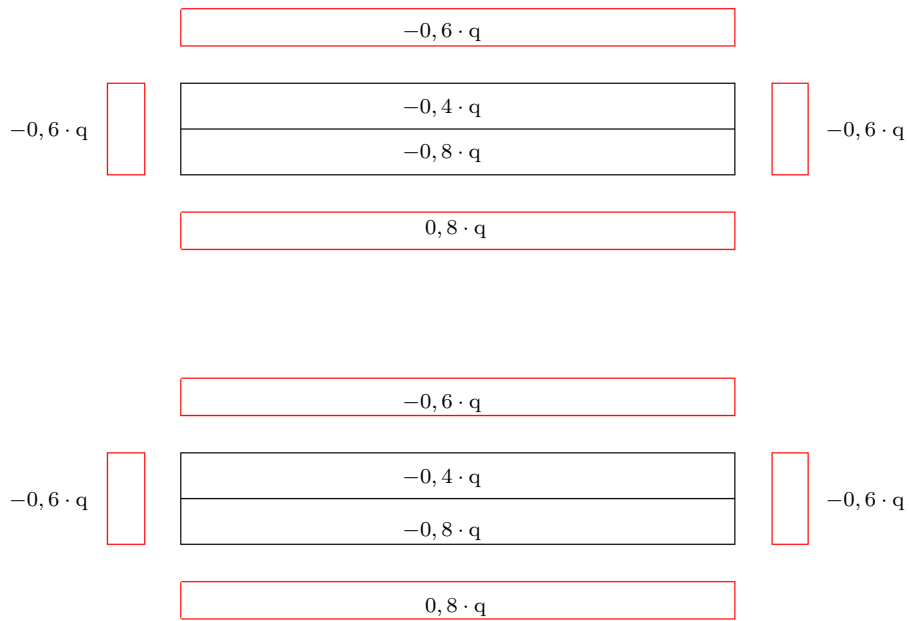
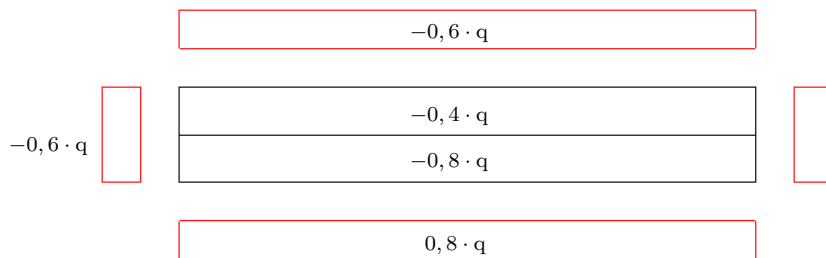


Abbildung 60: Lastbild Halle C nach TGL 1964



$a = 0,1 \cdot d = 1,0 \text{ m}$

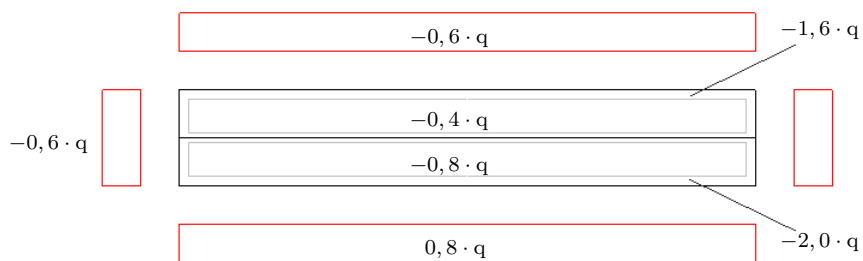


Abbildung 61: Lastbild Halle C nach TGL 1971

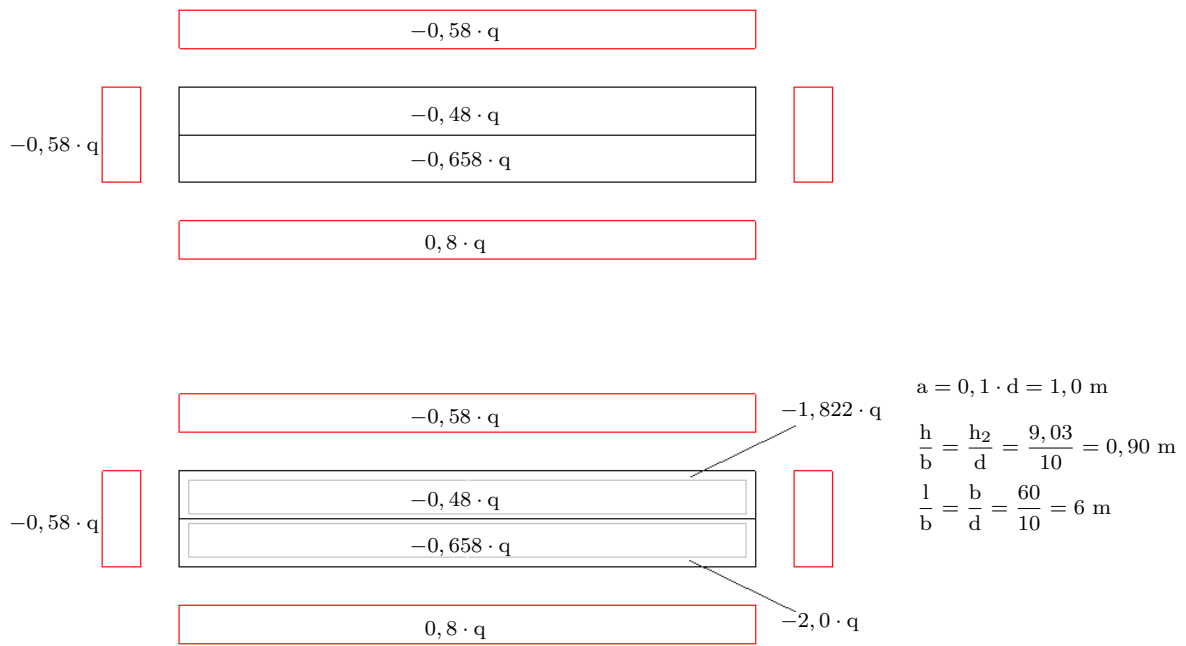


Abbildung 62: Lastbild Halle C nach TGL 1976

5 Auswertung

Die folgende Auswertung erfolgt anhand der Notation des Eurocodes. Das bedeutet beispielsweise für den Vergleich zwischen den TGLs ab 1971 und dem Eurocode, dass die c_s -Werte auf die Bereiche angesetzt werden, die den F-, G- und J-Bereichen entsprechen.

Zunächst werden die anzusetzenden Windlasten für die globale Bemessung der Bauwerke verglichen. Anschließend werden die Windlasten für die lokalen Bemessungen gegenübergestellt.

Bei der Auswertung wird lediglich der Fall berücksichtigt, dass Wind senkrecht auf die längere Gebäudeseite trifft, da dies die höheren Windlasten ergibt.

Da in der Normausgabe von 1938 keine Belastung anzusetzen ist, wenn die Wand parallel zum Wind verläuft, wird an diesen Wänden ebenfalls der Windsog für senkrechte Flächen angesetzt, um einen Vergleich mit den nachfolgenden Normen zu ermöglichen.

Die Sogspitzen im Firstbereich der Hallen nach TGL dürfen auf Grund der Dachneigung vernachlässigt werden. In dieser Auswertung werden die Sogspitzen dennoch angesetzt, um einen Vergleich zum J-Bereich des Eurocodes zu haben. Mögliche Abminderungen aufgrund der Bauwerksumgebung werden hier nicht berücksichtigt.

Beim Vergleich zwischen der DIN 1055-4: 2001 und dem Eurocode ist darauf zu achten, dass sich die Windzonengrenzen verschoben haben. Der Vergleich hat seine Gültigkeit also nur bei Bauwerken die nach beiden Normen der gleichen Windzone zugeordnet werden.

Im Folgenden ist die Entwicklung der **charakteristischen** Windlast dargestellt.

5.1 Windlast auf Wände für die globale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010

5.1.1 Halle A in der Windzone 1 Binnenland

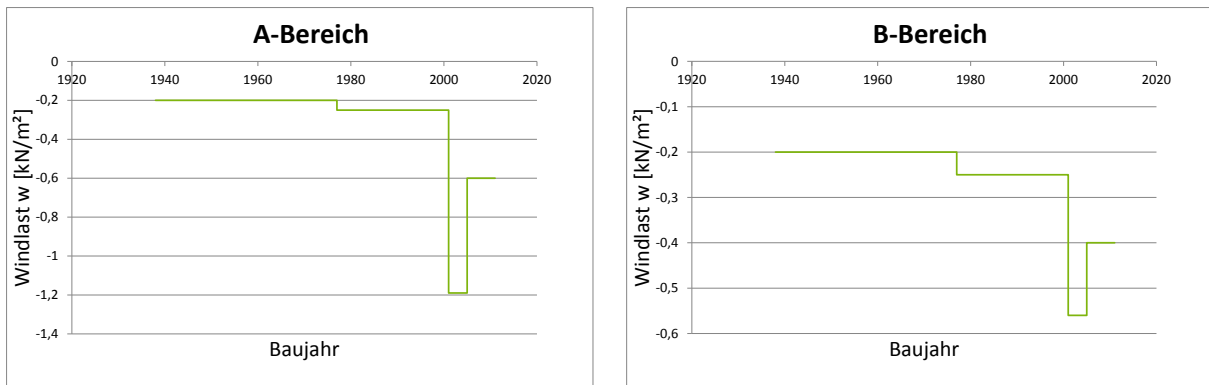


Abbildung 63: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

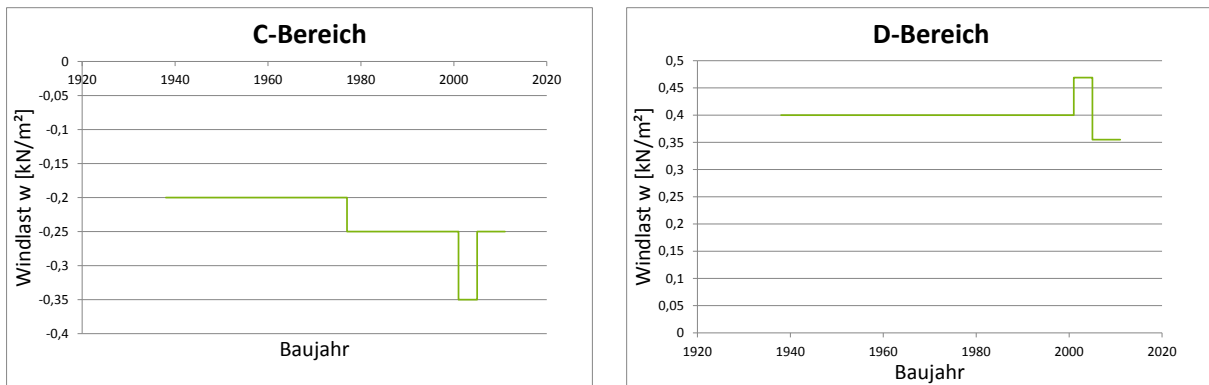


Abbildung 64: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

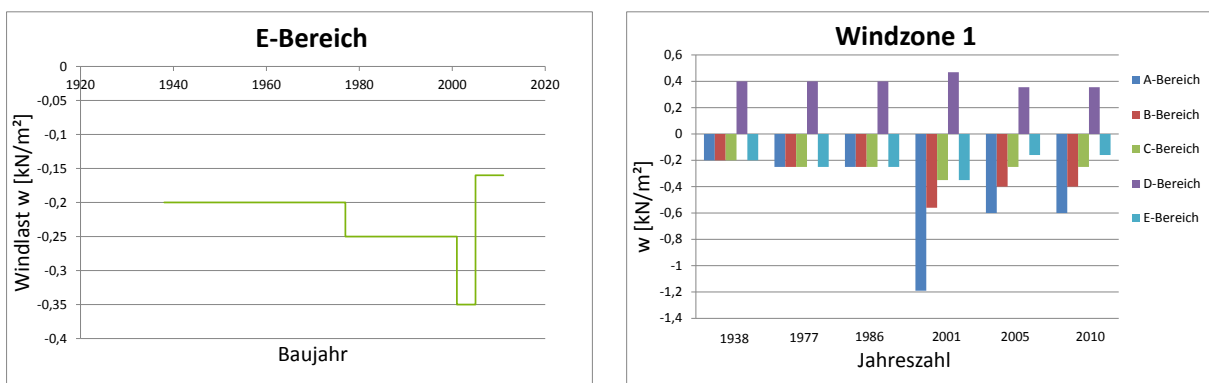


Abbildung 65: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.2 Halle A in der Windzone 2 Binnenland

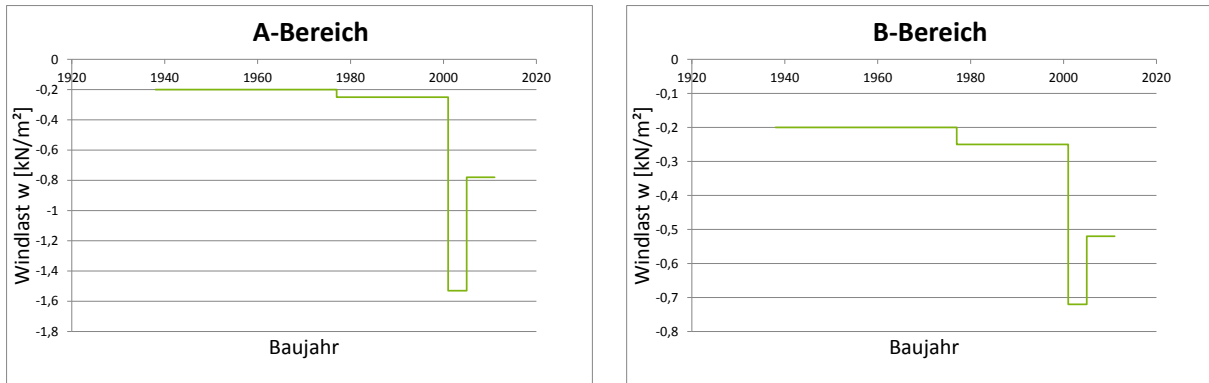


Abbildung 66: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

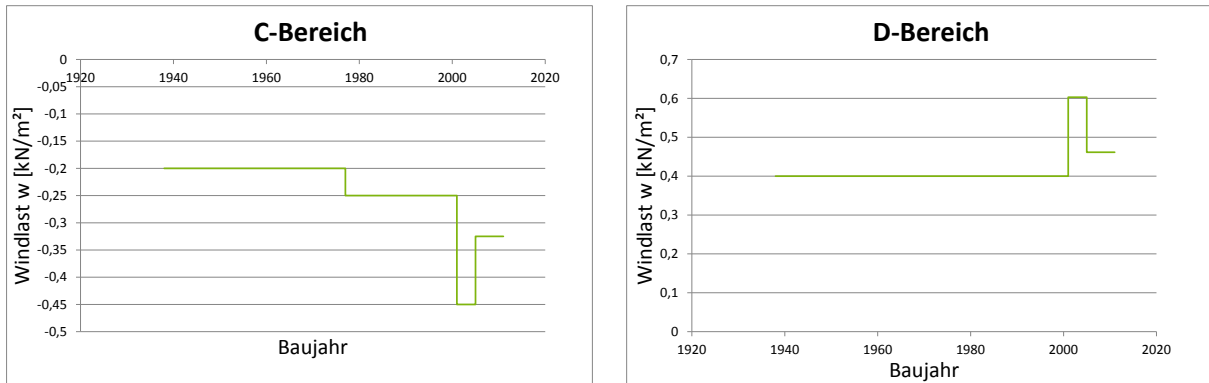


Abbildung 67: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

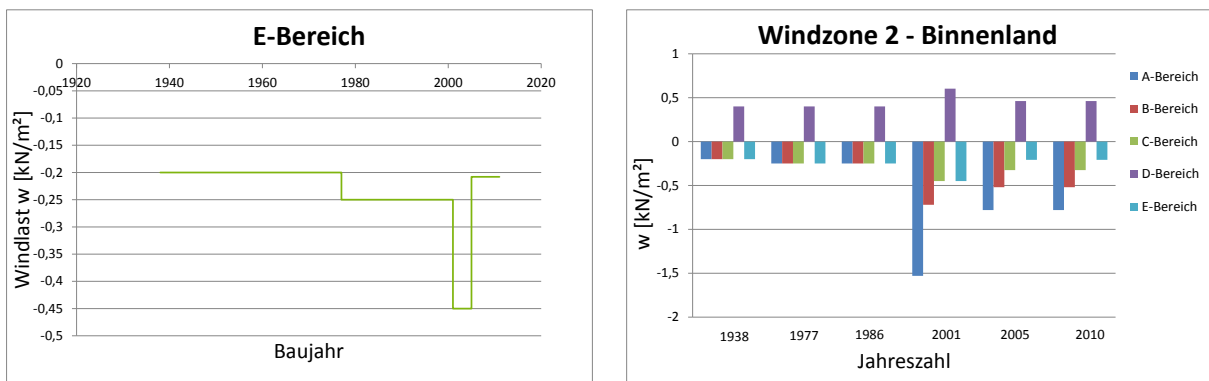


Abbildung 68: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.3 Halle A in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

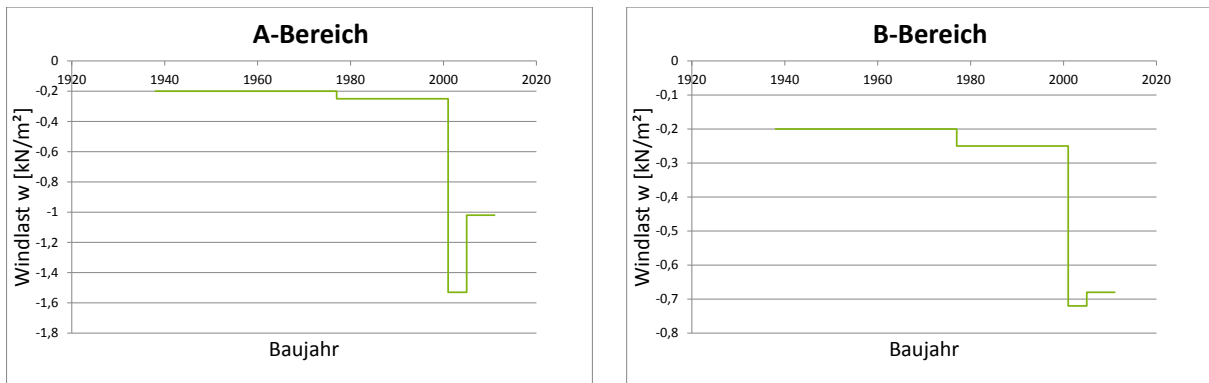


Abbildung 69: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

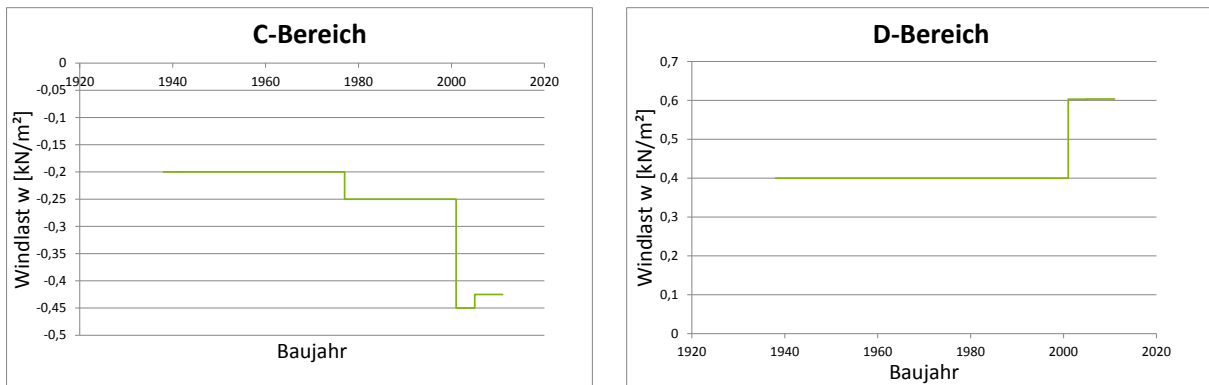


Abbildung 70: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

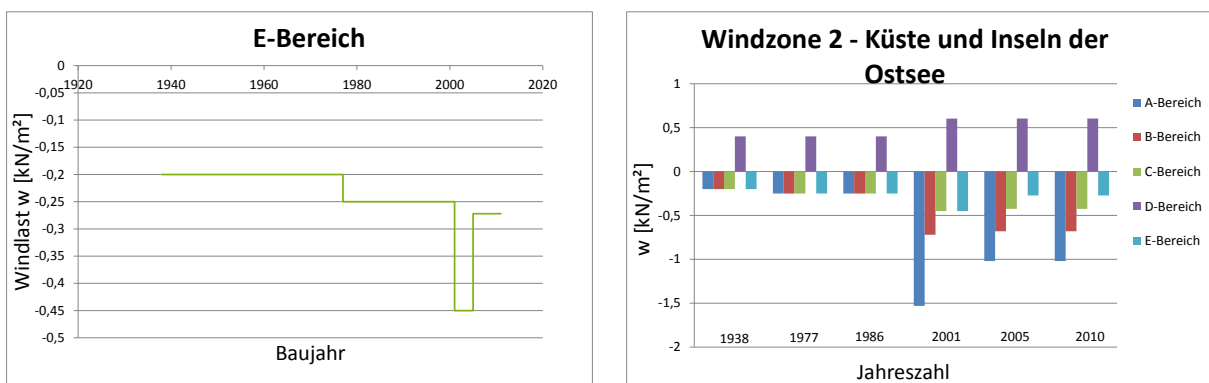


Abbildung 71: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.4 Halle A in der Windzone 3 Binnenland

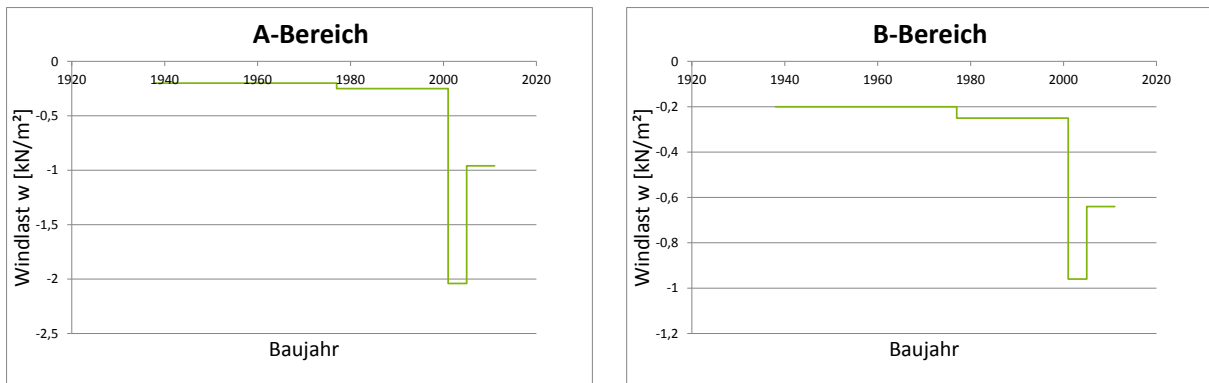


Abbildung 72: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

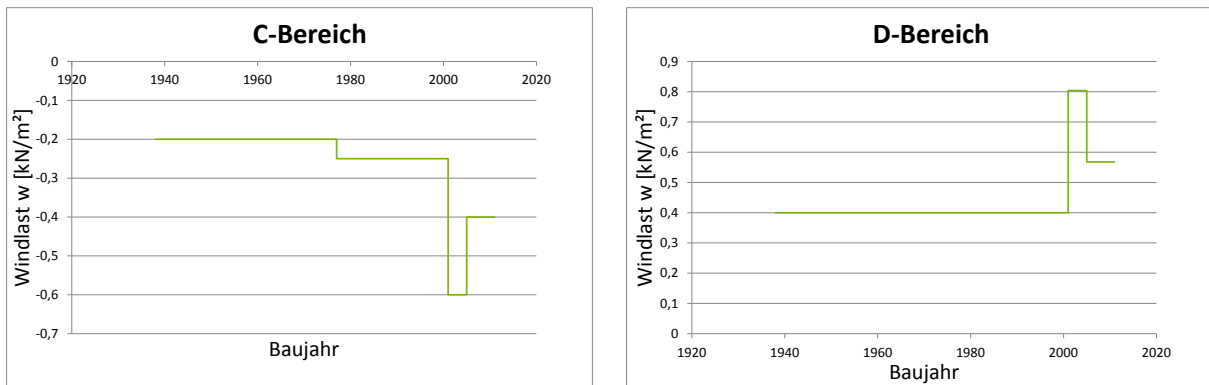


Abbildung 73: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

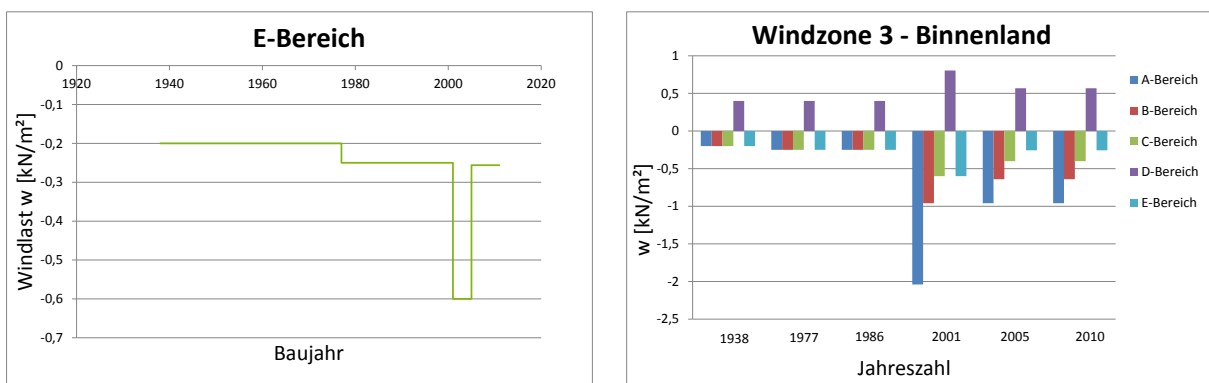


Abbildung 74: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.5 Halle A in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

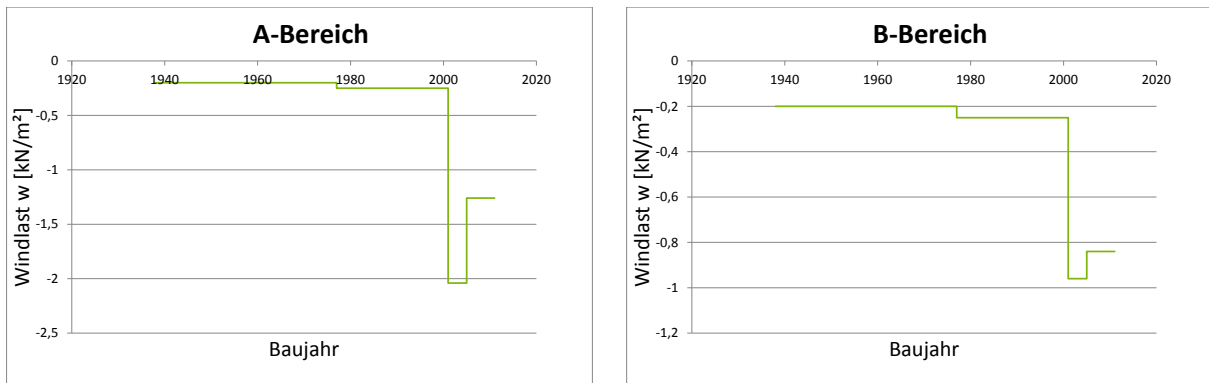


Abbildung 75: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

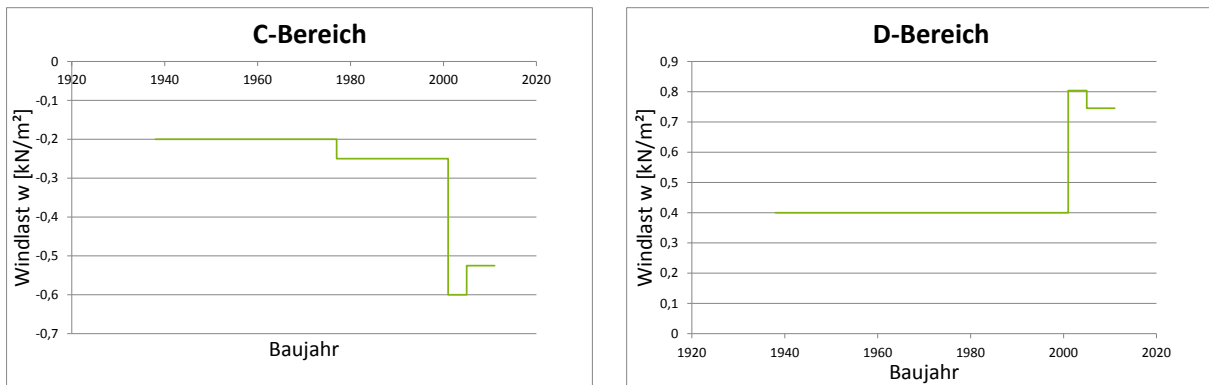


Abbildung 76: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

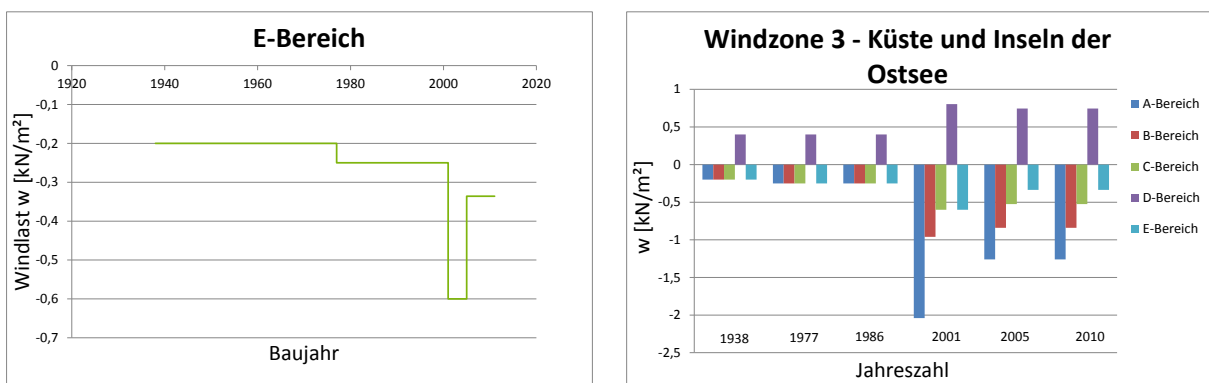


Abbildung 77: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.6 Halle A in der Windzone 4 Binnenland

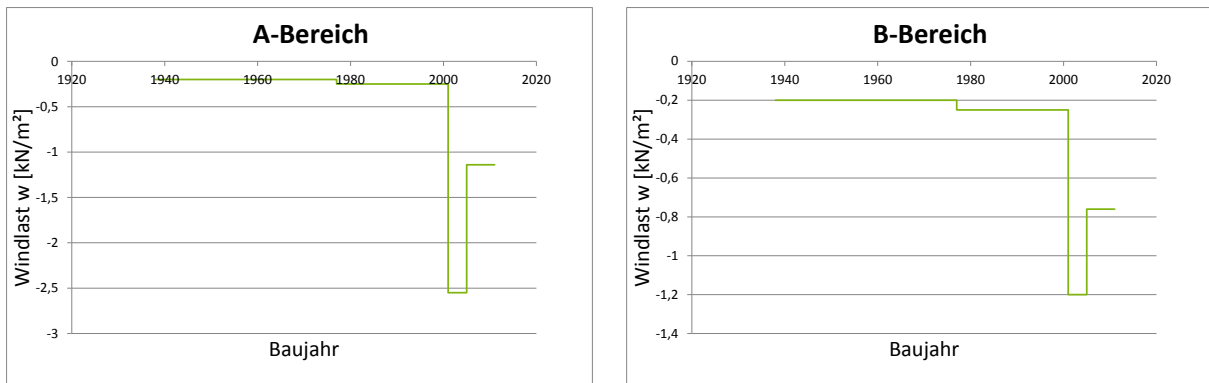


Abbildung 78: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

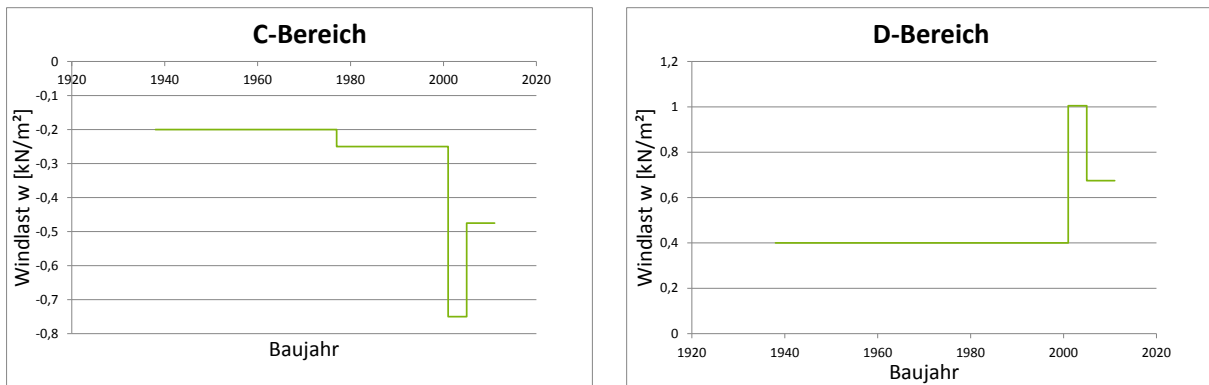


Abbildung 79: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

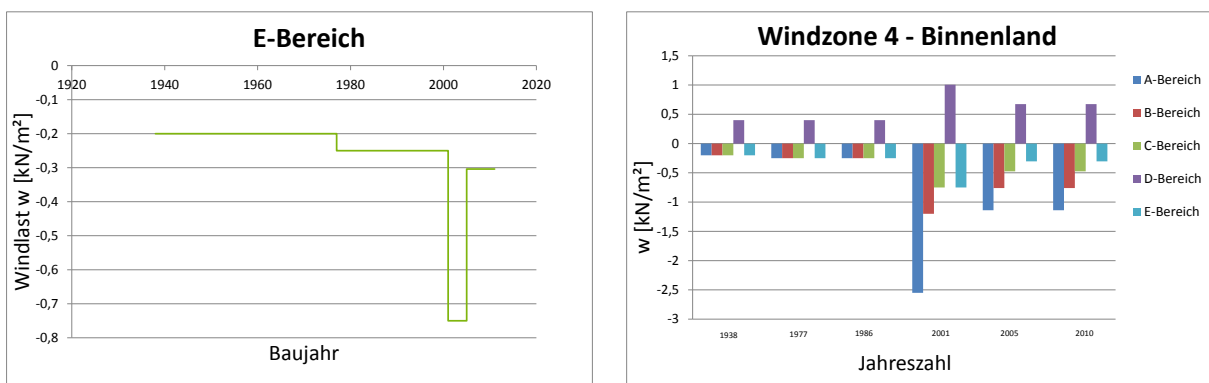


Abbildung 80: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.7 Halle A in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

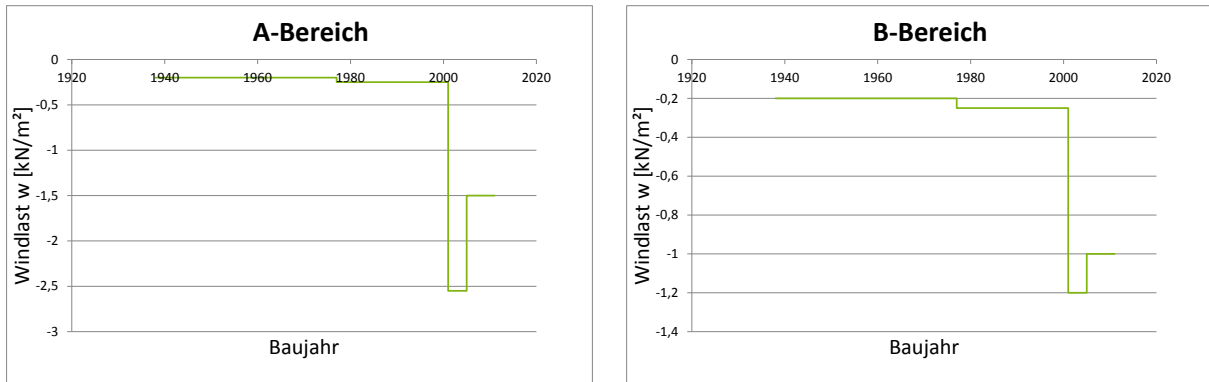


Abbildung 81: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

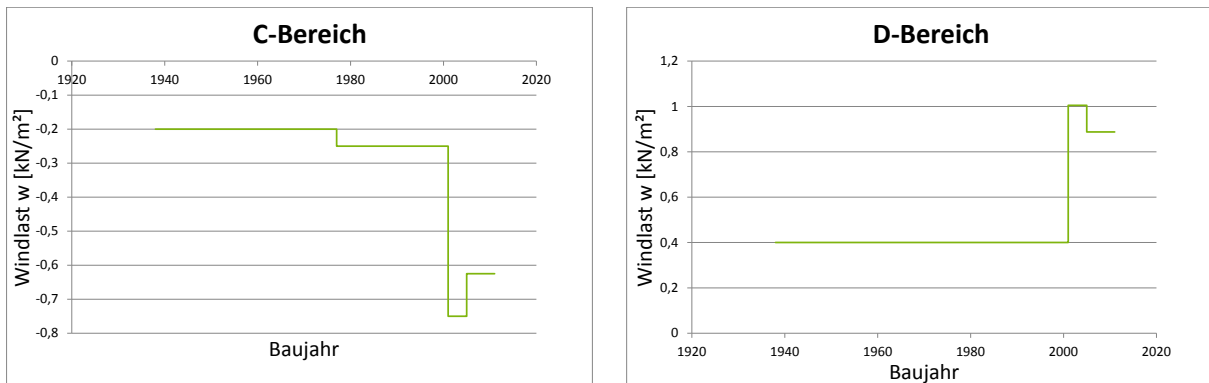


Abbildung 82: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

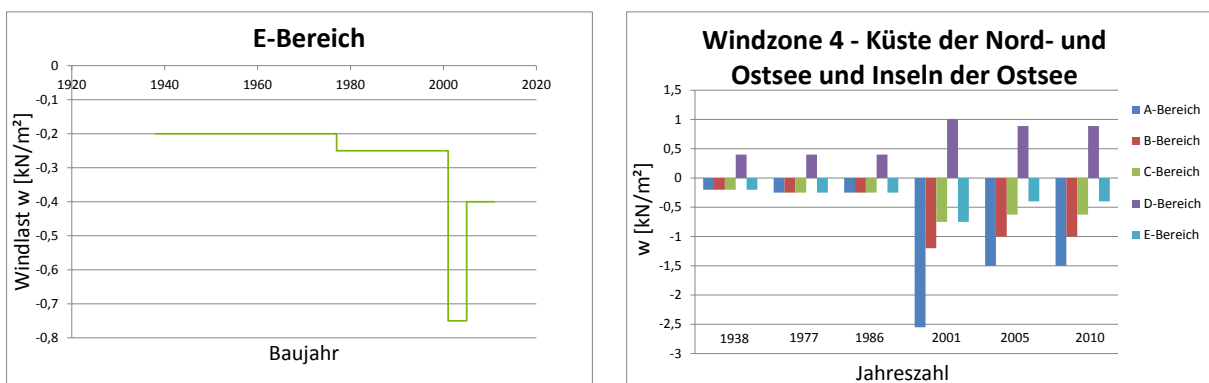


Abbildung 83: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.8 Halle A in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

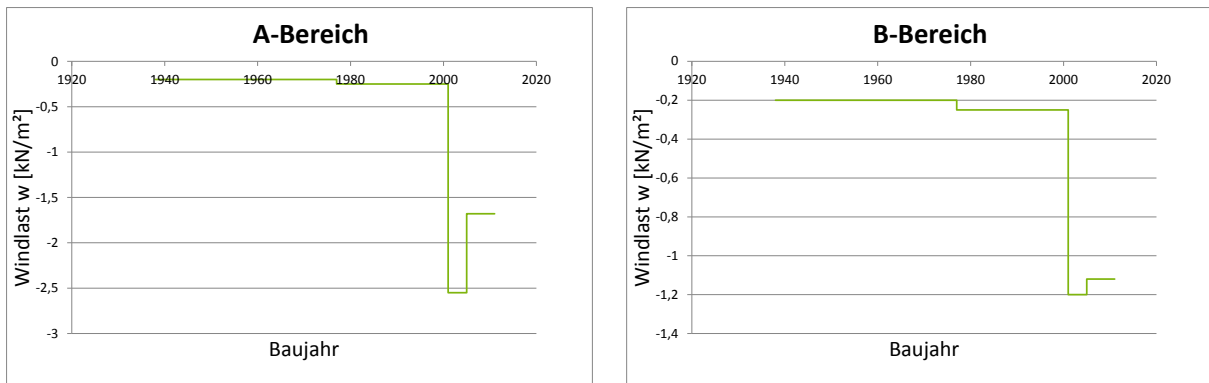


Abbildung 84: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

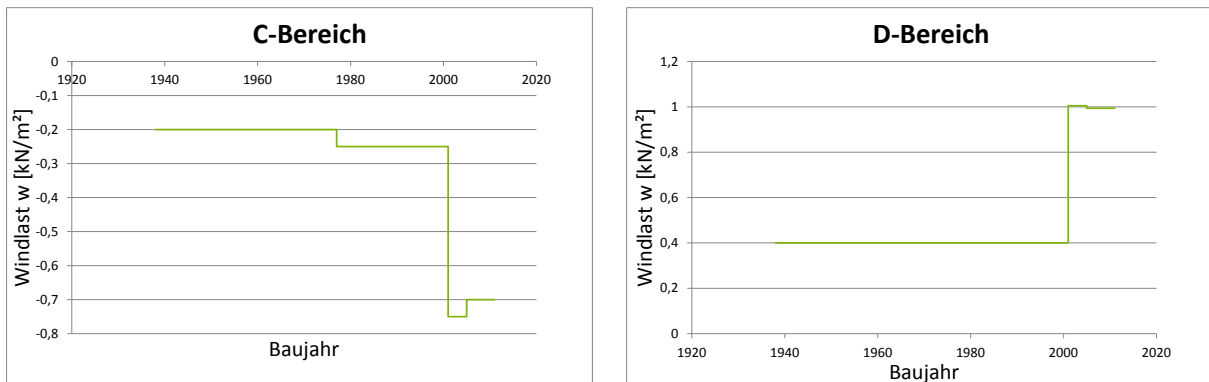


Abbildung 85: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

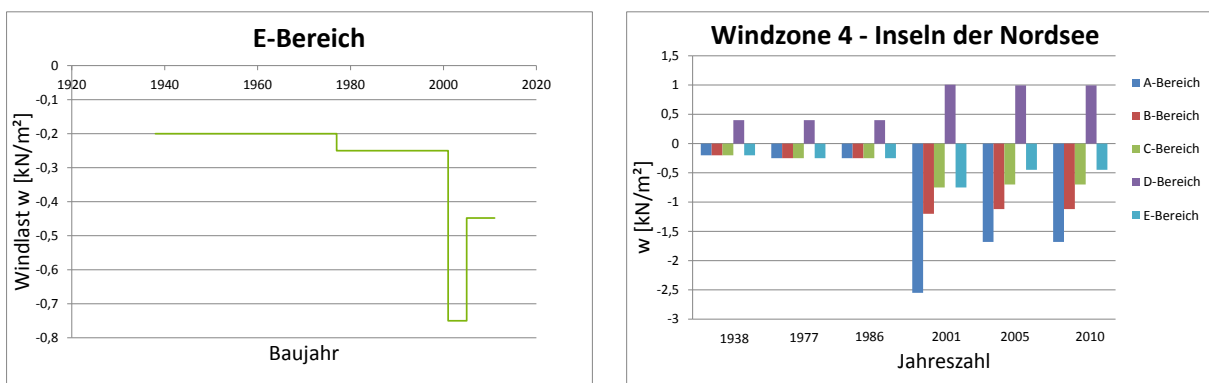


Abbildung 86: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.9 Halle B in der Windzone 1 Binnenland

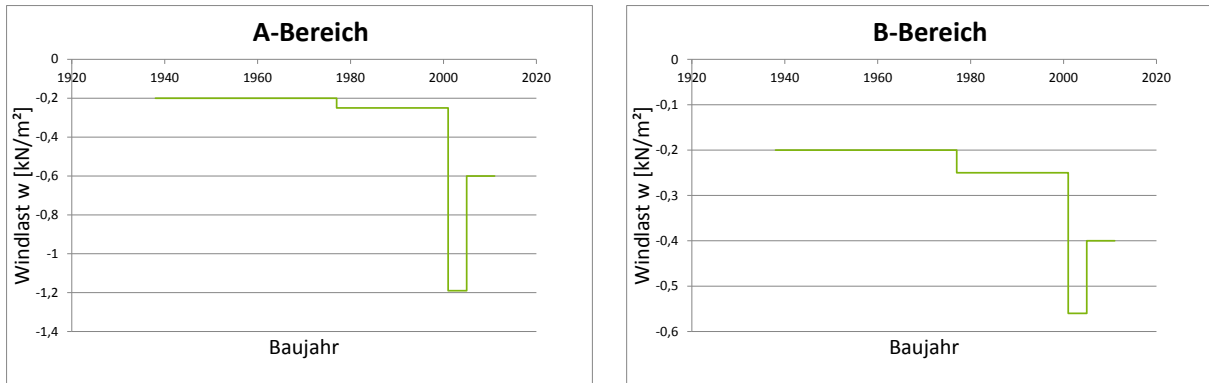


Abbildung 87: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

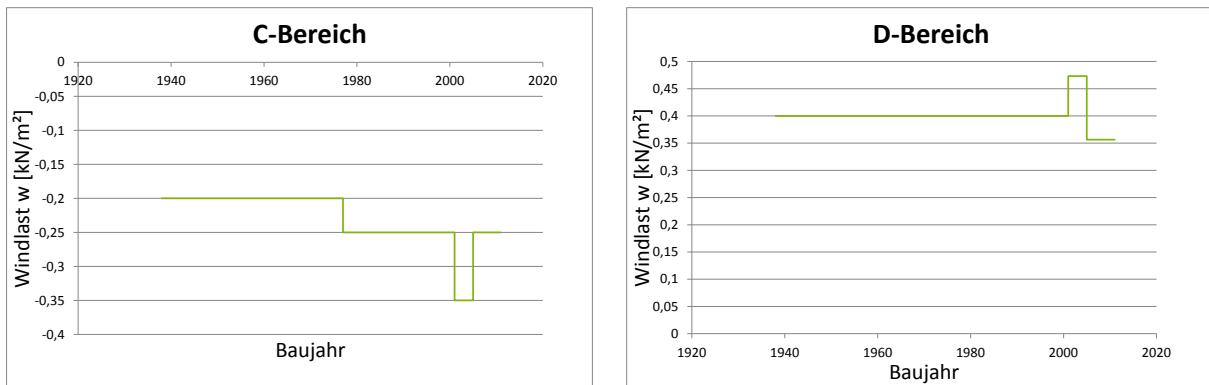


Abbildung 88: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

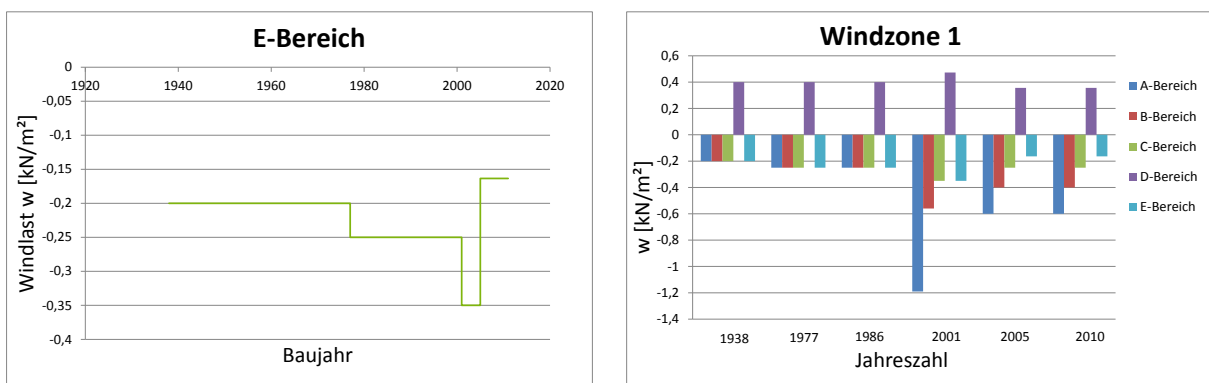


Abbildung 89: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.10 Halle B in der Windzone 2 Binnenland

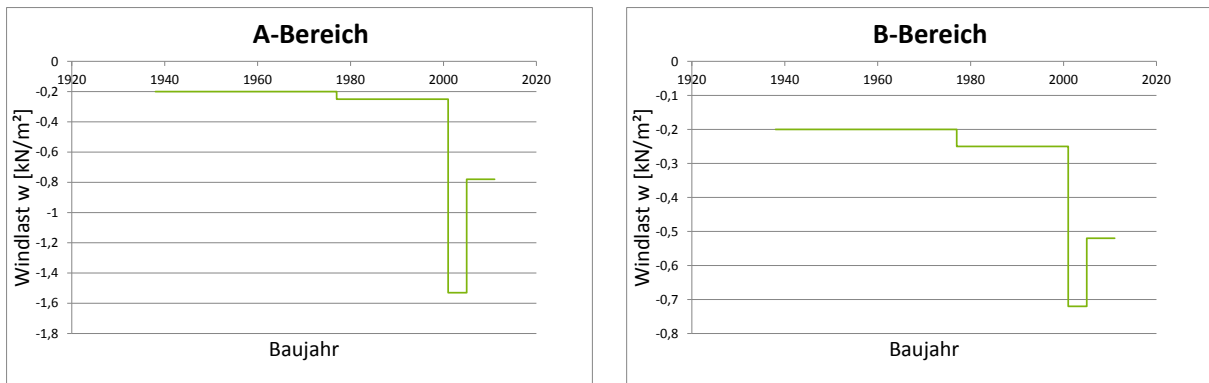


Abbildung 90: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

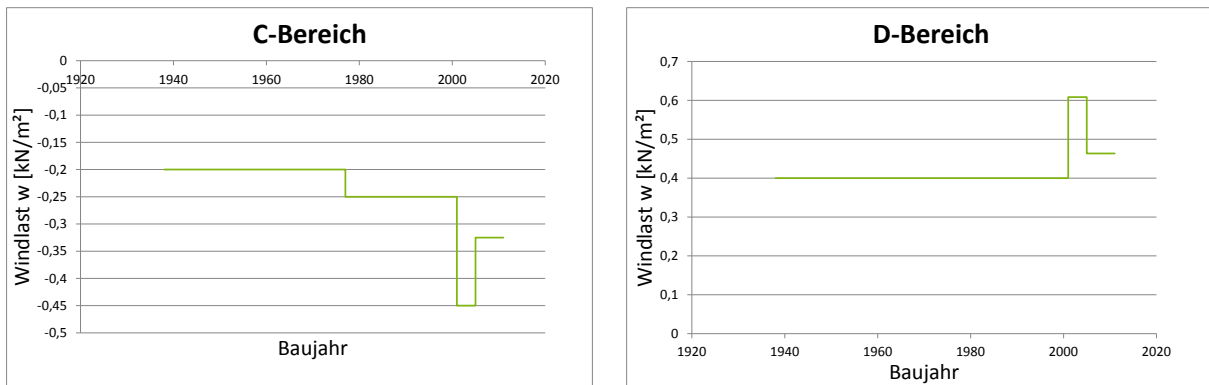


Abbildung 91: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

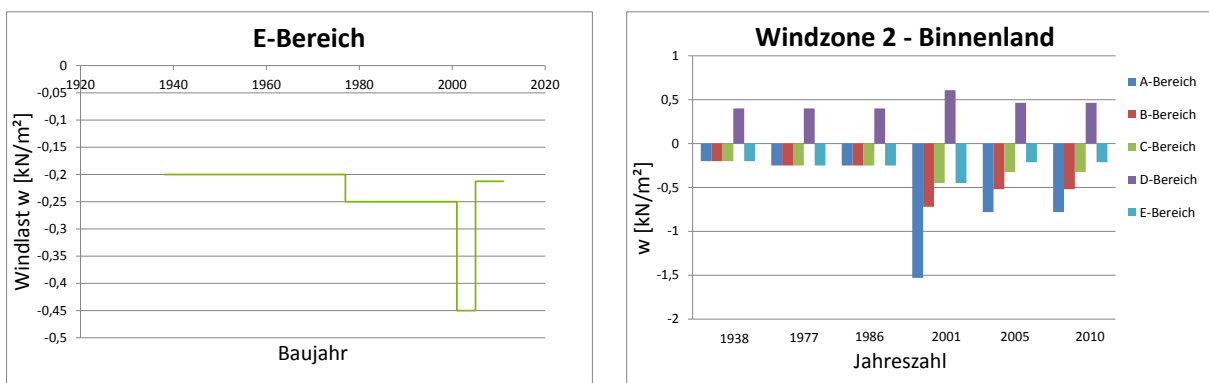


Abbildung 92: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.11 Halle B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

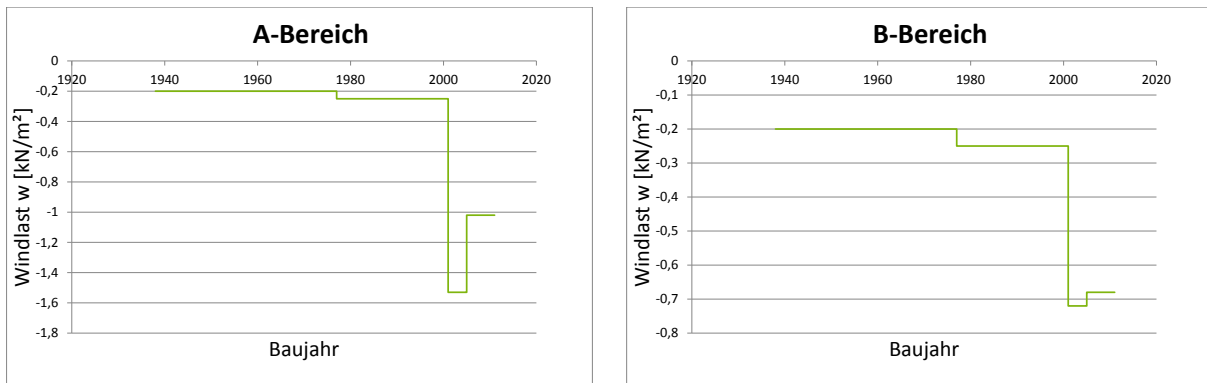


Abbildung 93: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

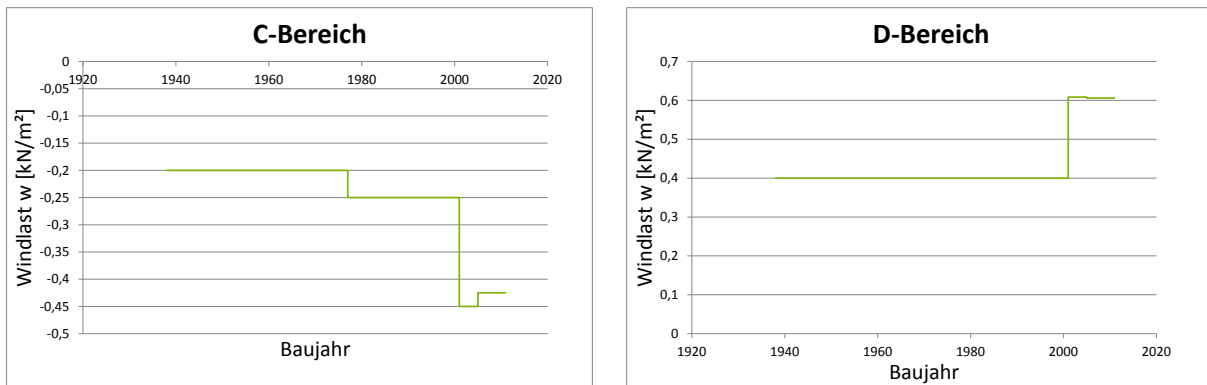


Abbildung 94: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

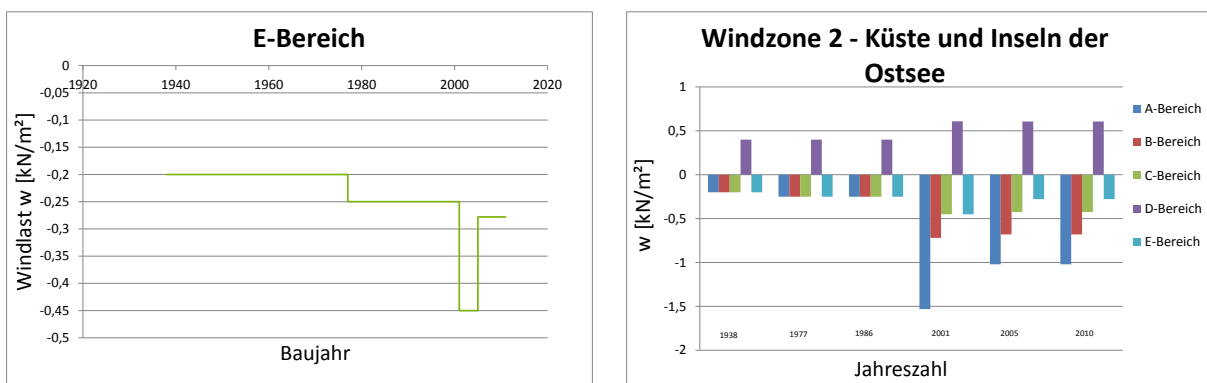


Abbildung 95: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.12 Halle B in der Windzone 3 Binnenland

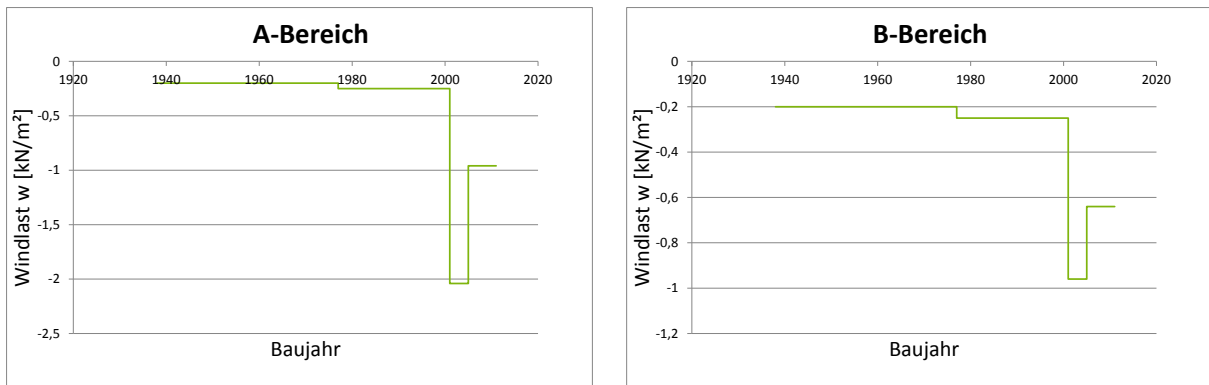


Abbildung 96: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

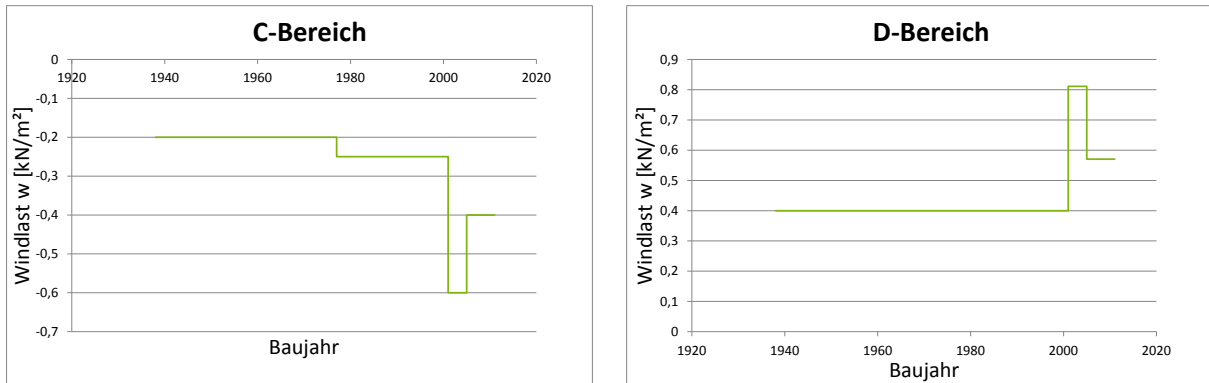


Abbildung 97: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

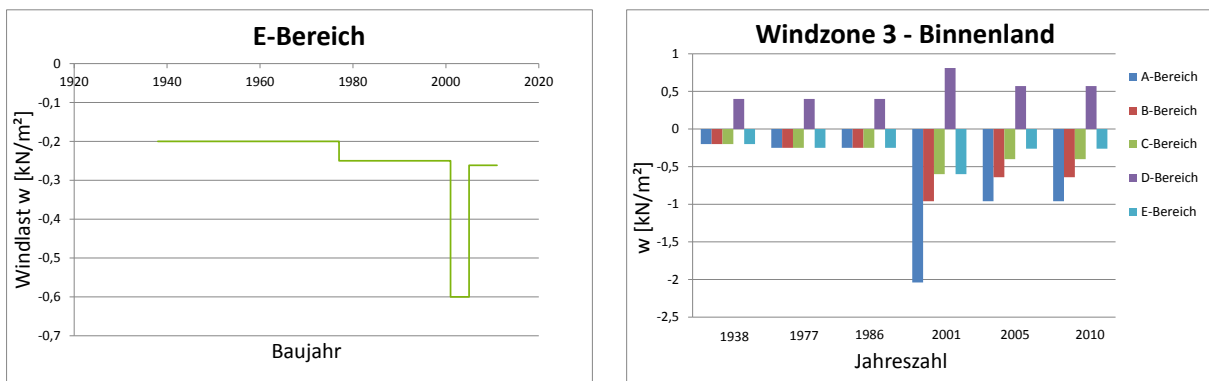


Abbildung 98: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.13 Halle B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

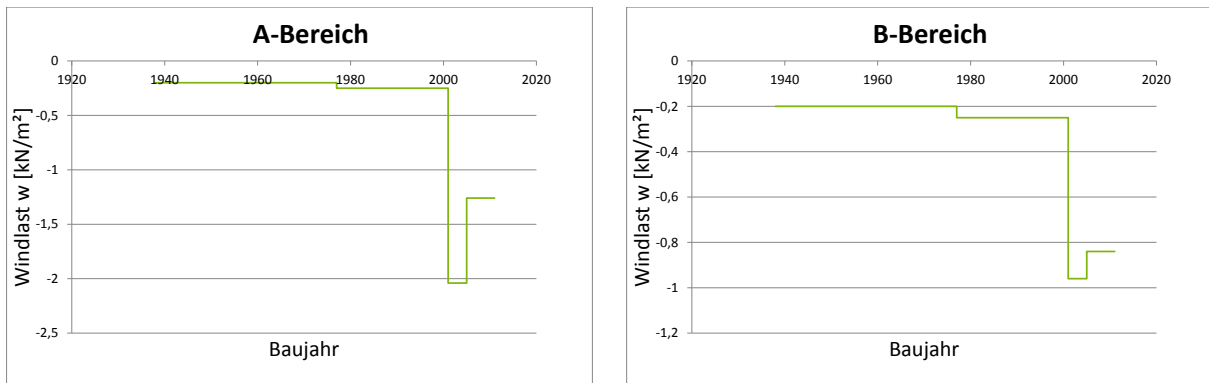


Abbildung 99: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

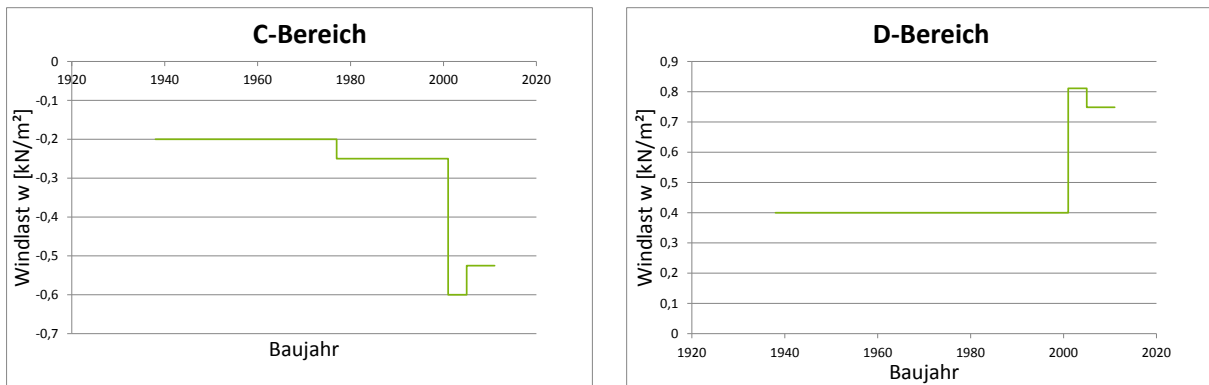


Abbildung 100: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

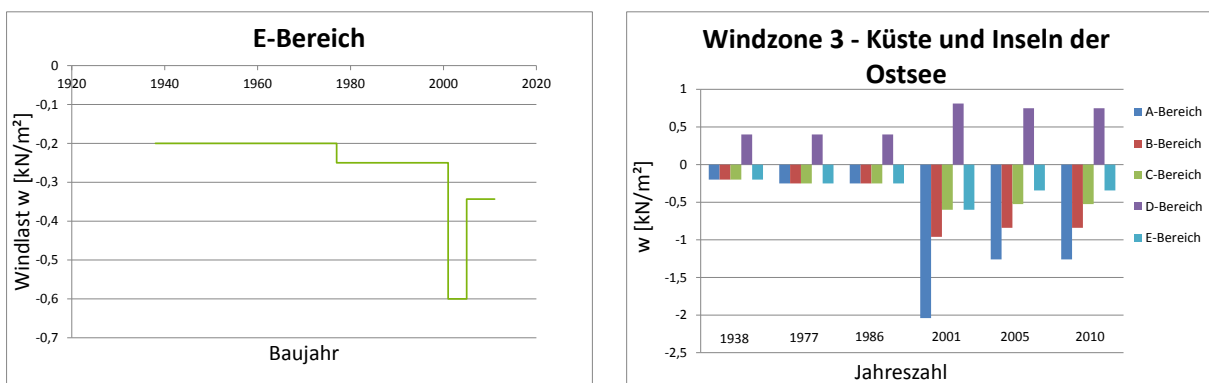


Abbildung 101: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.14 Halle B in der Windzone 4 Binnenland

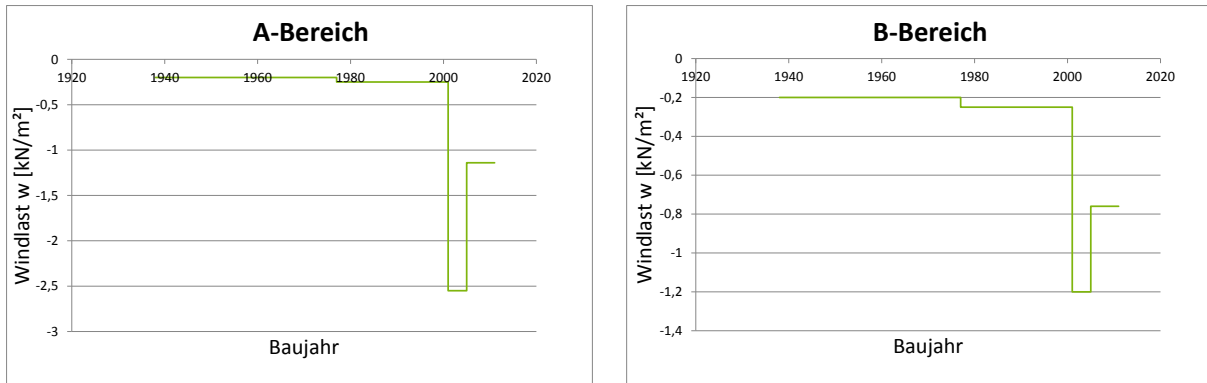


Abbildung 102: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

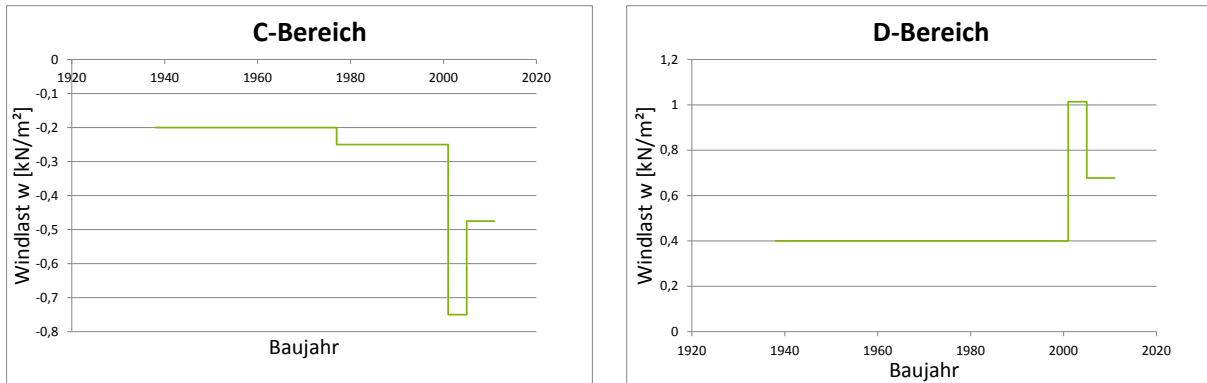


Abbildung 103: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

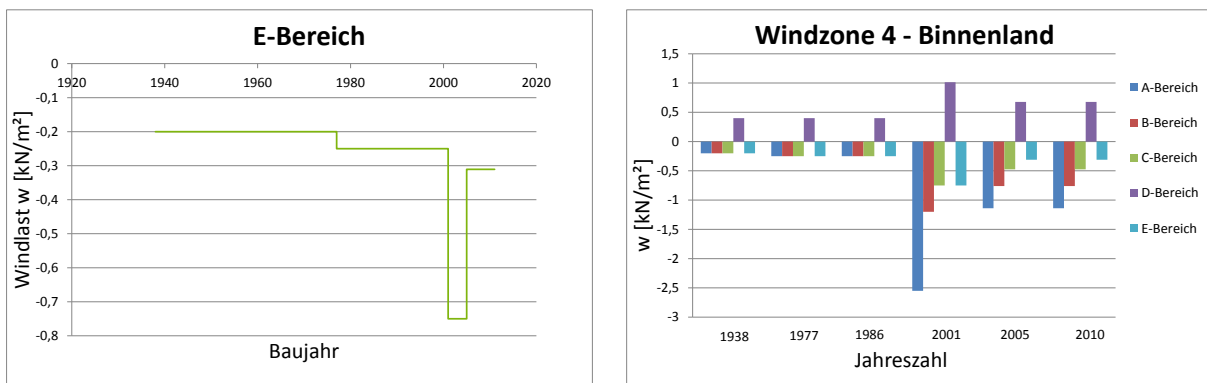


Abbildung 104: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.15 Halle B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

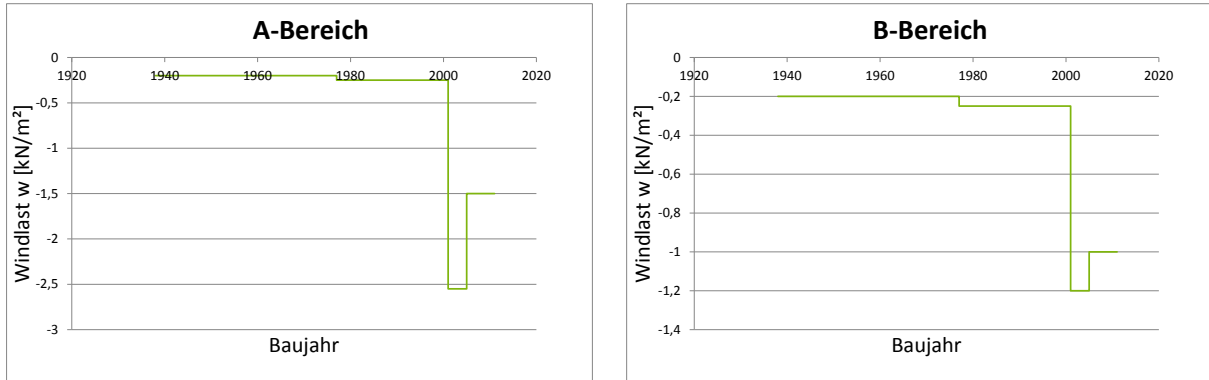


Abbildung 105: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

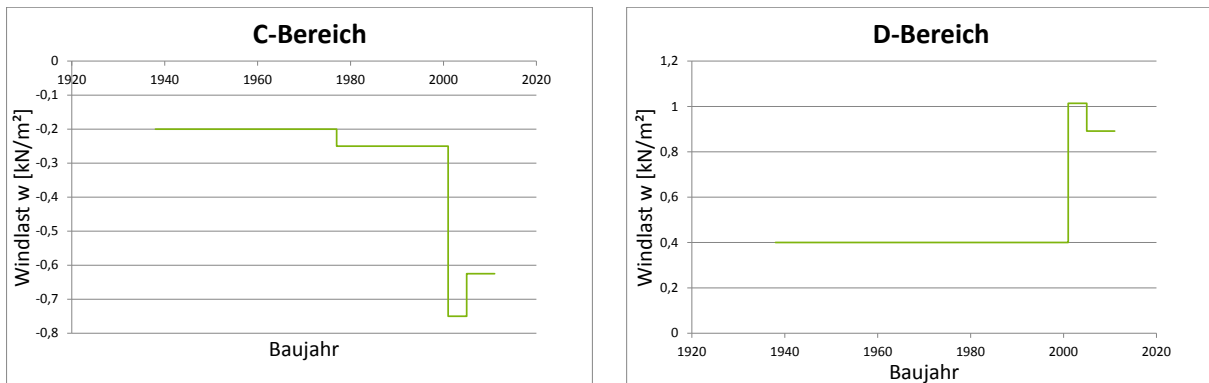


Abbildung 106: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

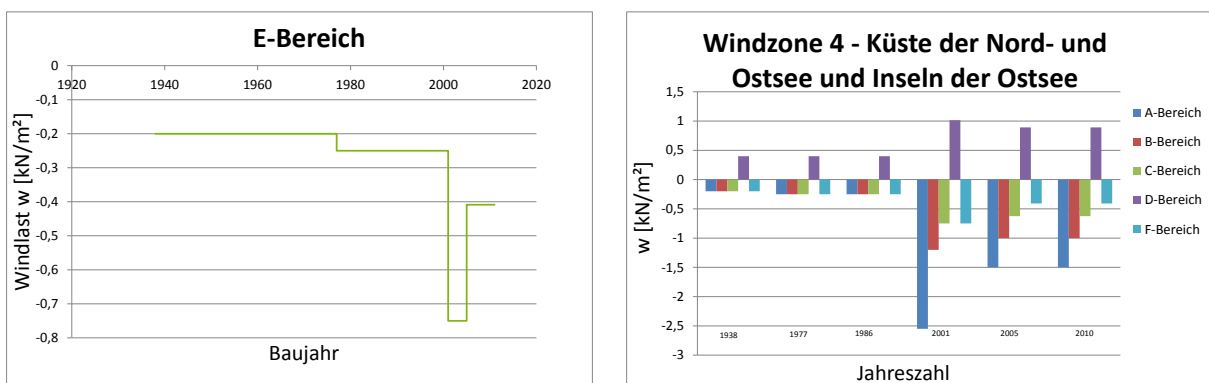


Abbildung 107: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.16 Halle B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

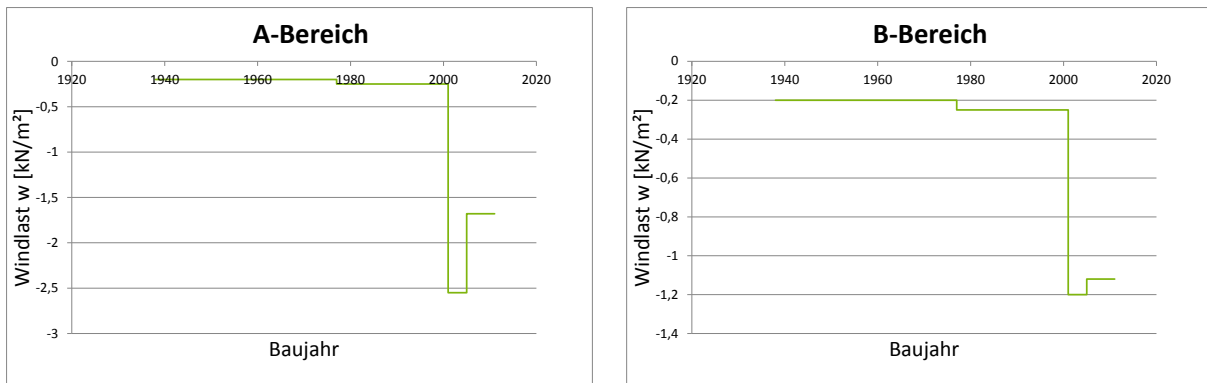


Abbildung 108: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

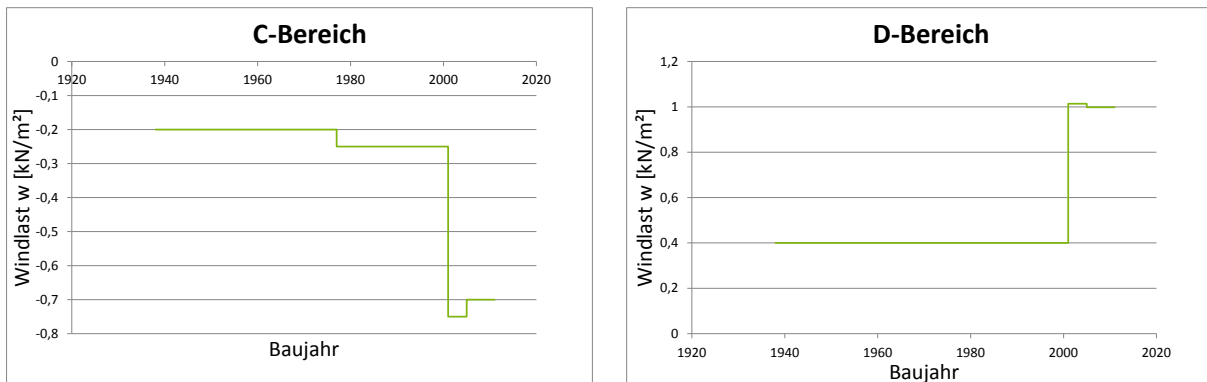


Abbildung 109: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

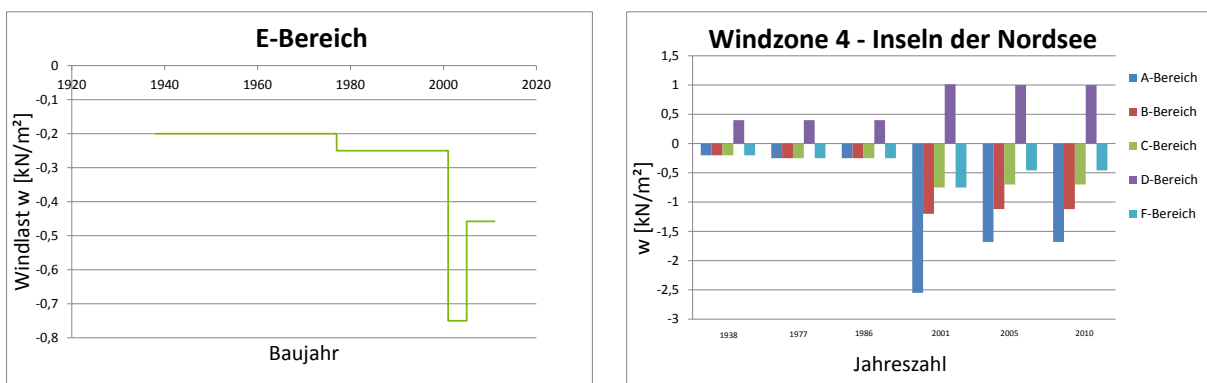


Abbildung 110: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.1.17 Halle C in der Windzone 1 Binnenland

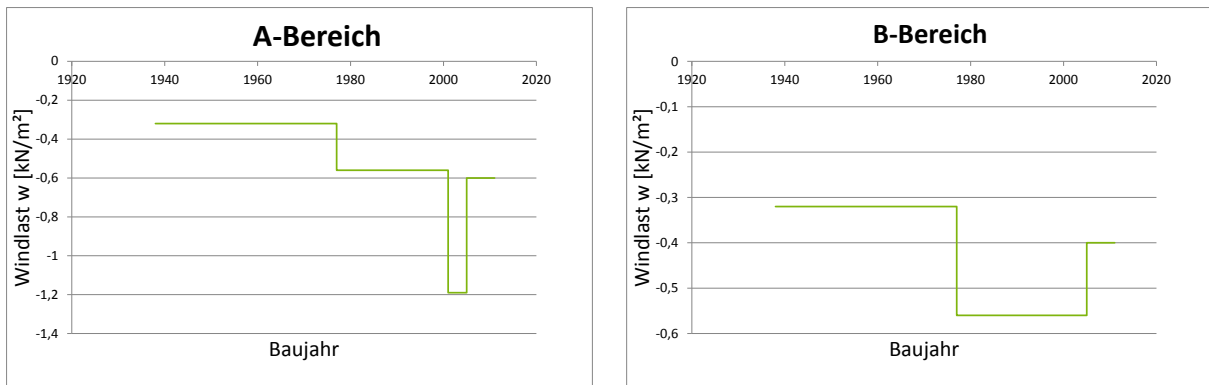


Abbildung 111: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

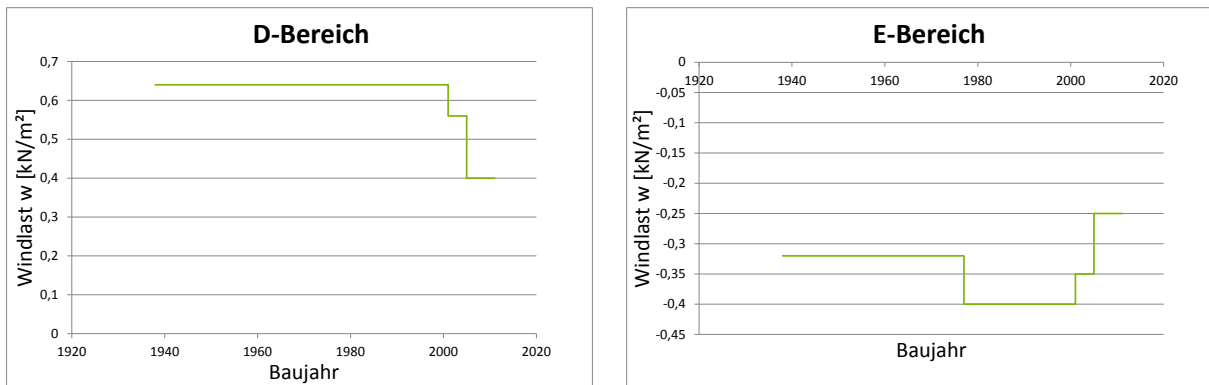


Abbildung 112: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

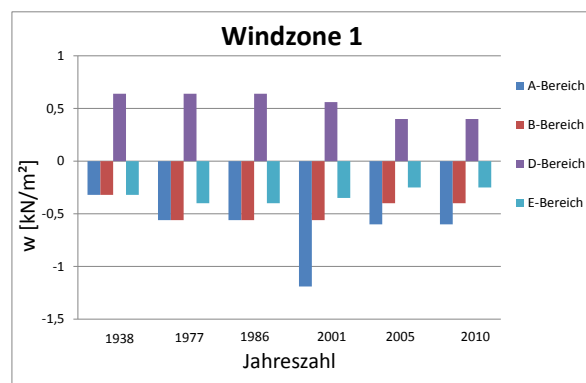


Abbildung 113: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.18 Halle C in der Windzone 2 Binnenland

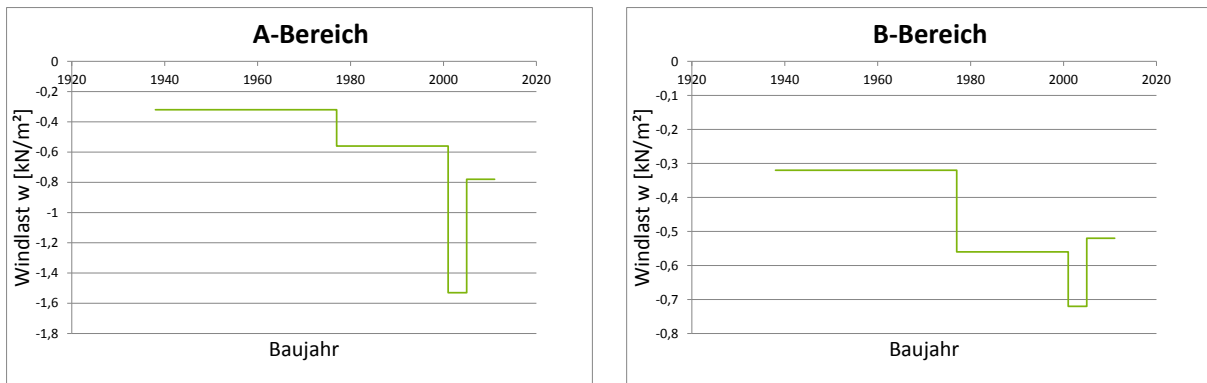


Abbildung 114: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

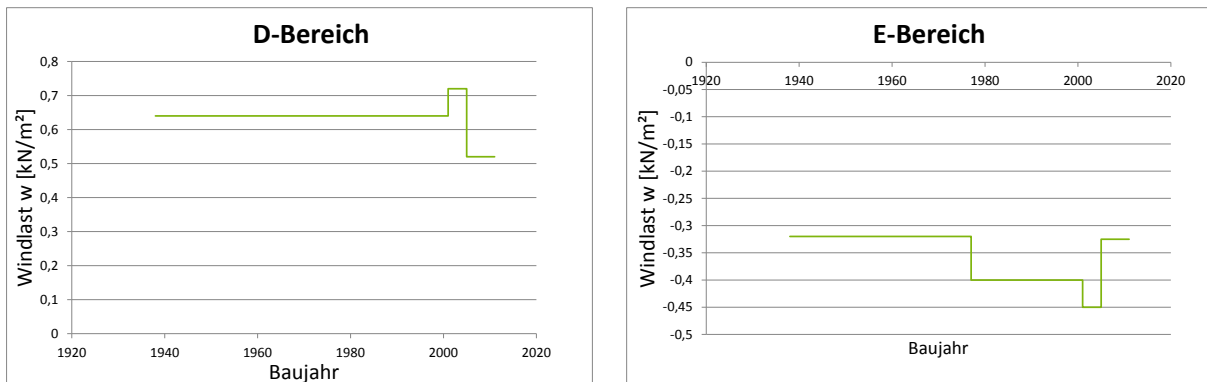


Abbildung 115: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

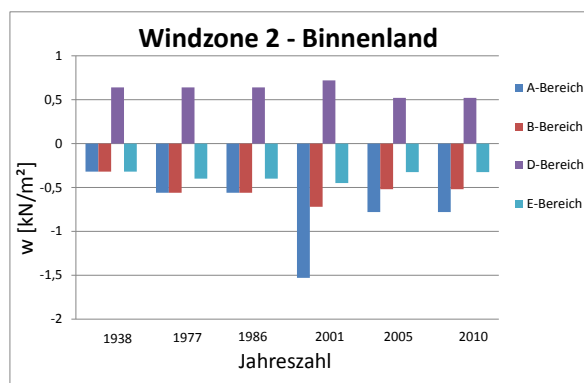


Abbildung 116: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.19 Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

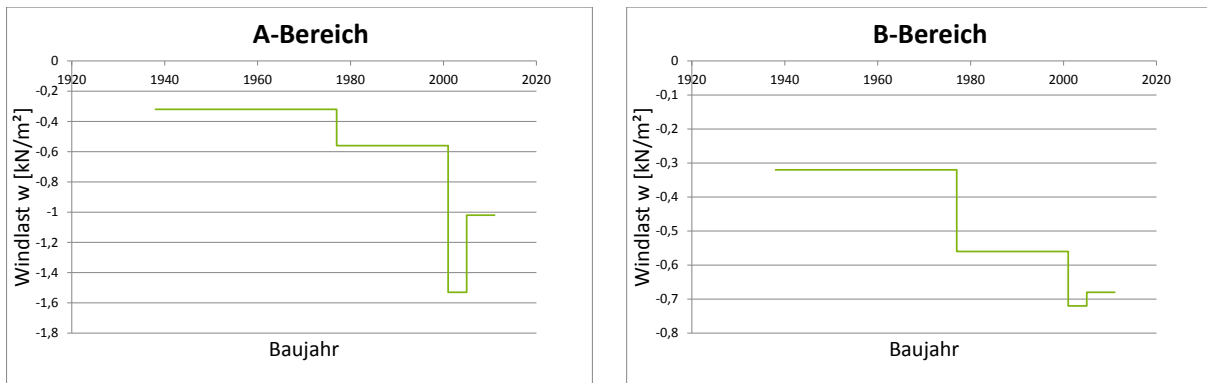


Abbildung 117: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

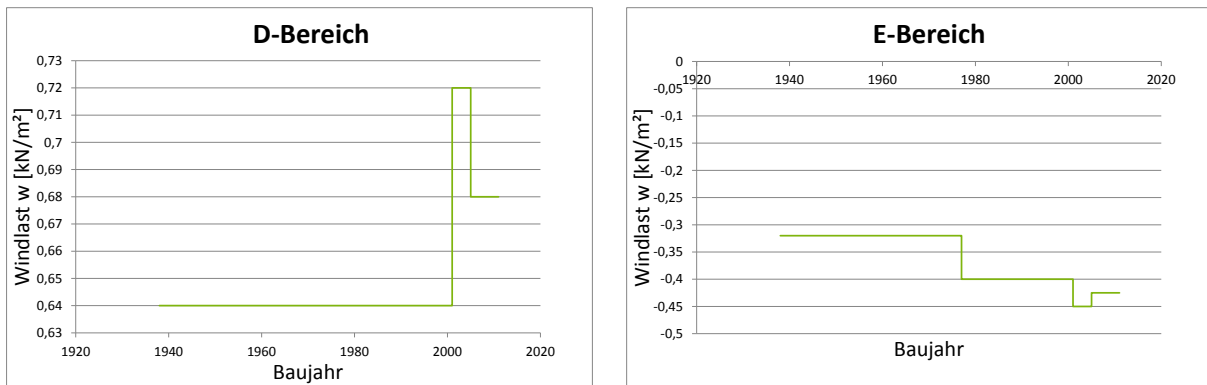


Abbildung 118: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

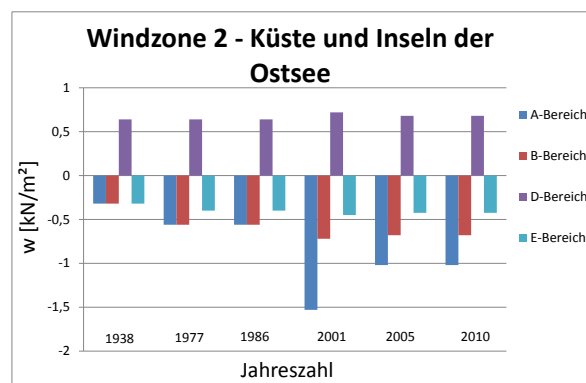


Abbildung 119: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.20 Halle C in der Windzone 3 Binnenland

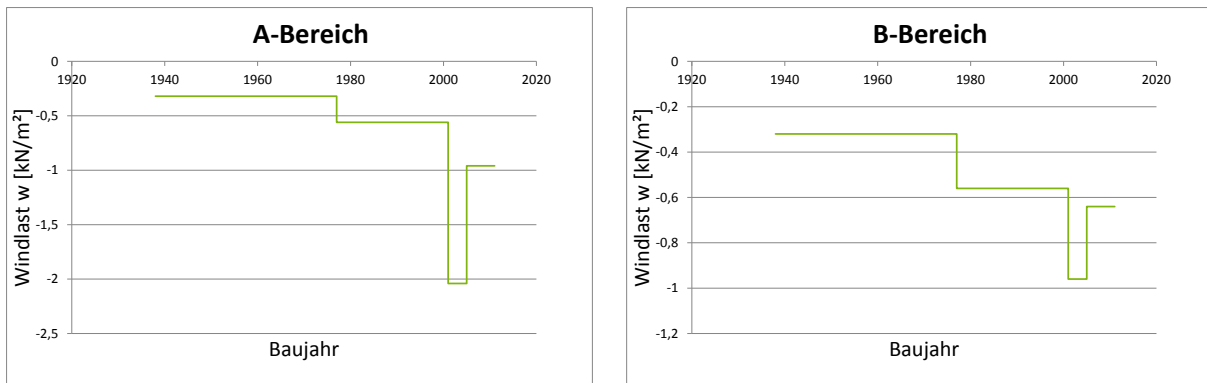


Abbildung 120: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

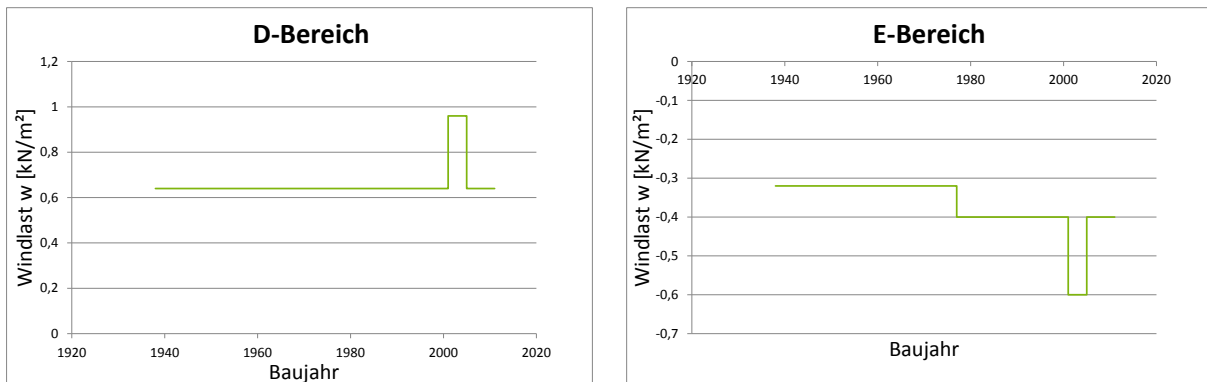


Abbildung 121: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

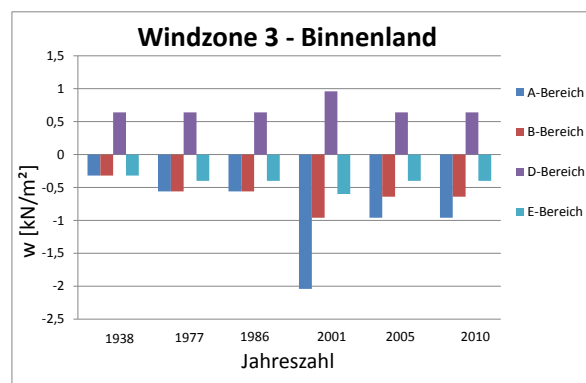


Abbildung 122: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.21 Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

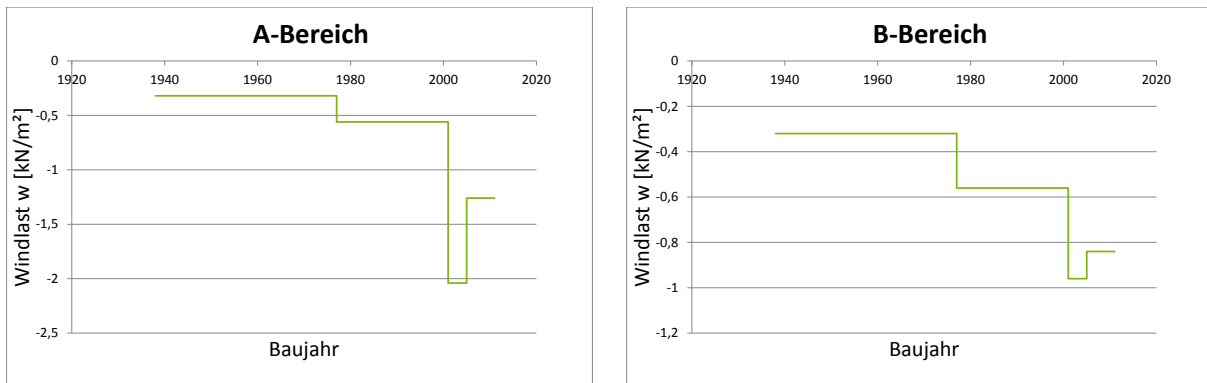


Abbildung 123: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

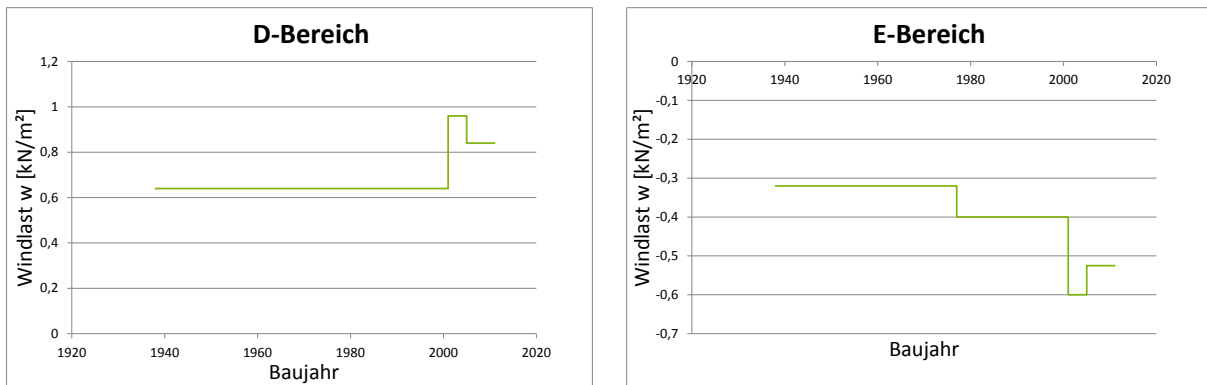


Abbildung 124: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

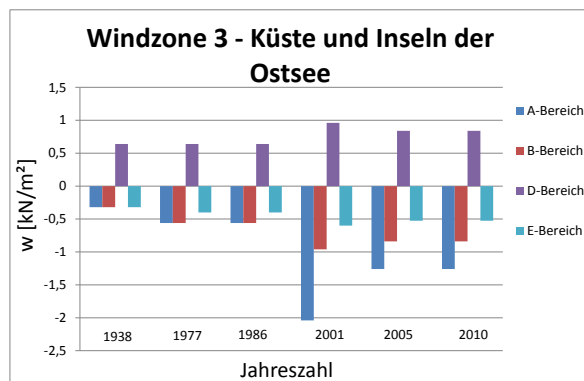


Abbildung 125: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.22 Halle C in der Windzone 4 Binnenland

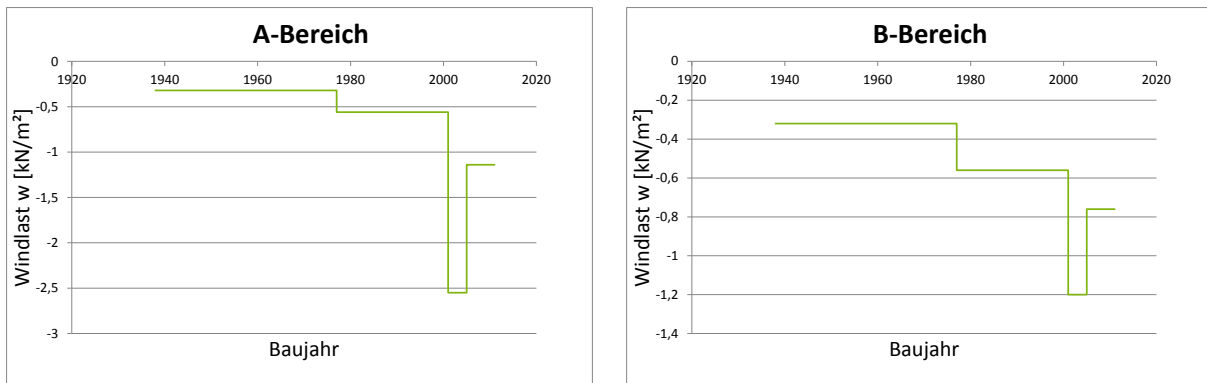


Abbildung 126: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

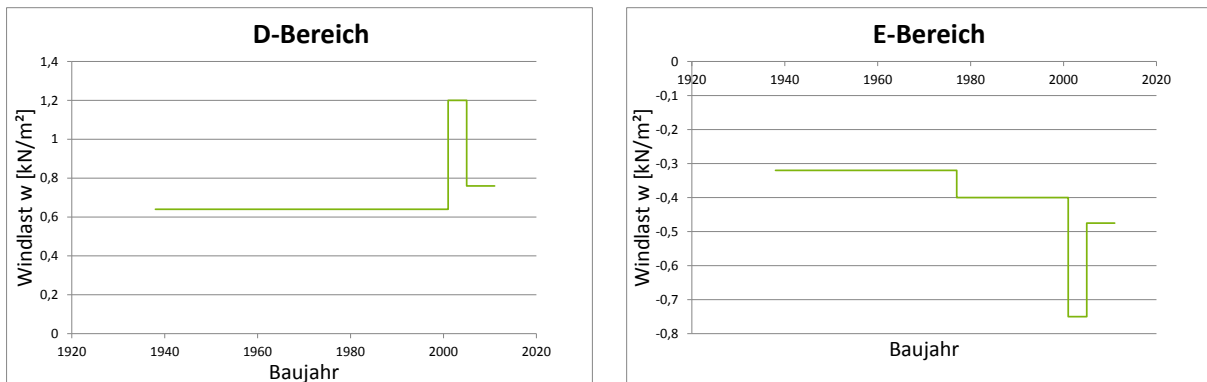


Abbildung 127: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

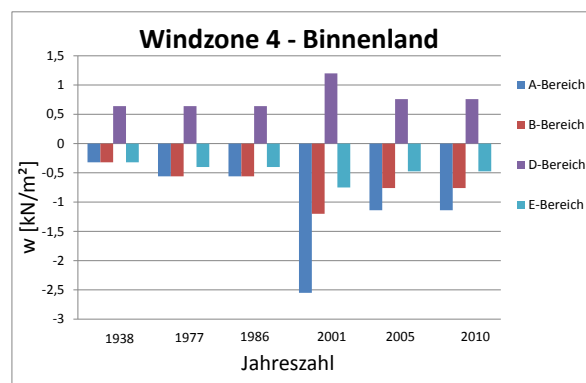


Abbildung 128: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.23 Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

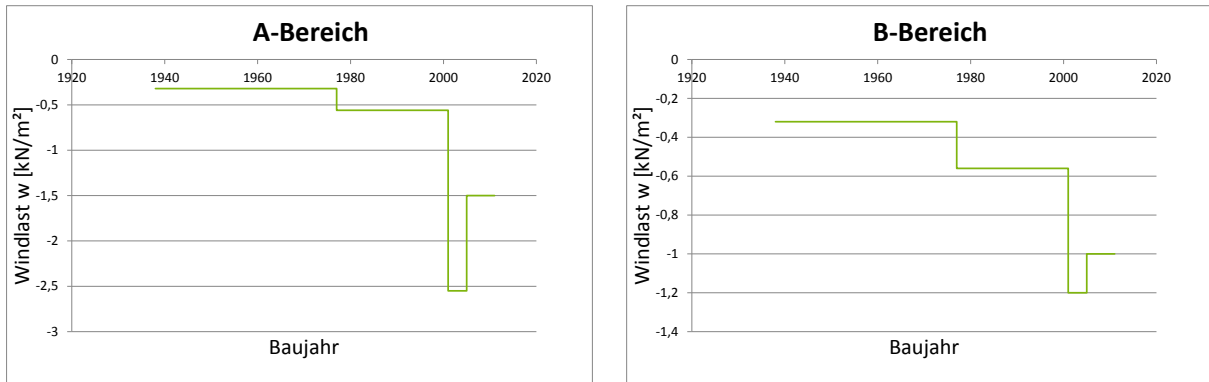


Abbildung 129: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

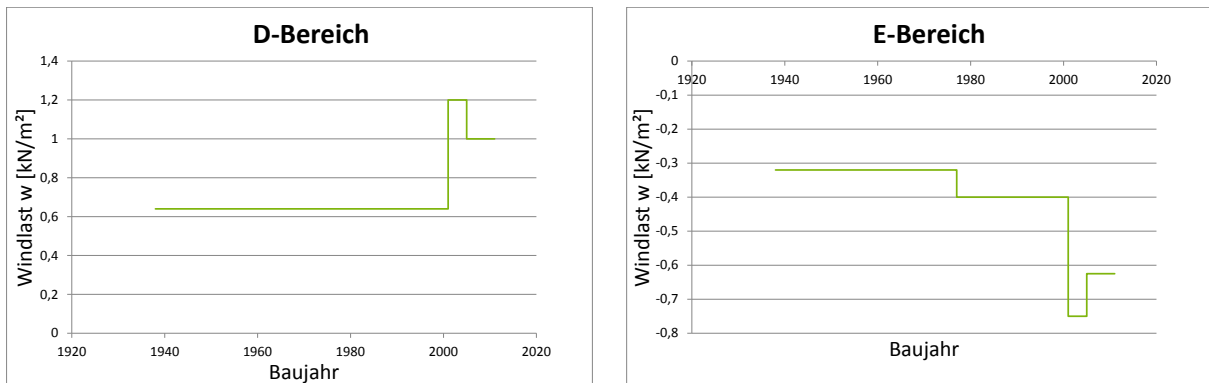


Abbildung 130: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

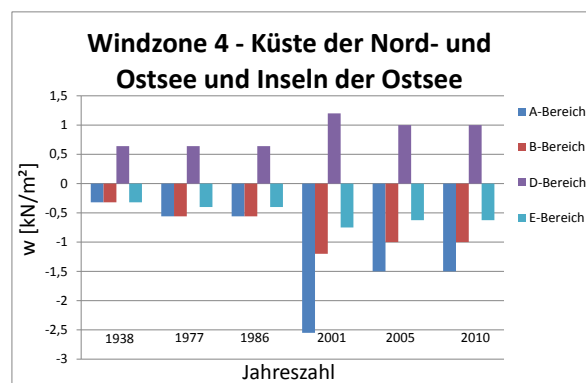


Abbildung 131: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.1.24 Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

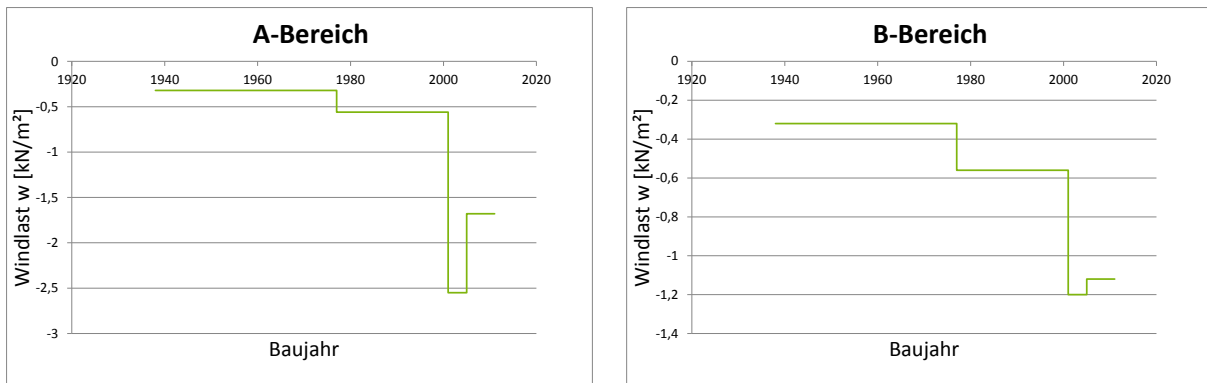


Abbildung 132: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

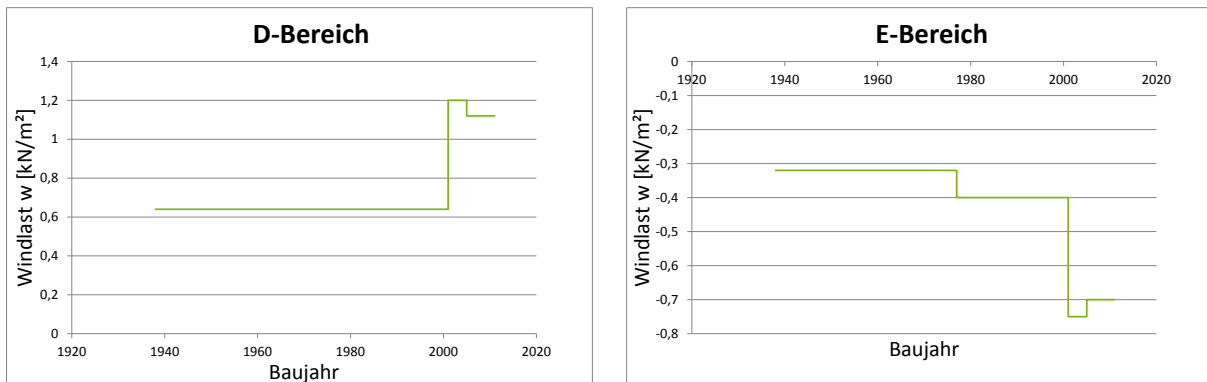


Abbildung 133: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

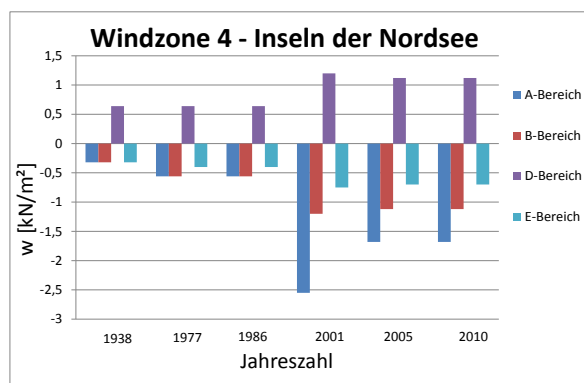


Abbildung 134: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2 Windlast auf Wände für die globale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010

5.2.1 Halle A (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

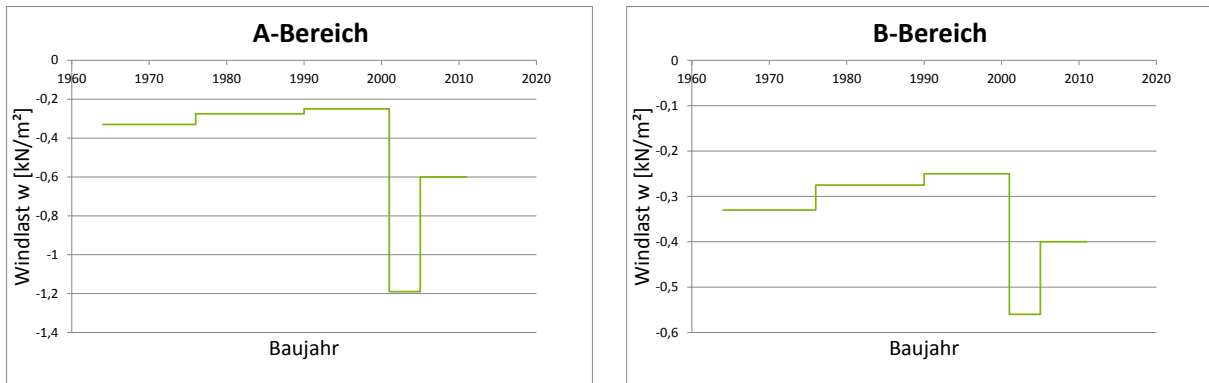


Abbildung 135: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

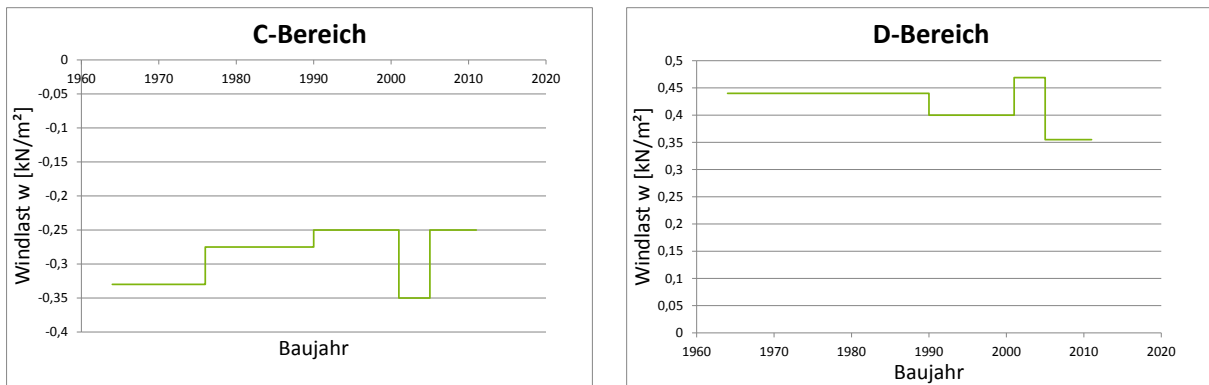


Abbildung 136: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

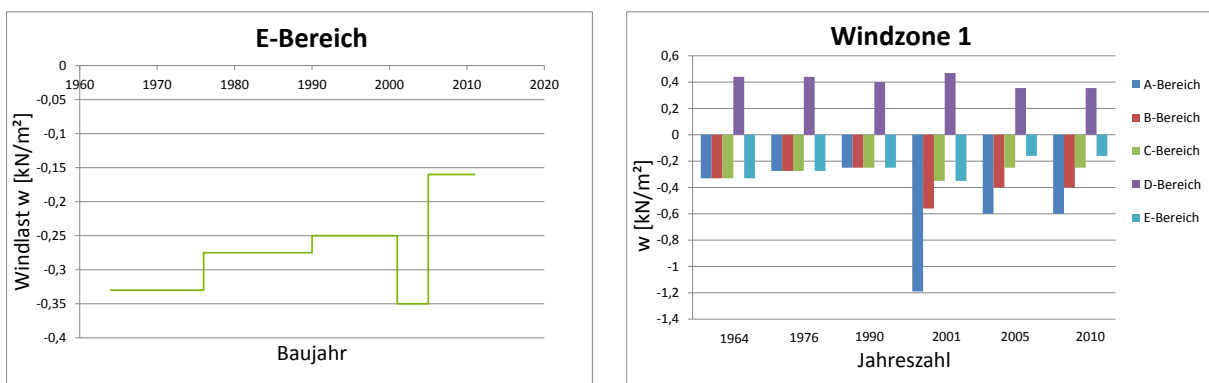


Abbildung 137: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.2 Halle A (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

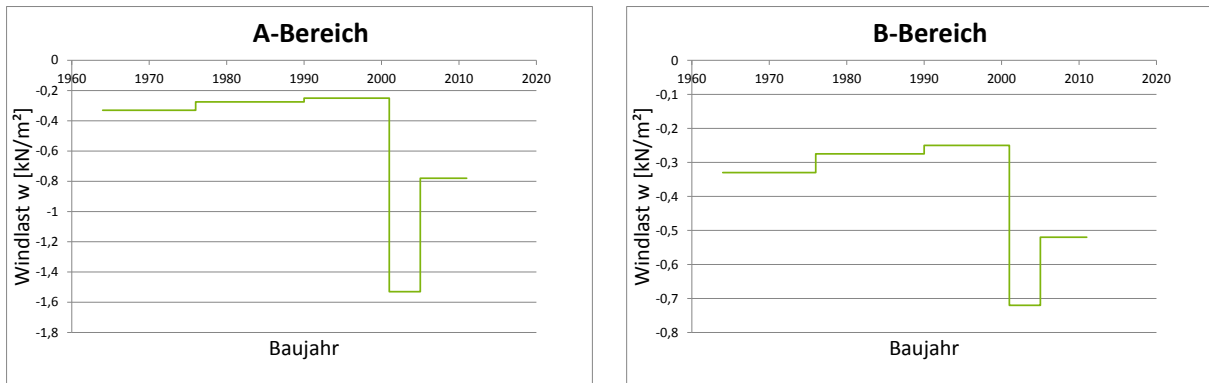


Abbildung 138: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

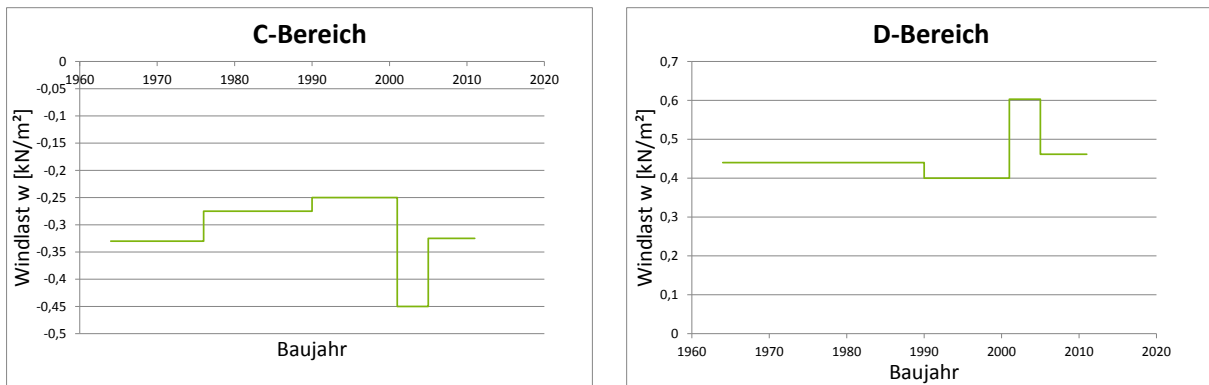


Abbildung 139: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

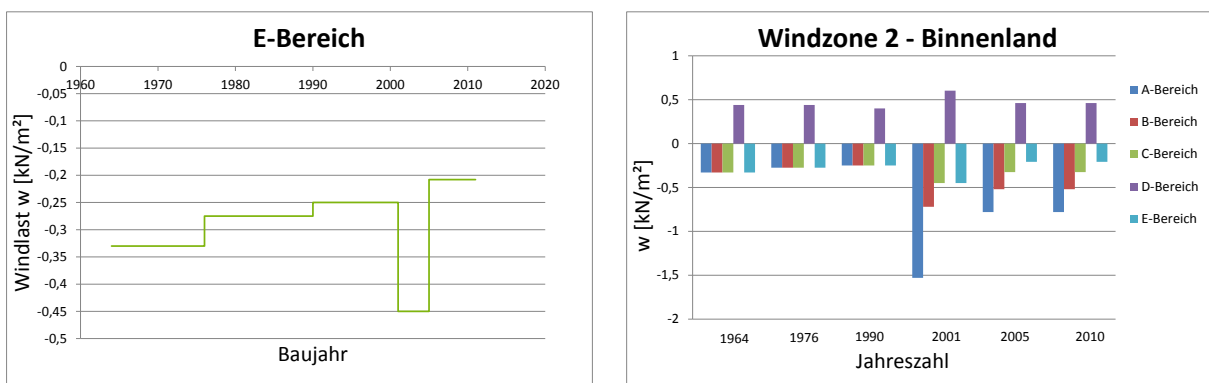


Abbildung 140: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.3 Halle A (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

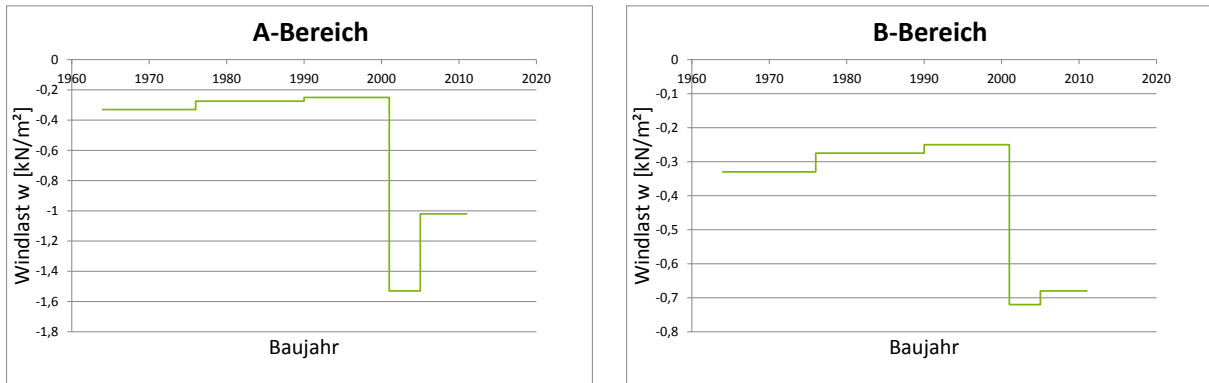


Abbildung 141: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

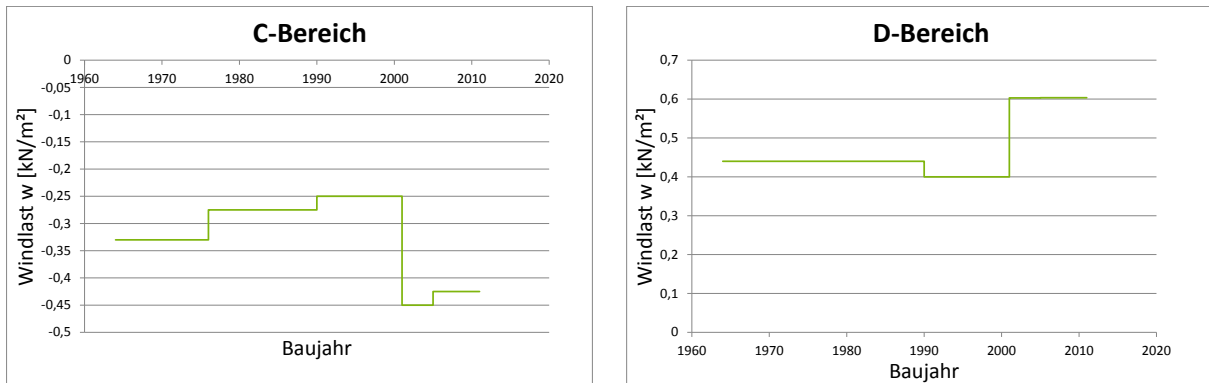


Abbildung 142: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

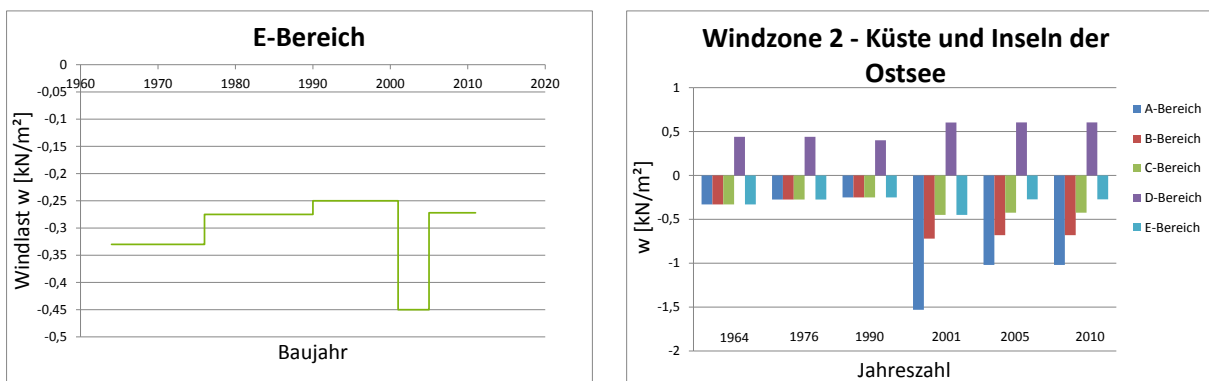


Abbildung 143: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.4 Halle A (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

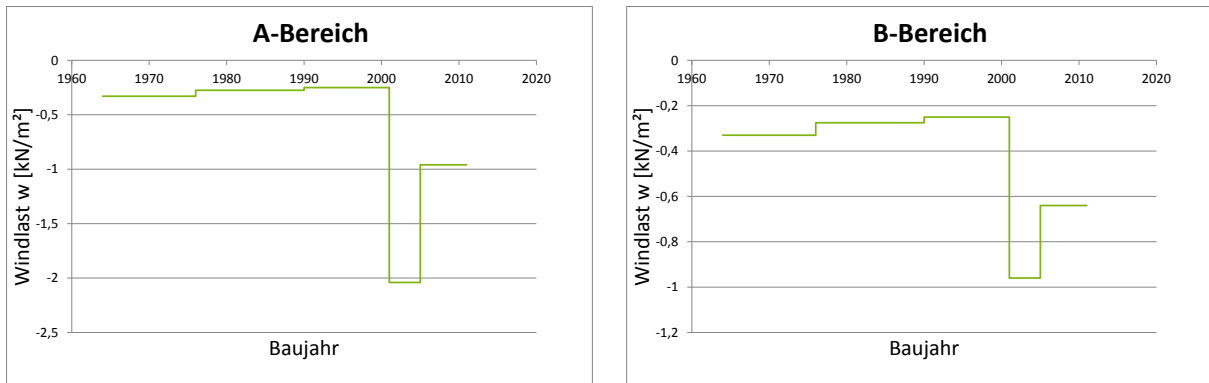


Abbildung 144: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

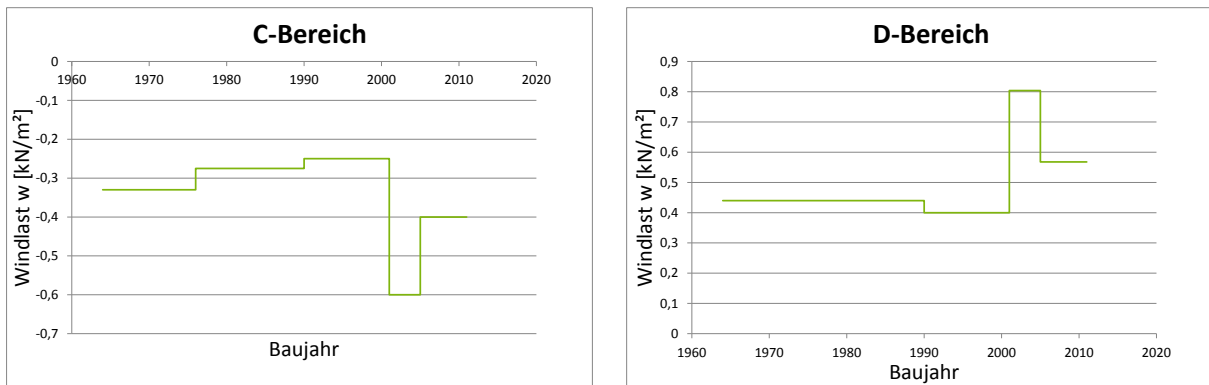


Abbildung 145: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

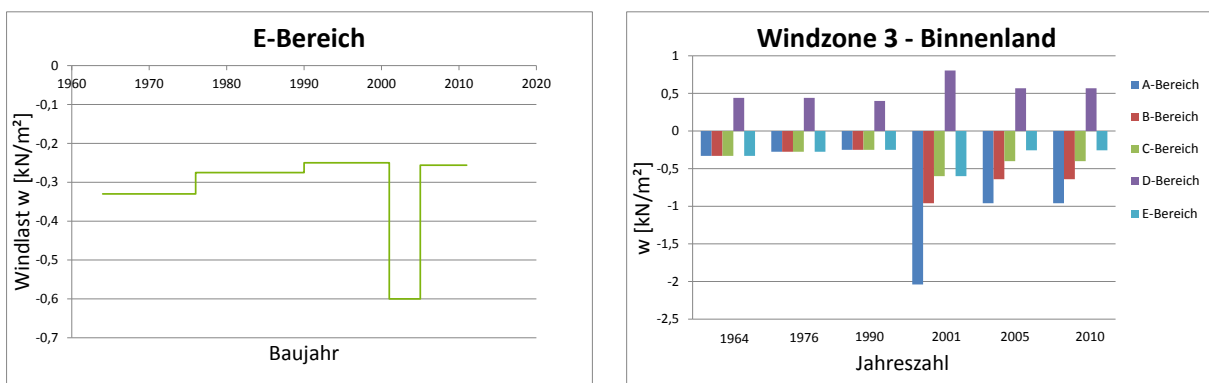


Abbildung 146: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.5 Halle A (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

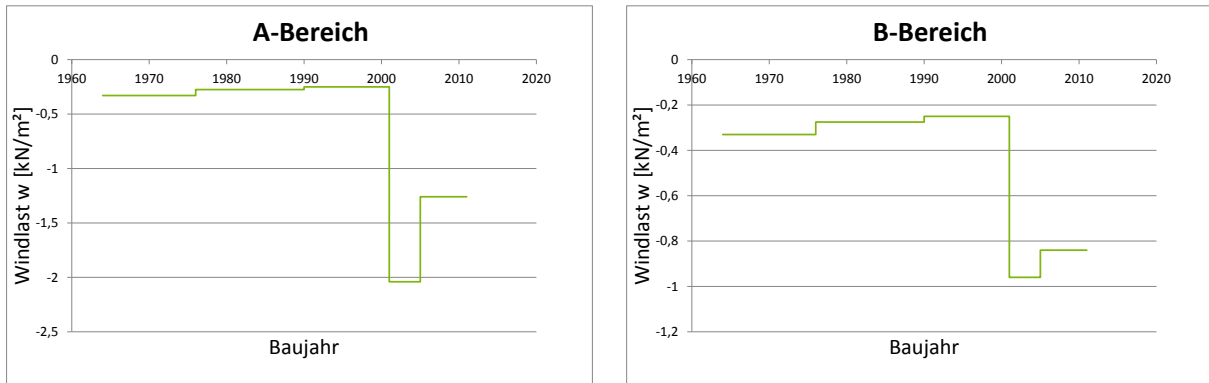


Abbildung 147: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

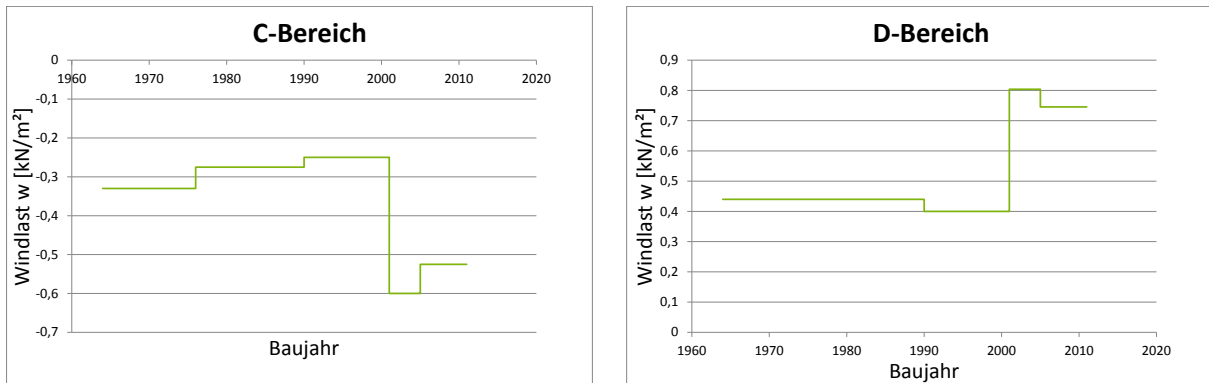


Abbildung 148: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

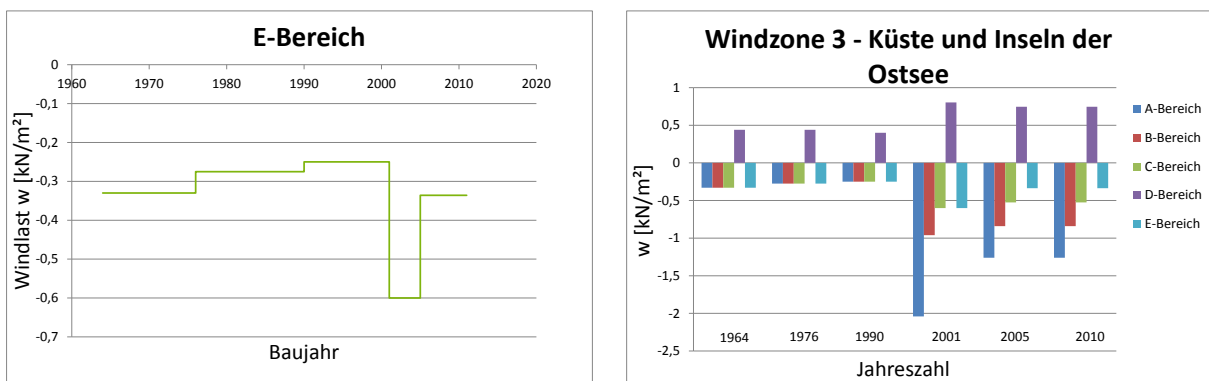


Abbildung 149: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.6 Halle A (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

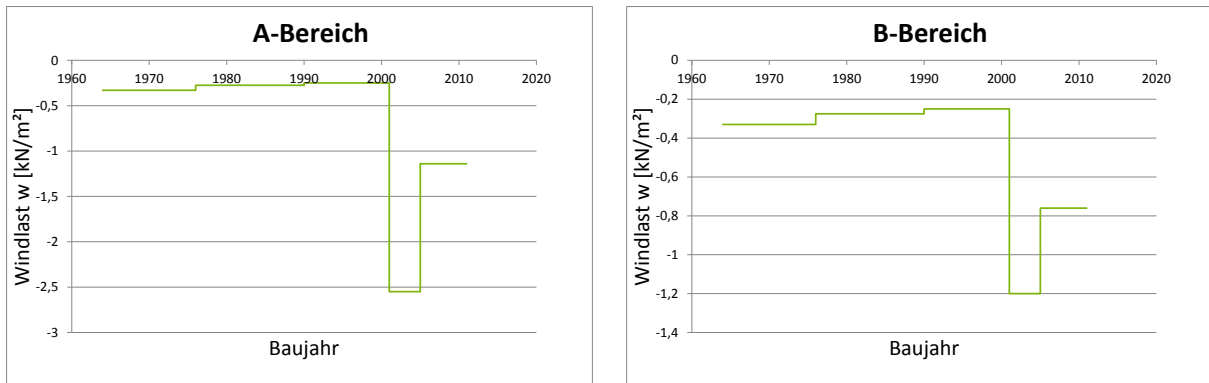


Abbildung 150: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

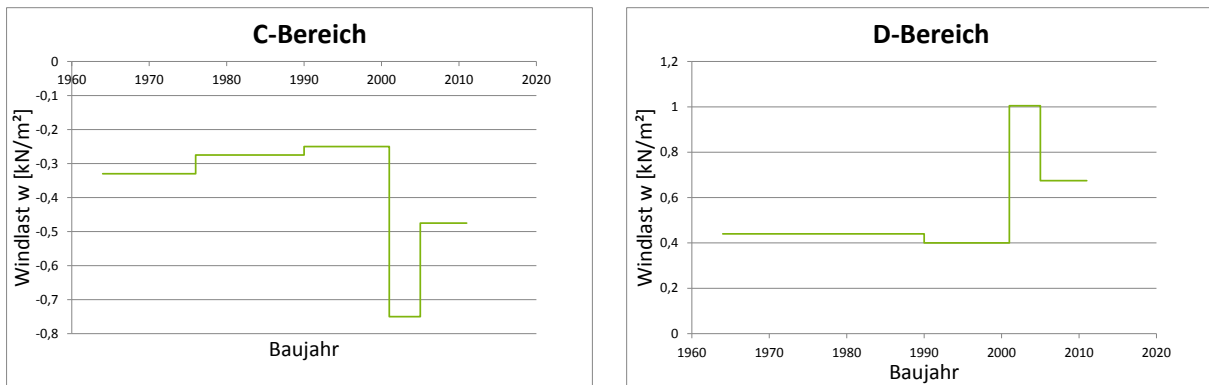


Abbildung 151: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

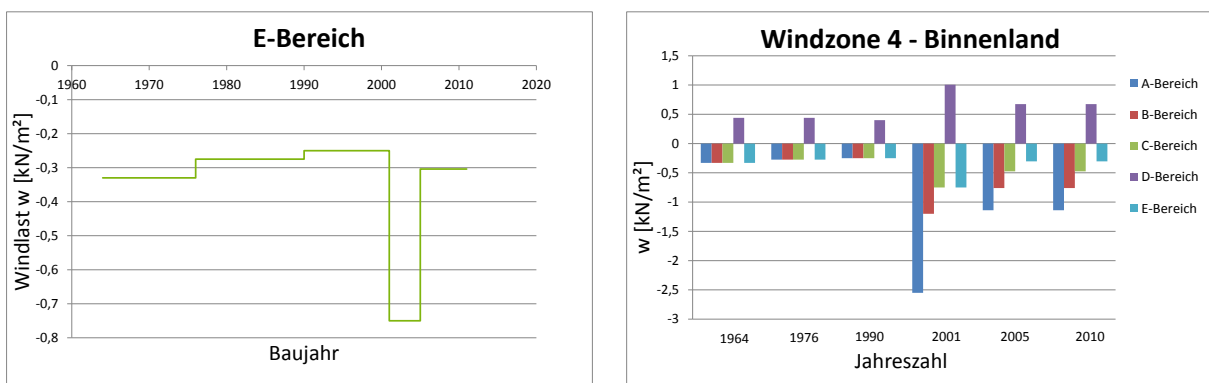


Abbildung 152: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.7 Halle A (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

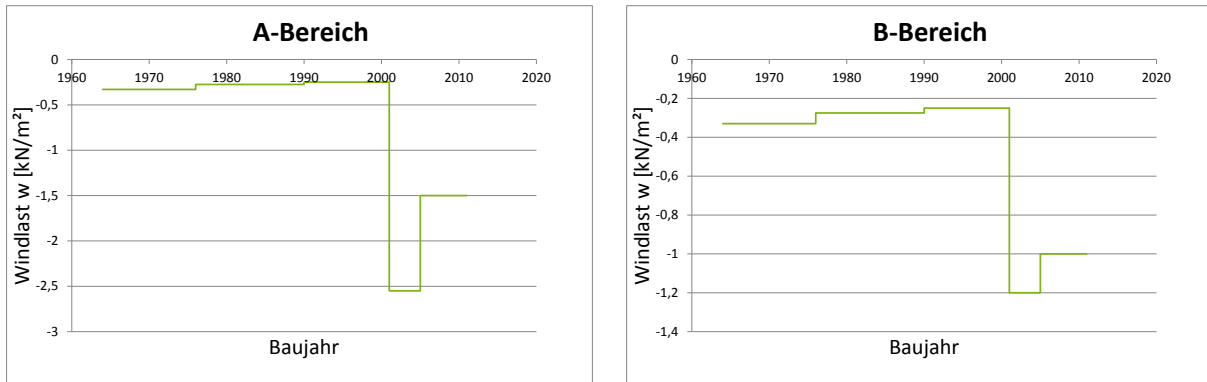


Abbildung 153: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

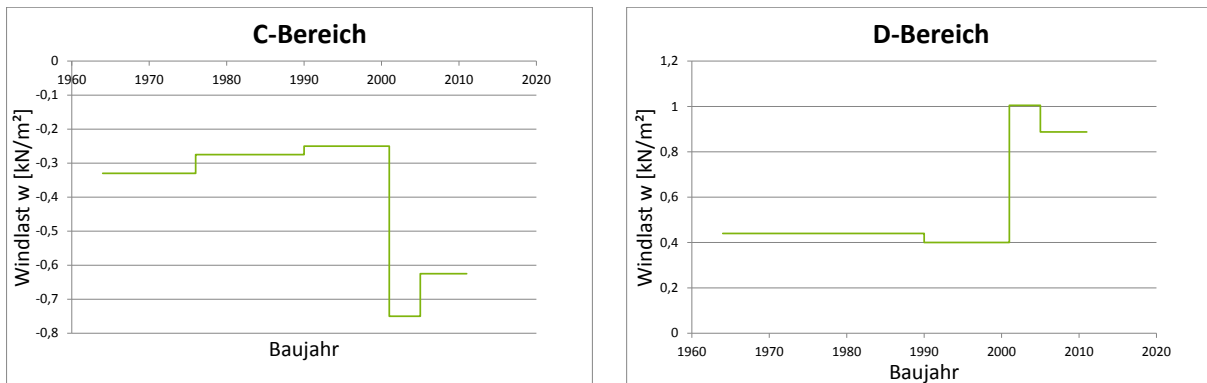


Abbildung 154: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

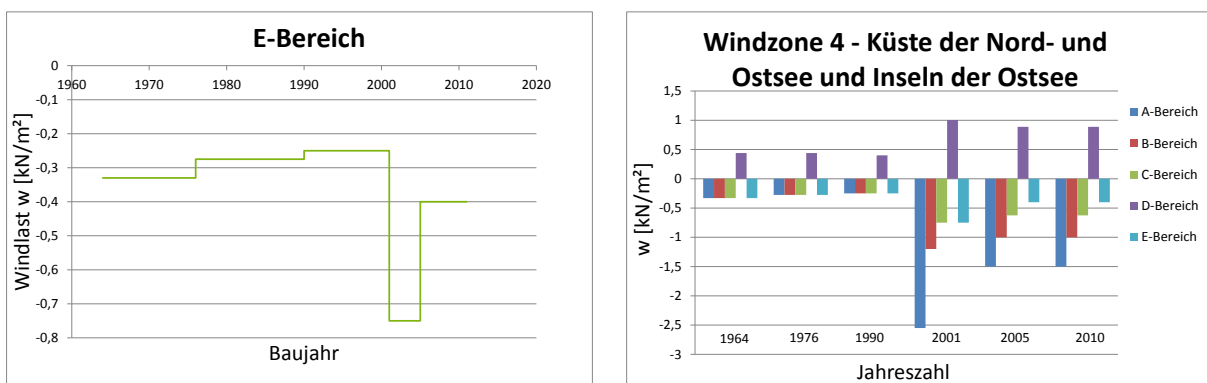


Abbildung 155: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.8 Halle A (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

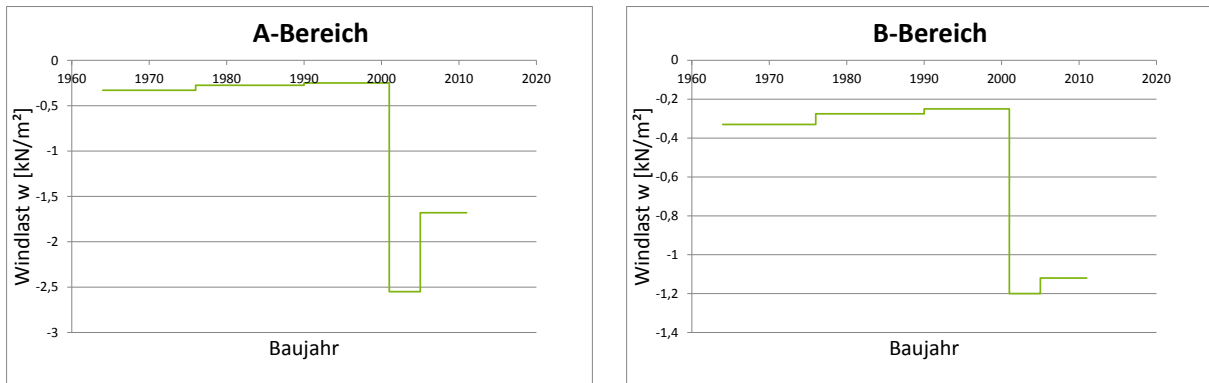


Abbildung 156: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

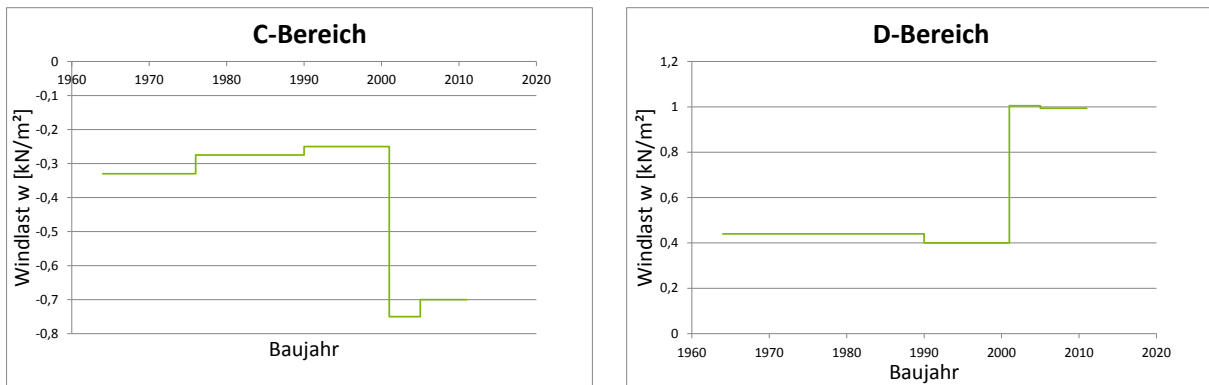


Abbildung 157: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

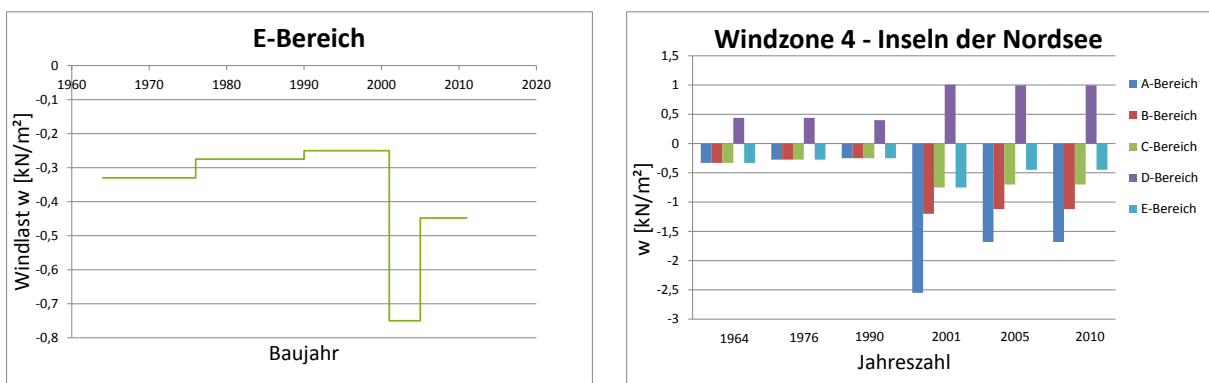


Abbildung 158: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.9 Halle B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

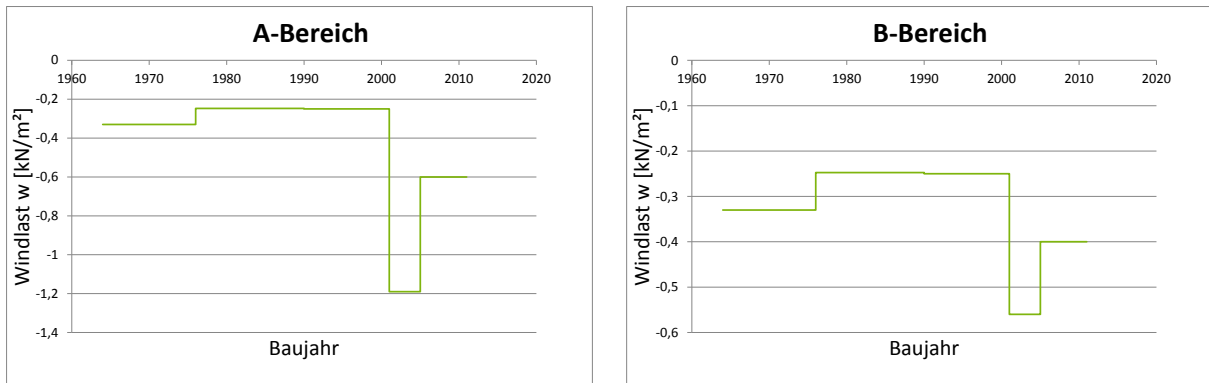


Abbildung 159: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

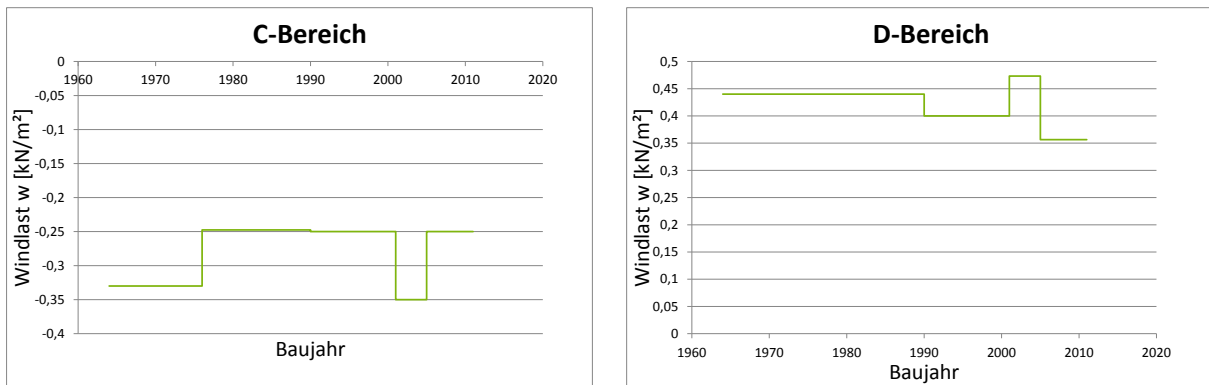


Abbildung 160: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

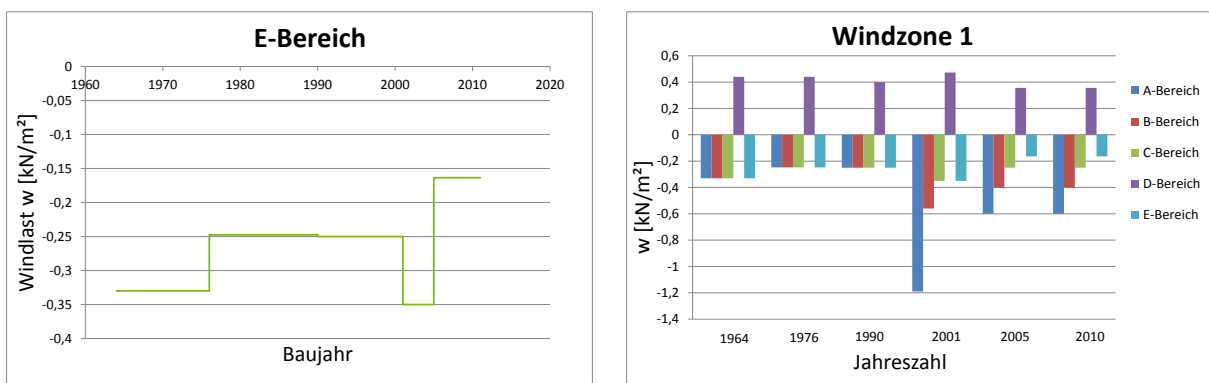


Abbildung 161: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.10 Halle B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

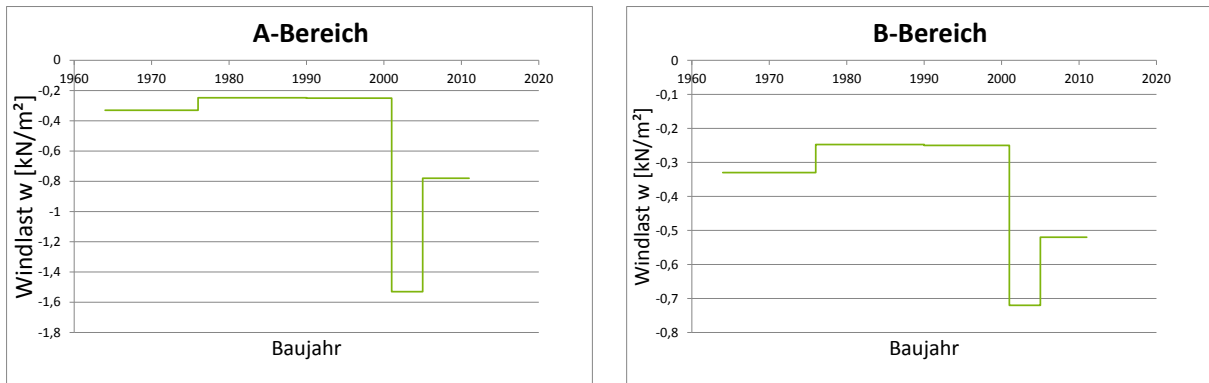


Abbildung 162: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

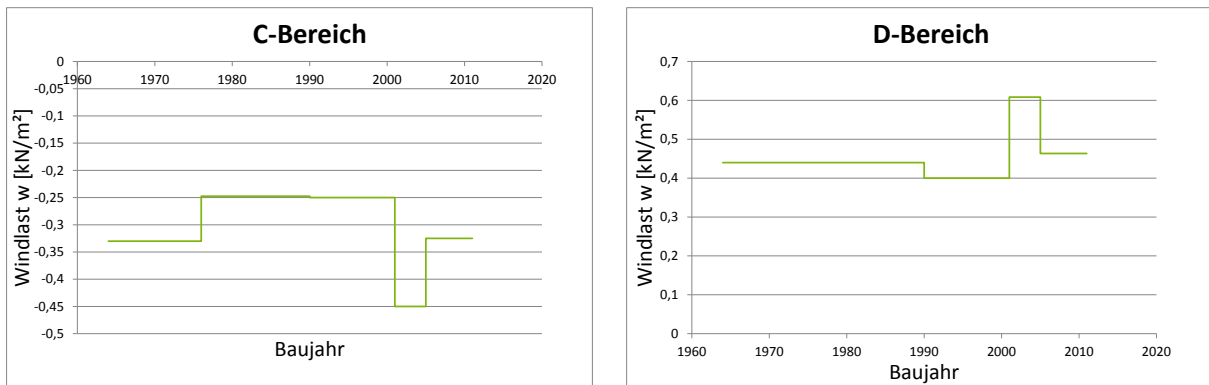


Abbildung 163: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

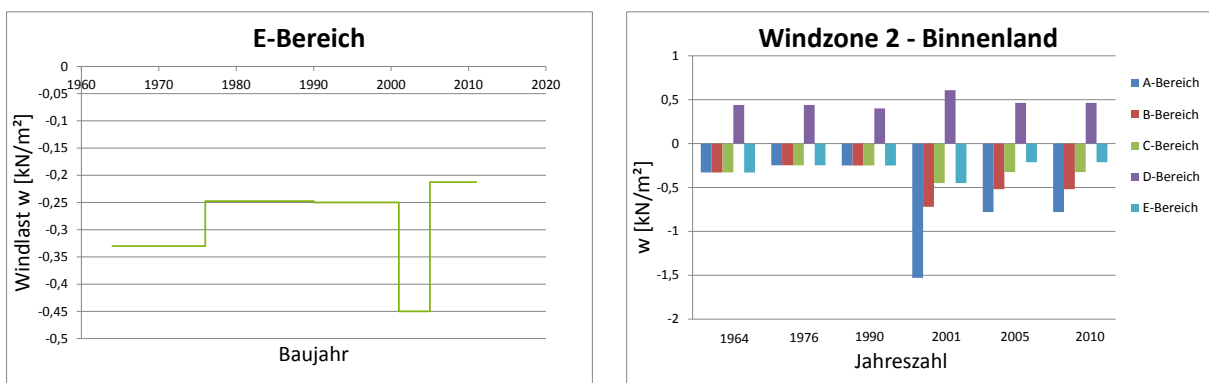


Abbildung 164: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.11 Halle B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

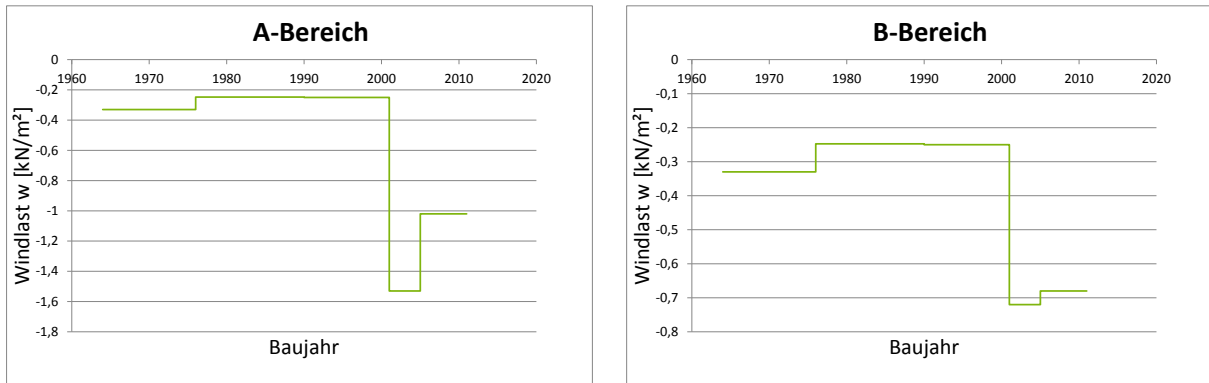


Abbildung 165: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

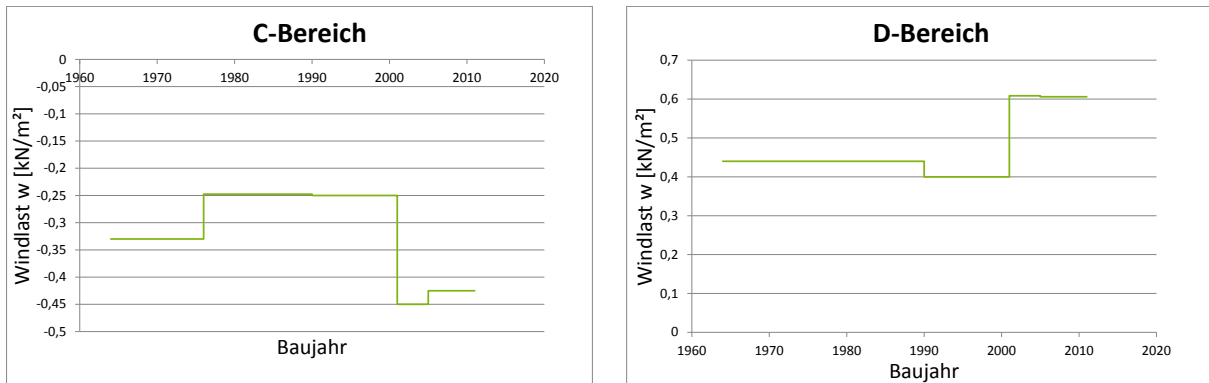


Abbildung 166: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

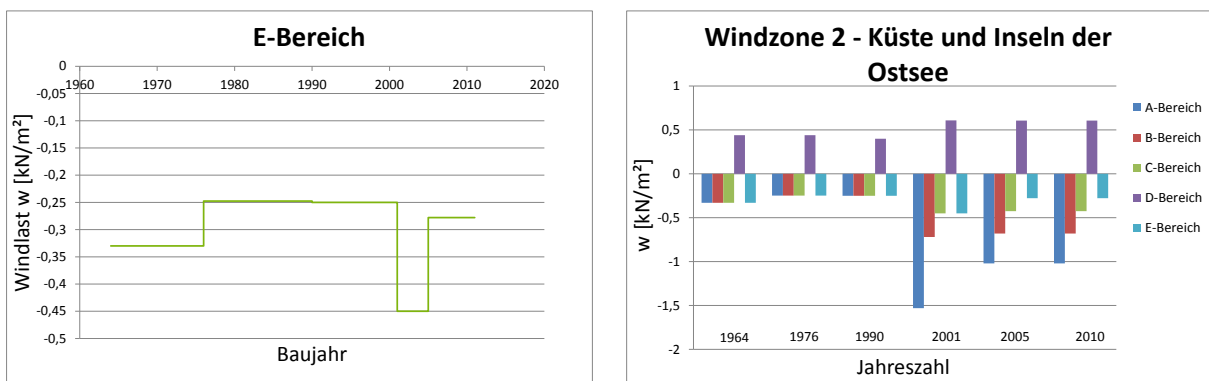


Abbildung 167: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.12 Halle B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

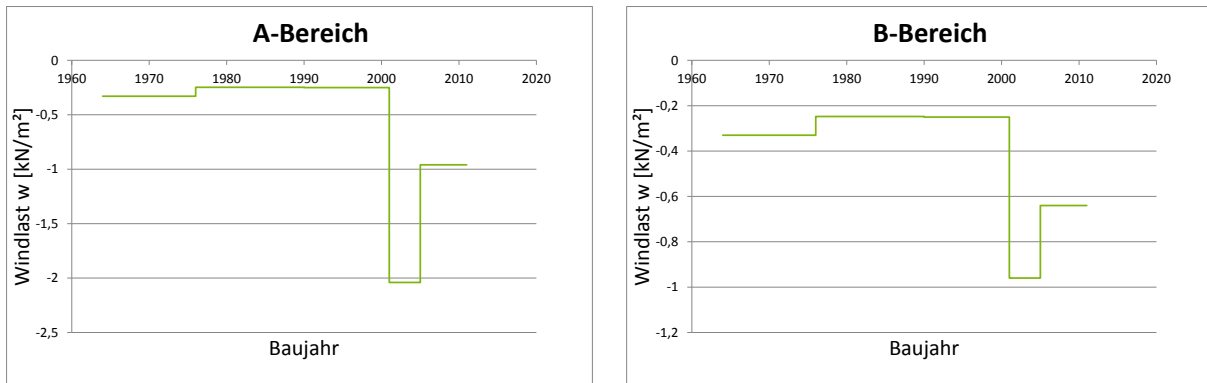


Abbildung 168: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

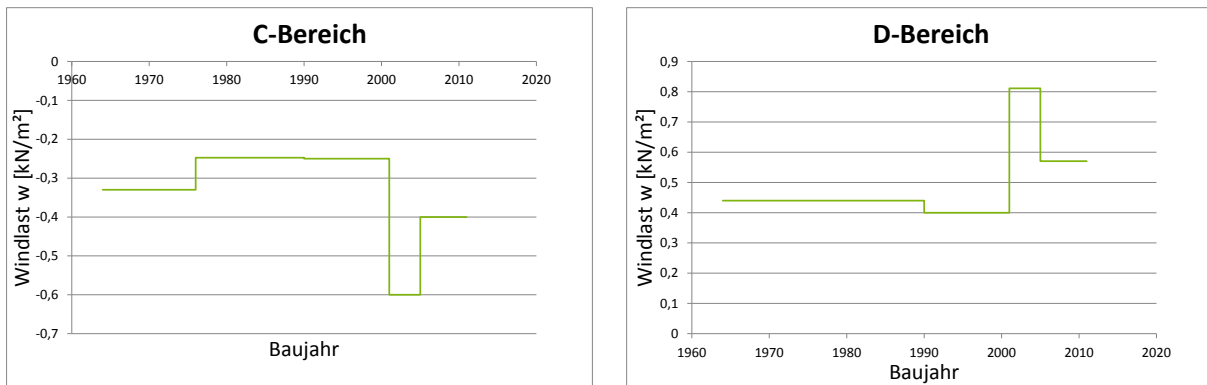


Abbildung 169: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

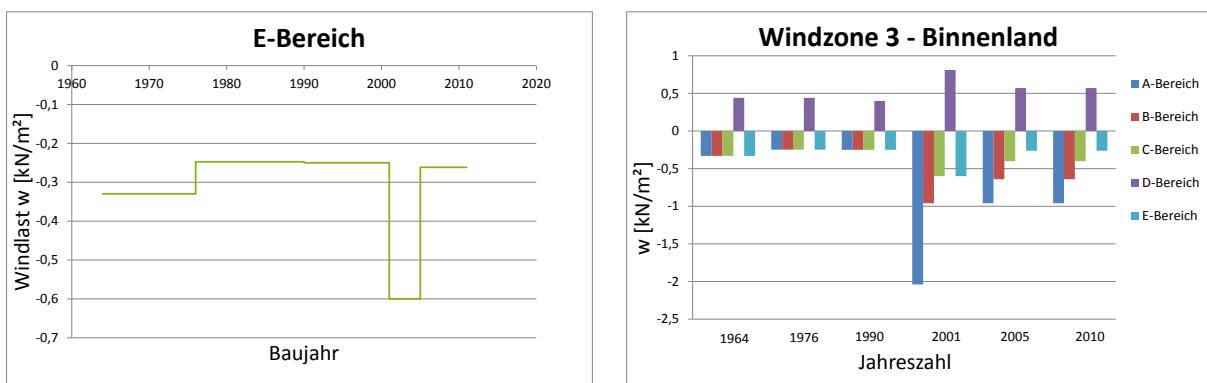


Abbildung 170: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.13 Halle B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

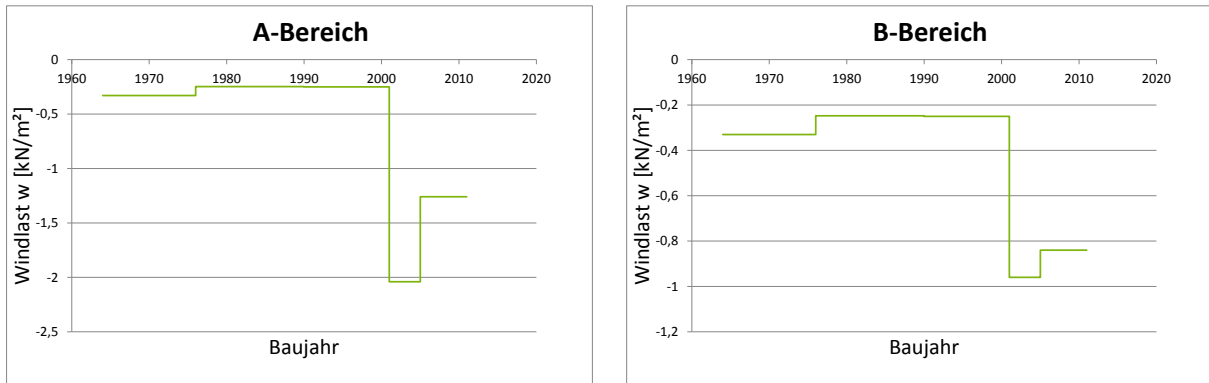


Abbildung 171: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

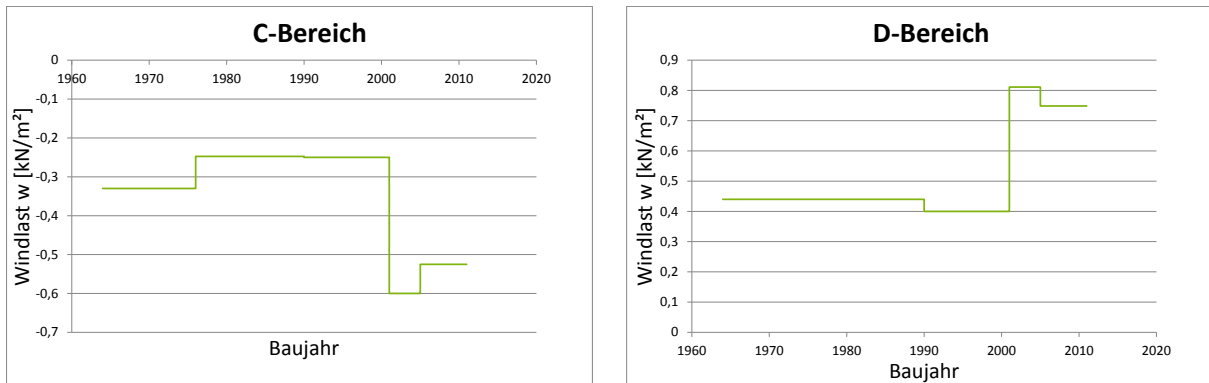


Abbildung 172: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

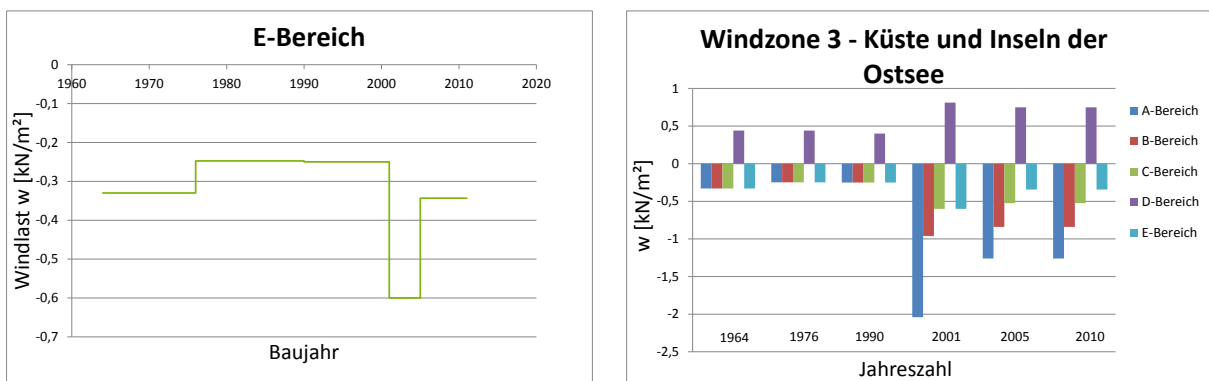


Abbildung 173: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.14 Halle B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

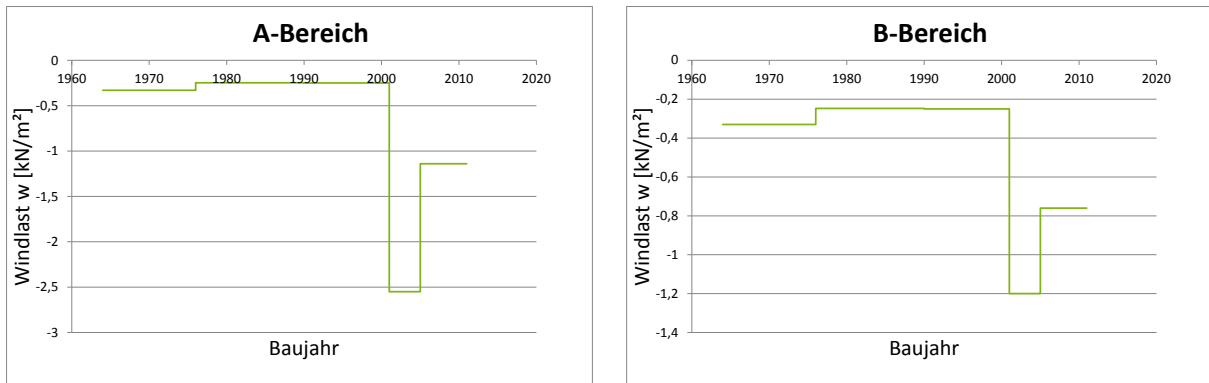


Abbildung 174: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

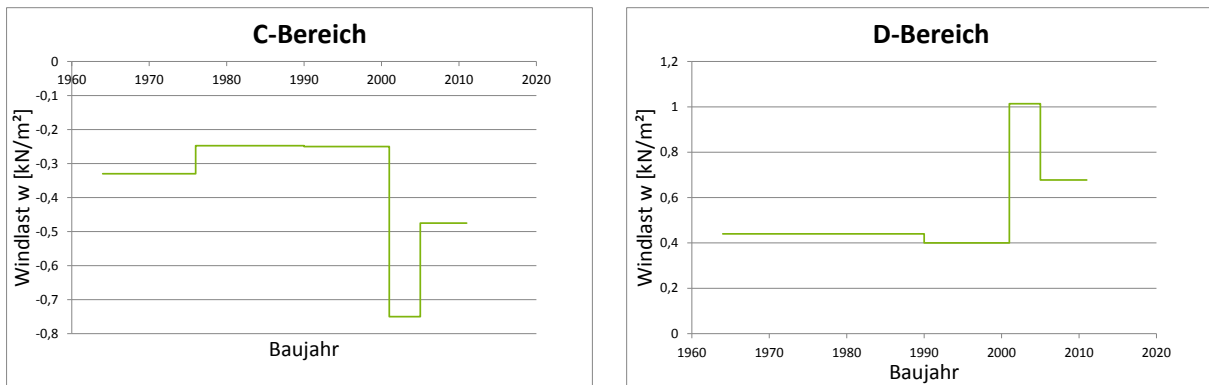


Abbildung 175: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

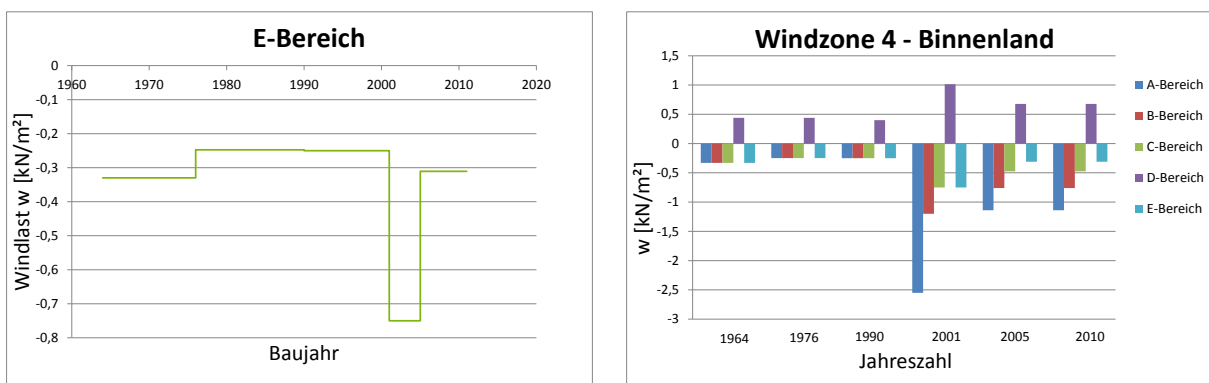


Abbildung 176: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.15 Halle B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

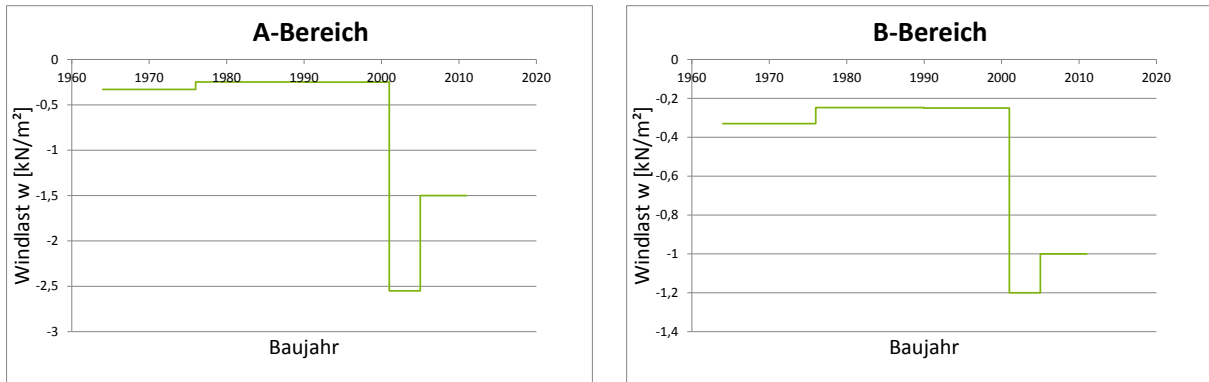


Abbildung 177: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

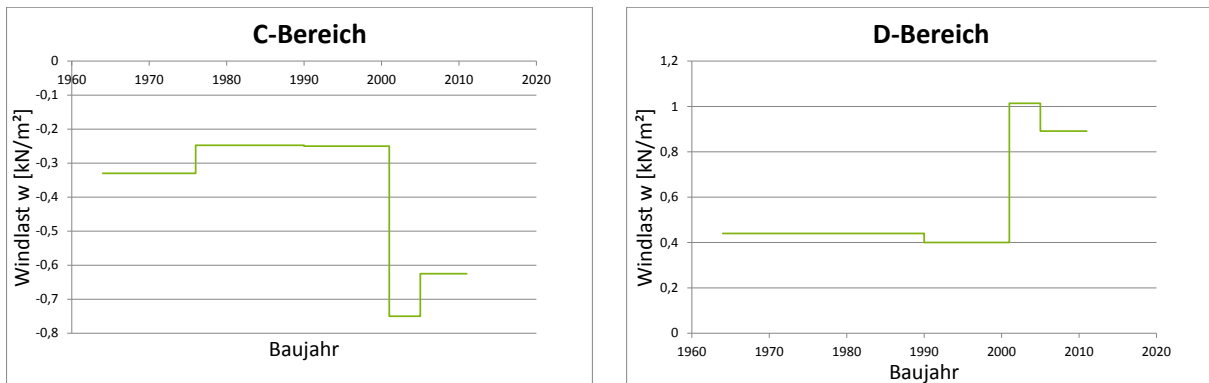


Abbildung 178: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

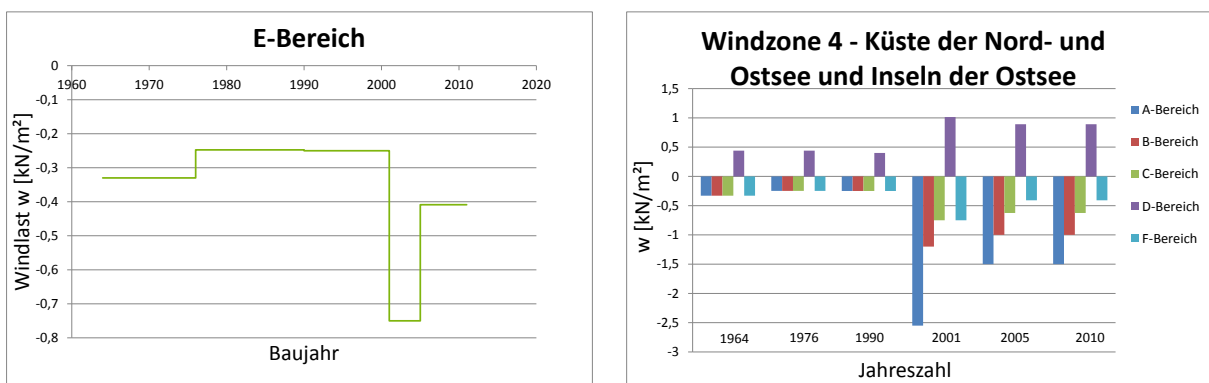


Abbildung 179: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.16 Halle B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

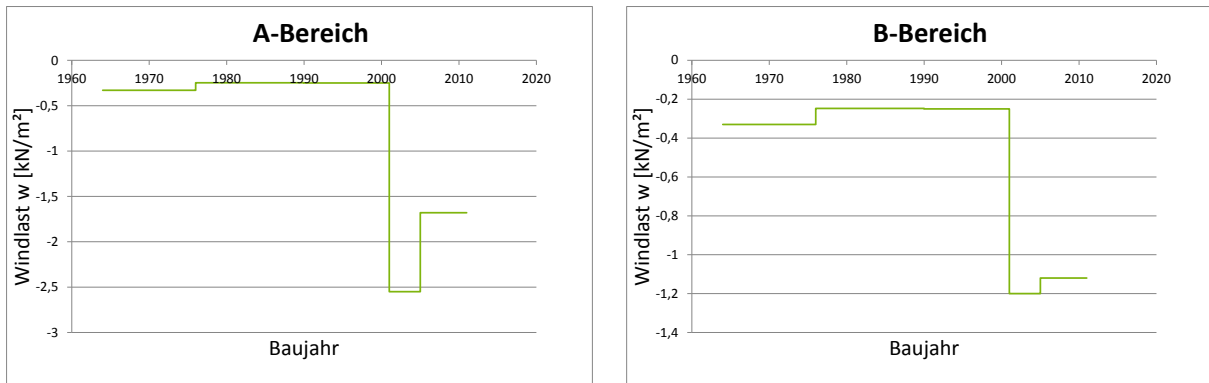


Abbildung 180: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

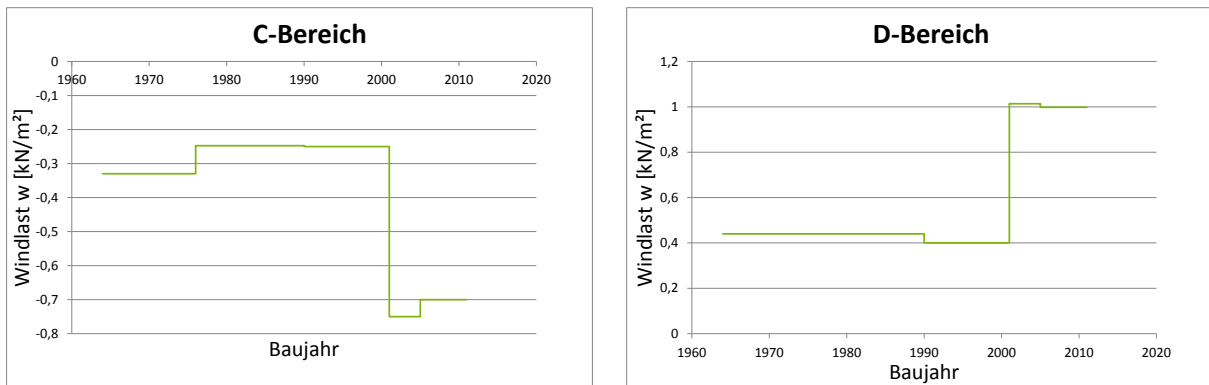


Abbildung 181: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

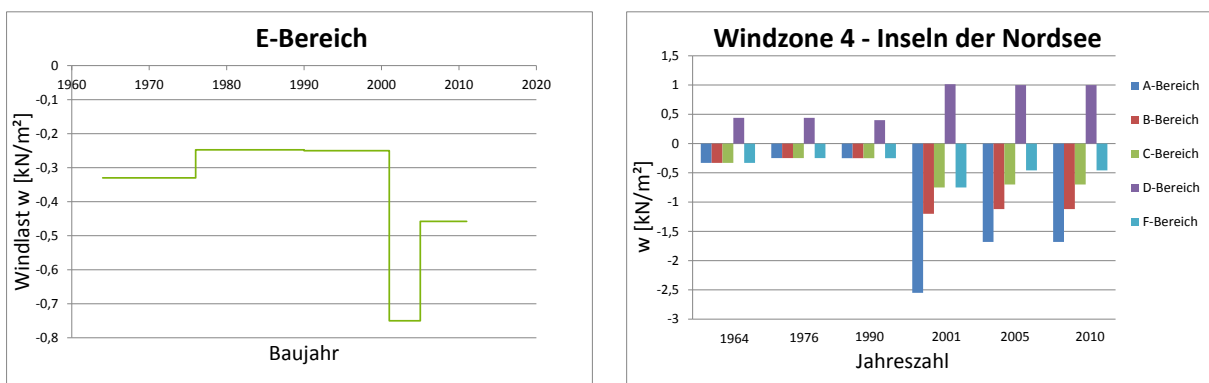


Abbildung 182: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.2.17 Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

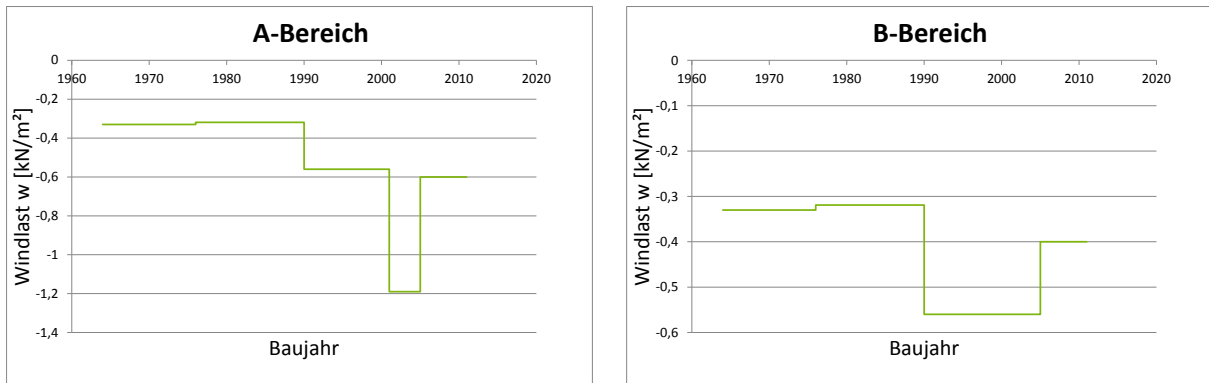


Abbildung 183: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

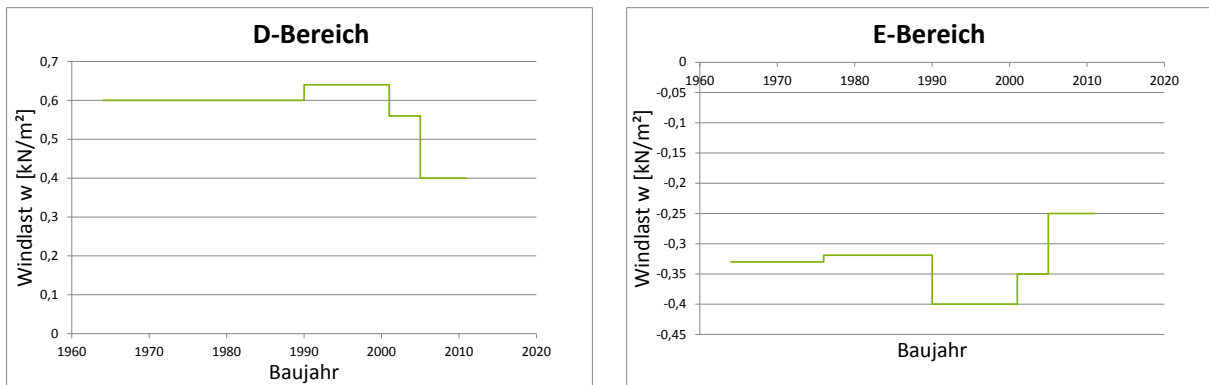


Abbildung 184: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

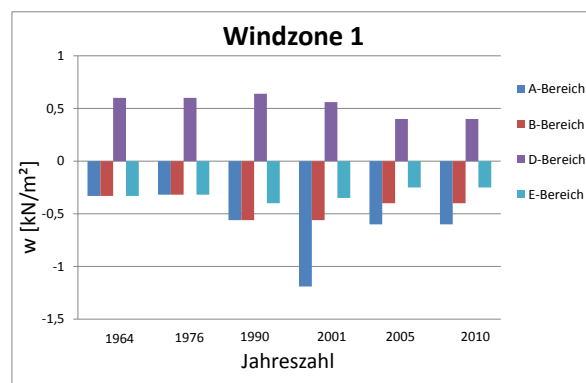


Abbildung 185: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.18 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

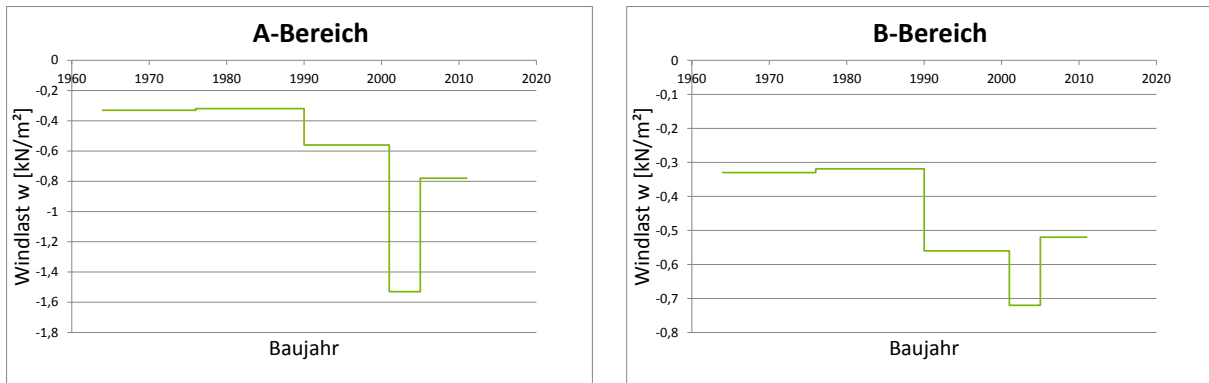


Abbildung 186: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

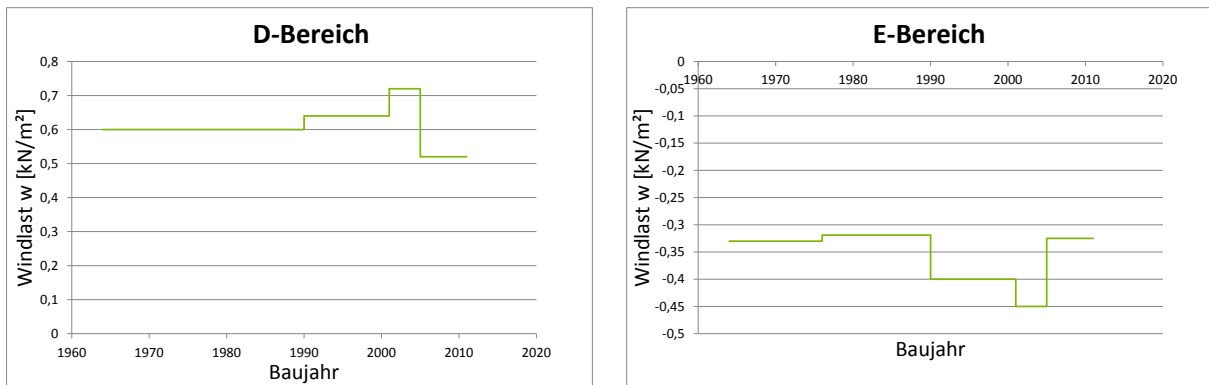


Abbildung 187: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

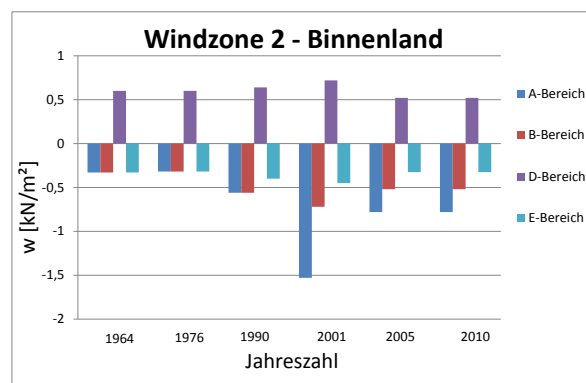


Abbildung 188: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.19 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

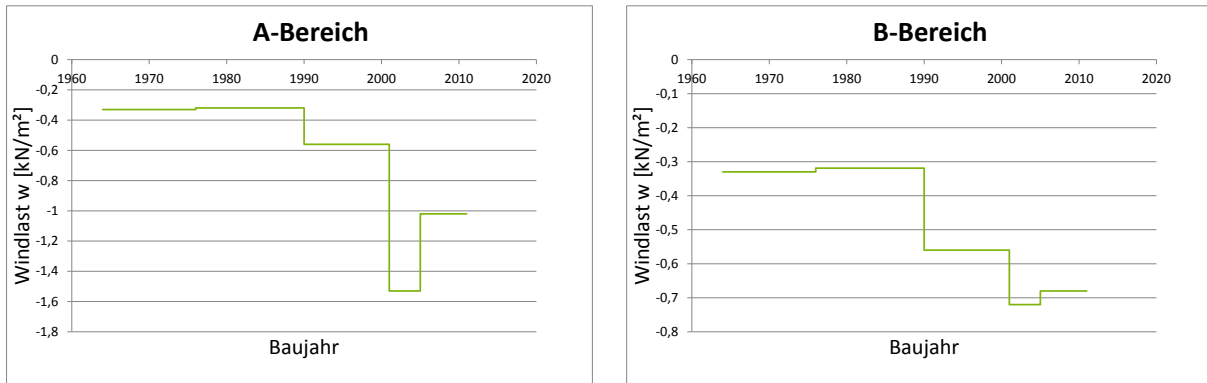


Abbildung 189: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

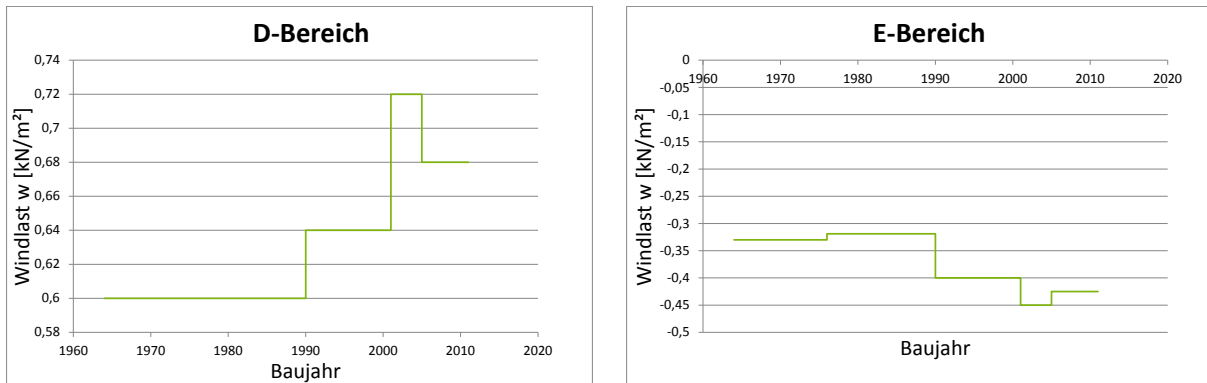


Abbildung 190: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

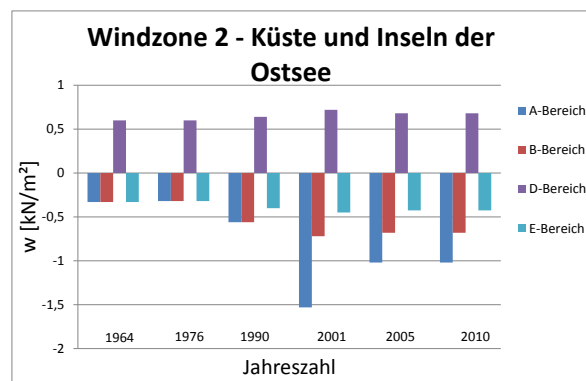


Abbildung 191: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.20 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

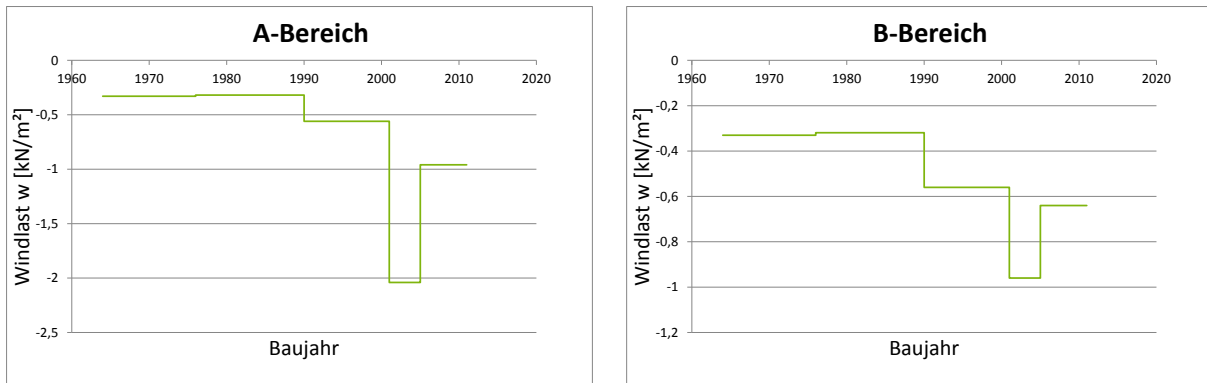


Abbildung 192: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

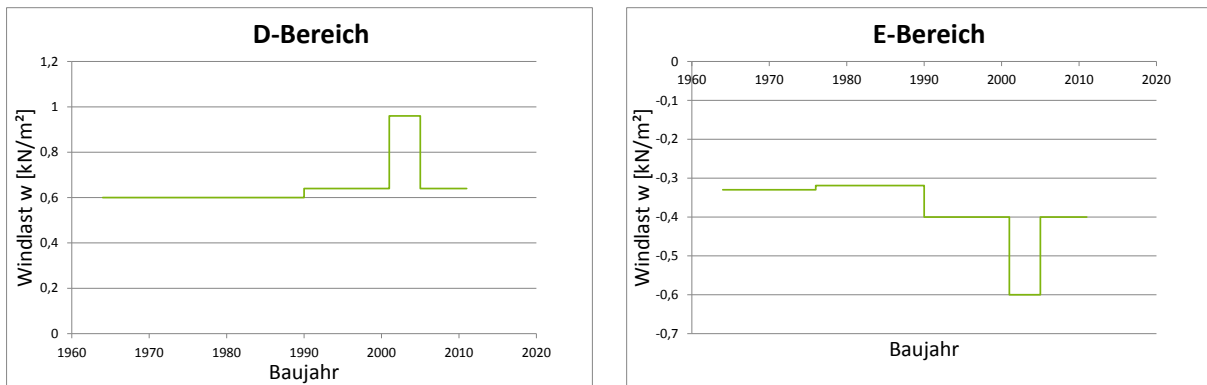


Abbildung 193: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

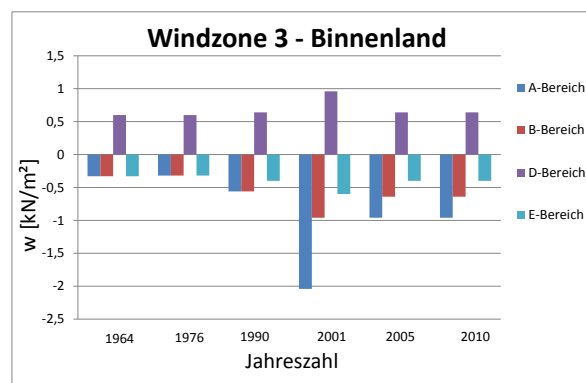


Abbildung 194: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.21 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

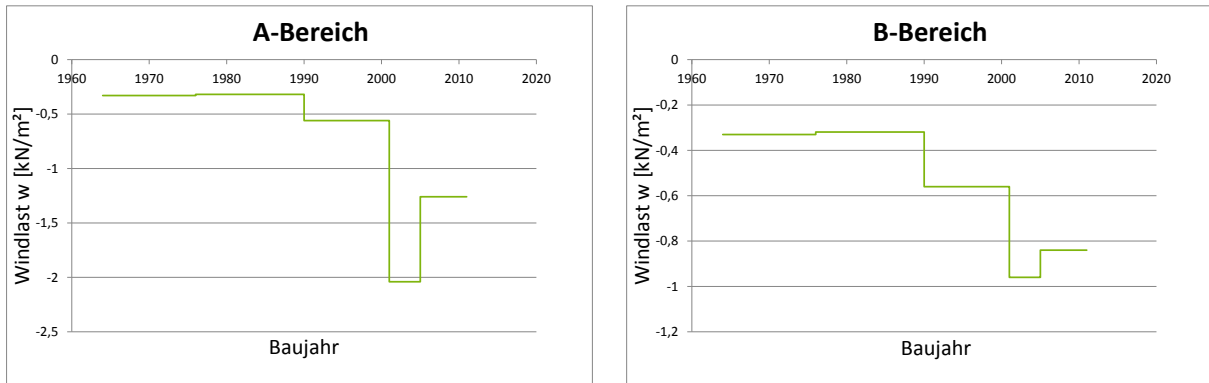


Abbildung 195: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

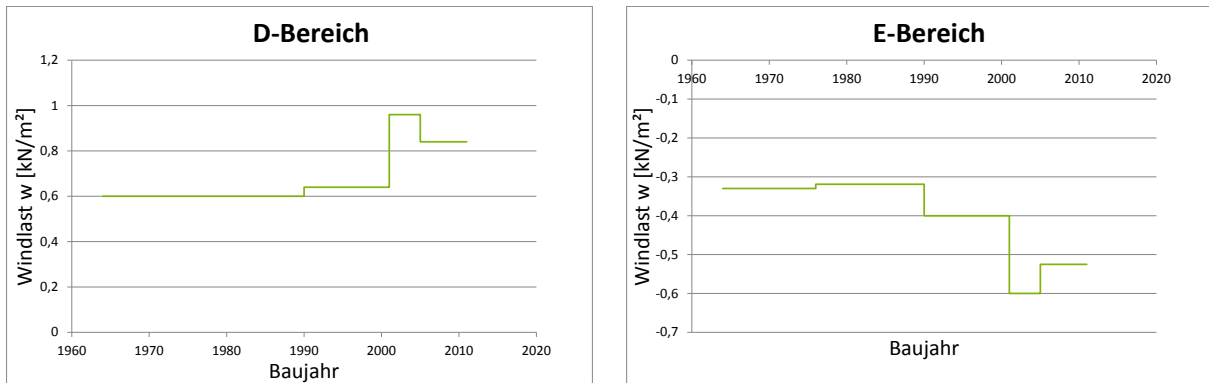


Abbildung 196: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

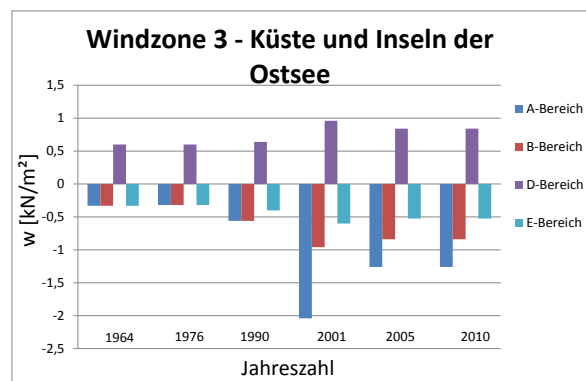


Abbildung 197: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.22 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

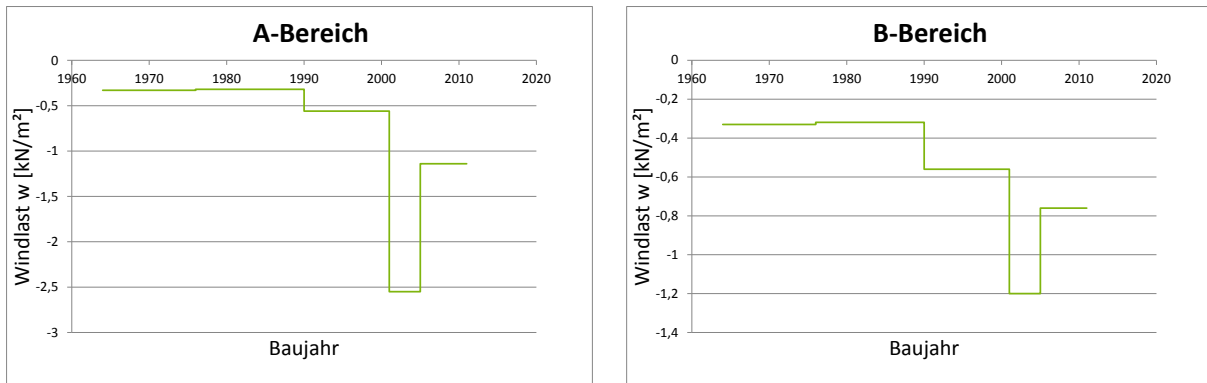


Abbildung 198: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

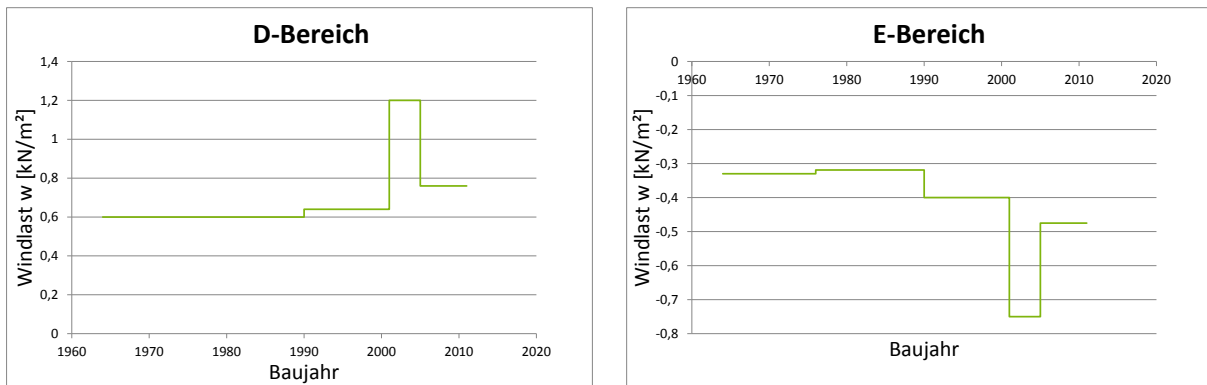


Abbildung 199: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

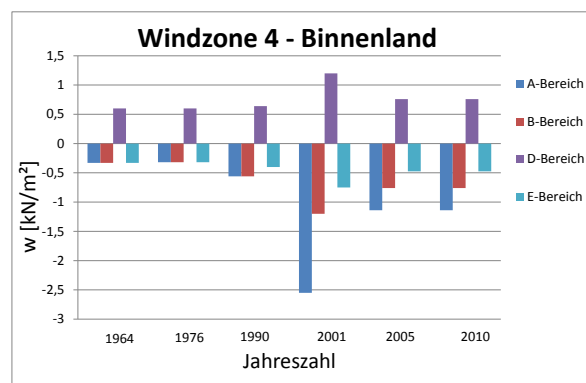


Abbildung 200: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.23 Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

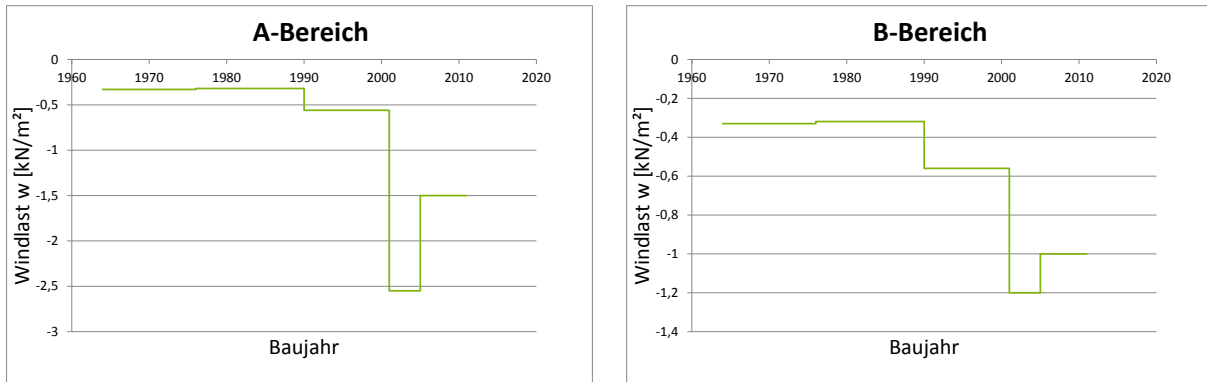


Abbildung 201: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

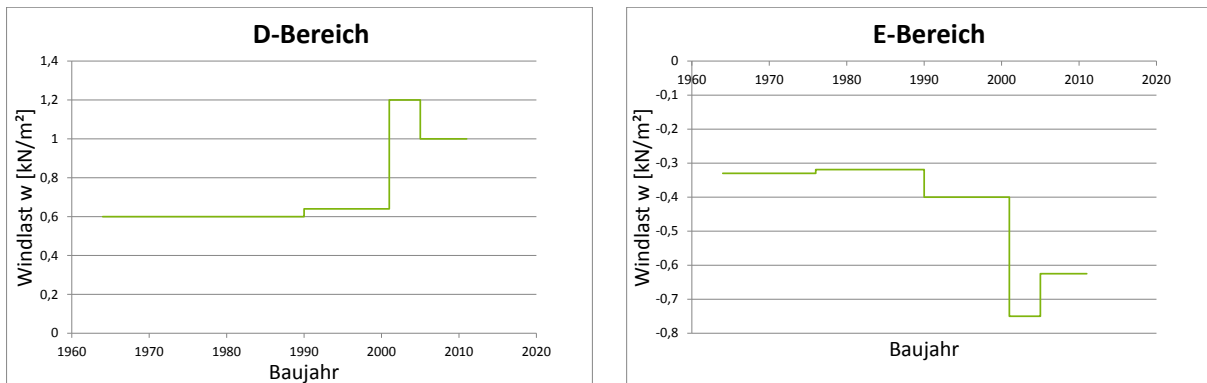


Abbildung 202: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

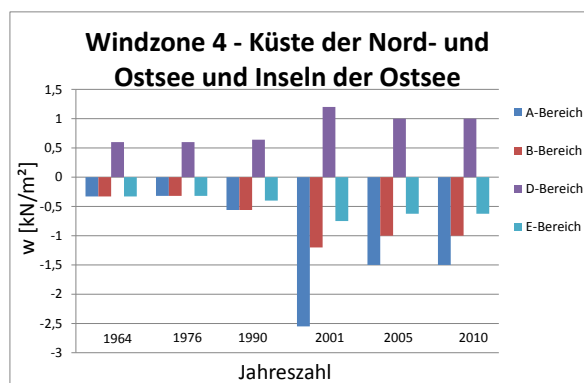


Abbildung 203: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.2.24 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

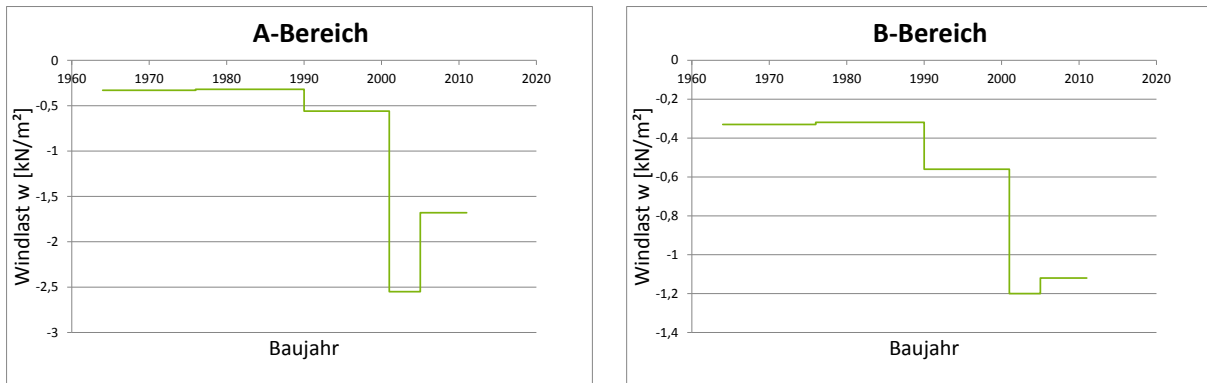


Abbildung 204: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

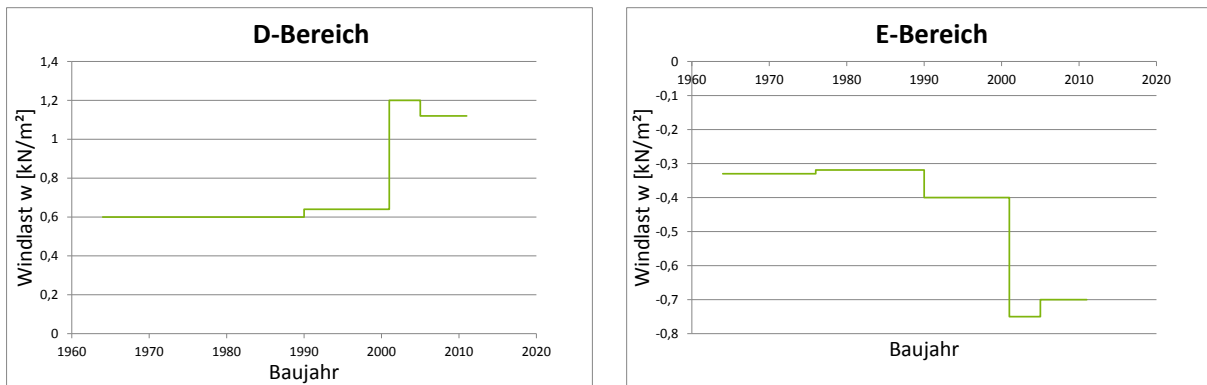


Abbildung 205: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

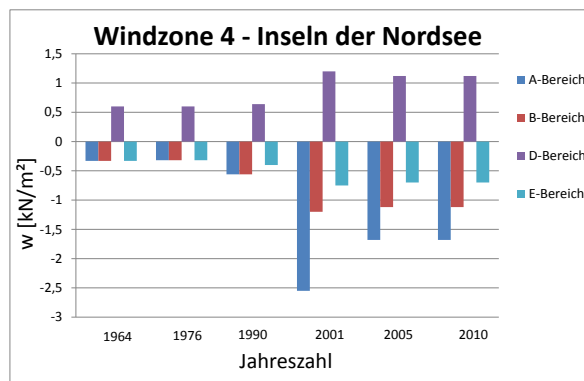


Abbildung 206: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.3 Windlast auf Dächern für die globale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010

5.3.1 Halle A und B in der Windzone 1 Binnenland

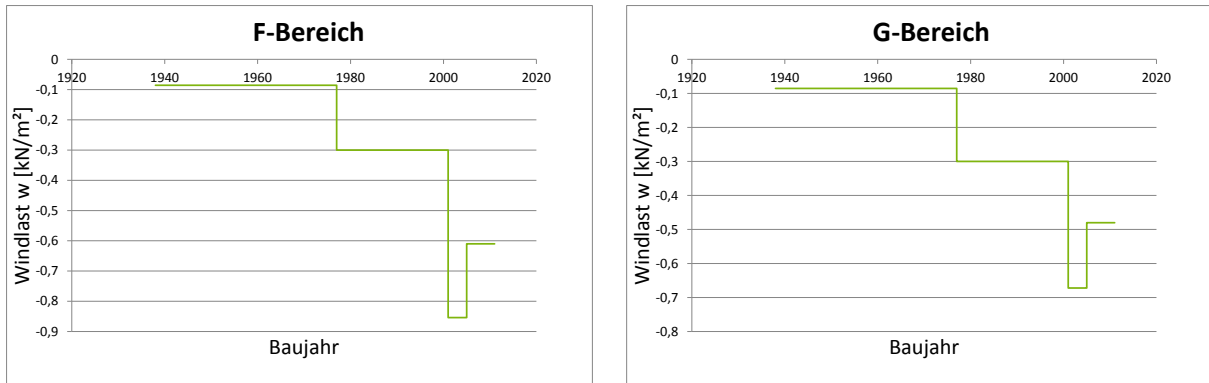


Abbildung 207: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

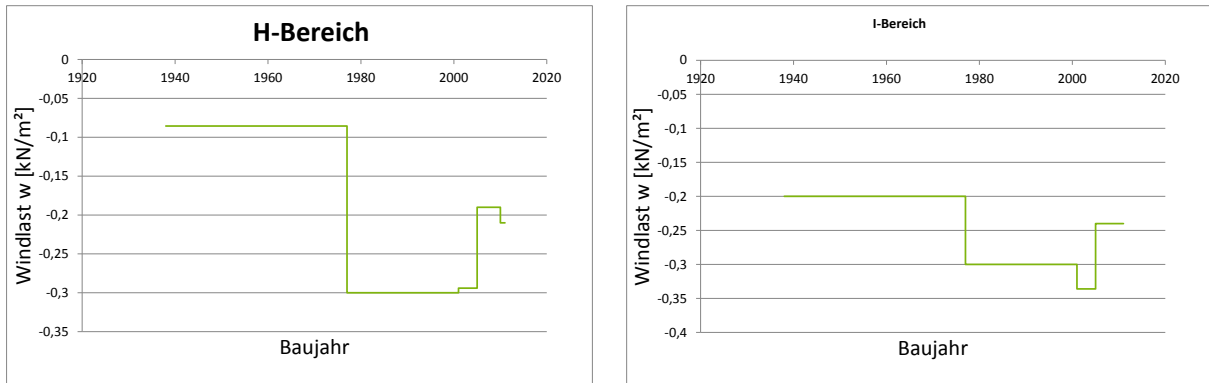


Abbildung 208: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

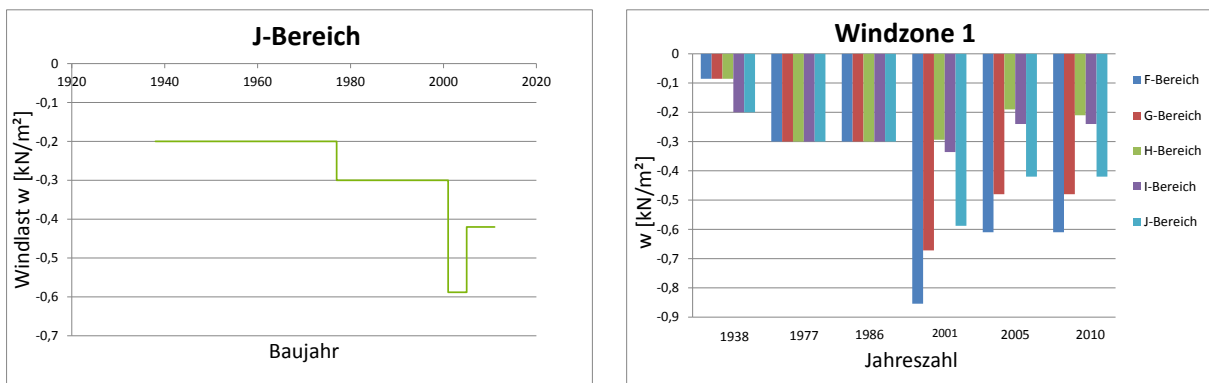


Abbildung 209: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.2 Halle A und B in der Windzone 2 Binnenland

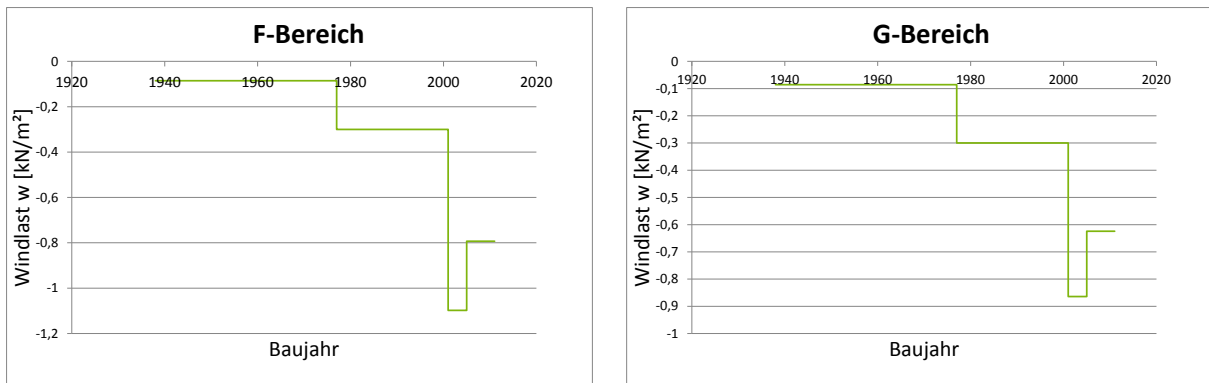


Abbildung 210: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

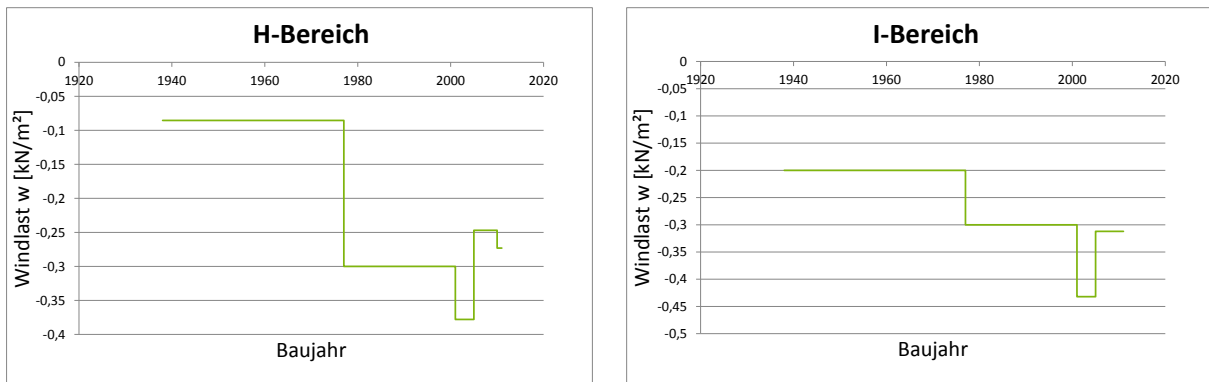


Abbildung 211: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

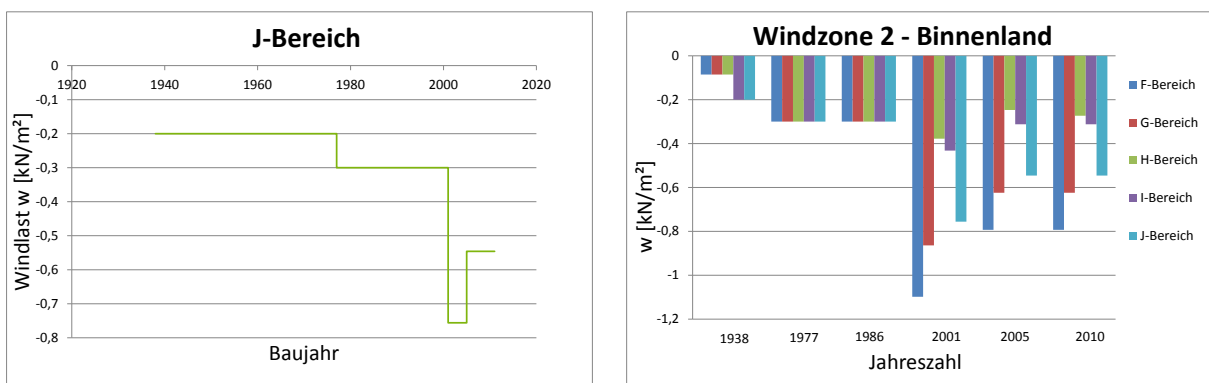


Abbildung 212: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.3 Halle A und B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

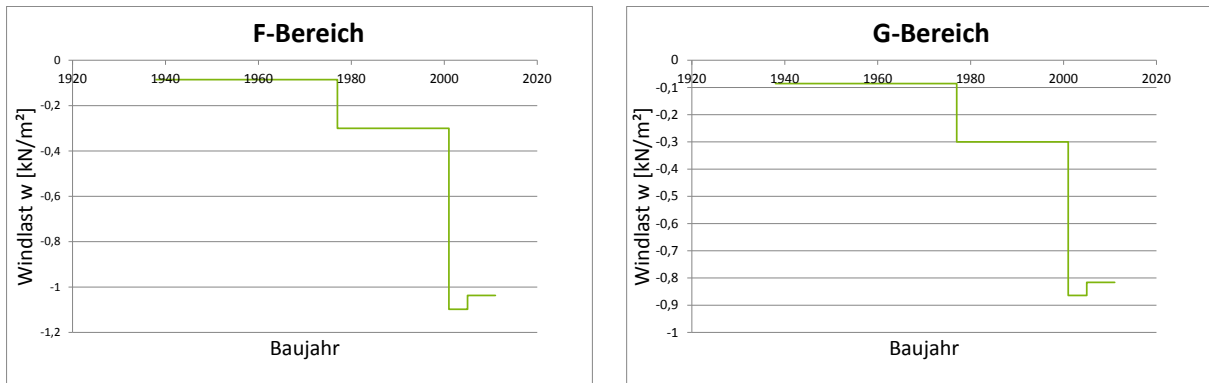


Abbildung 213: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

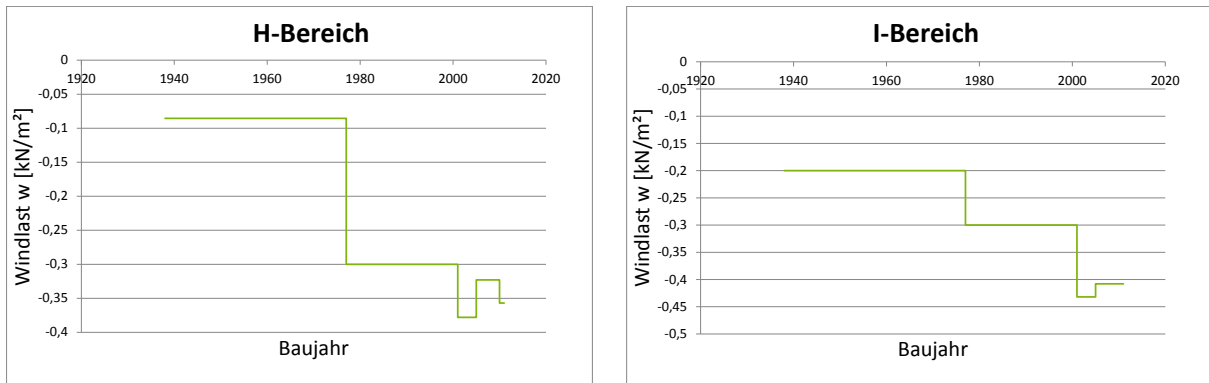


Abbildung 214: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich D

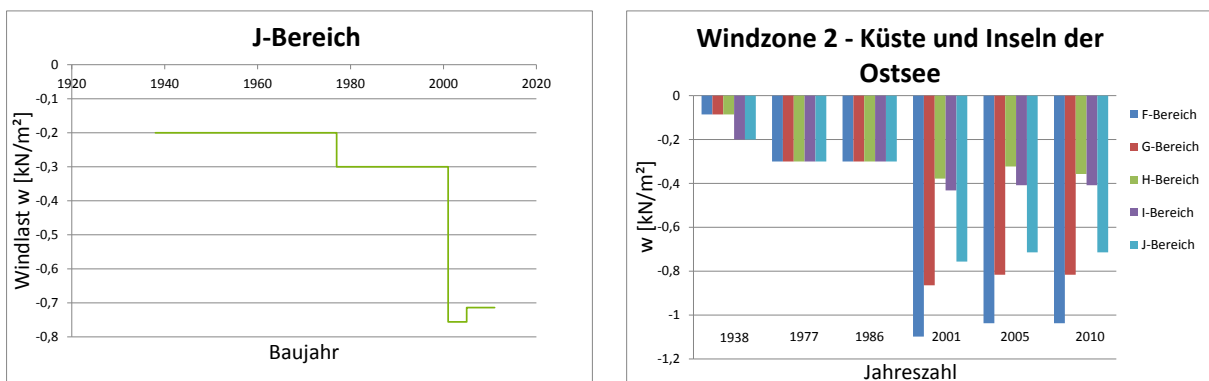


Abbildung 215: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.4 Halle A und B in der Windzone 3 Binnenland

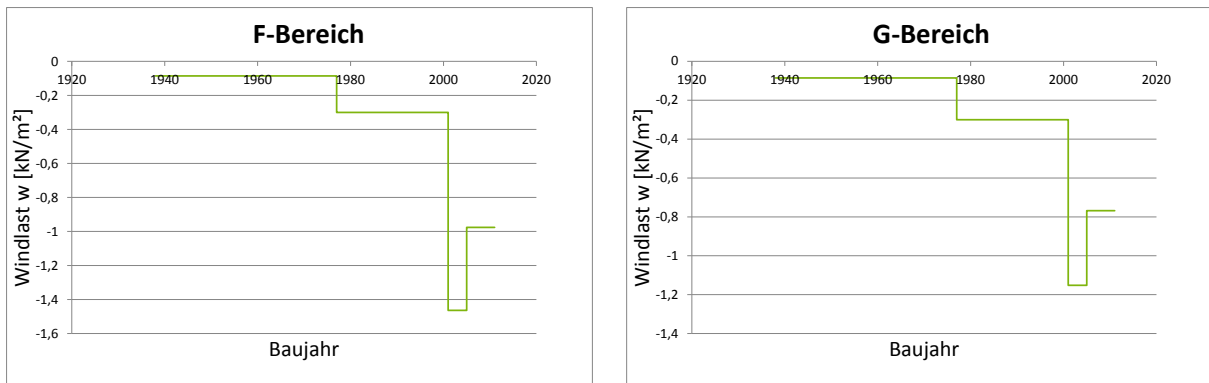


Abbildung 216: Halle F und G. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

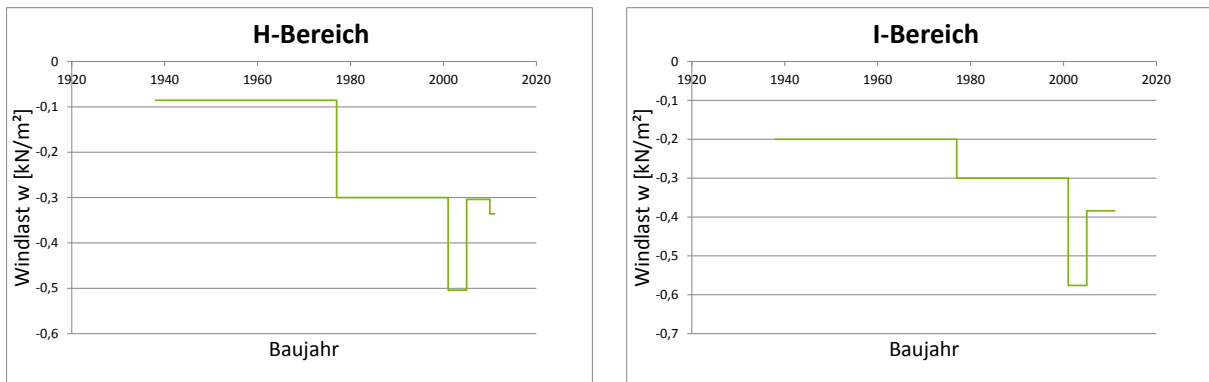


Abbildung 217: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

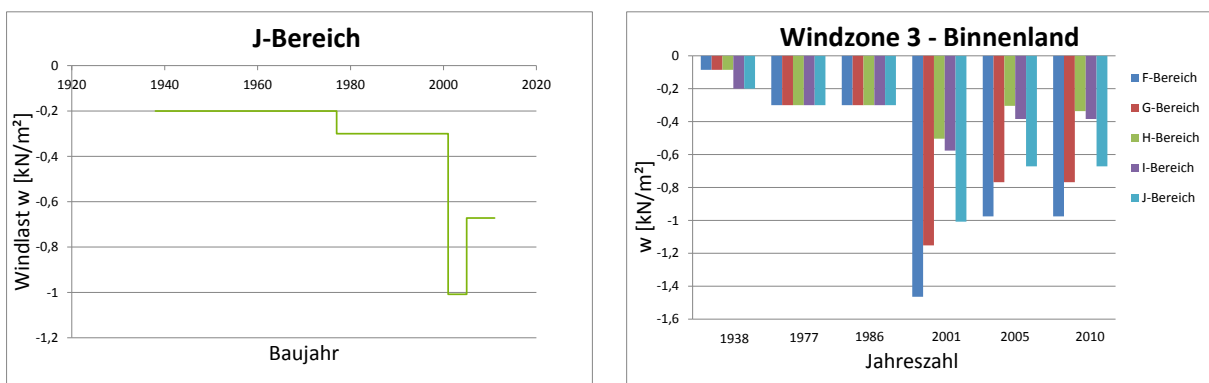


Abbildung 218: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.5 Halle A und B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

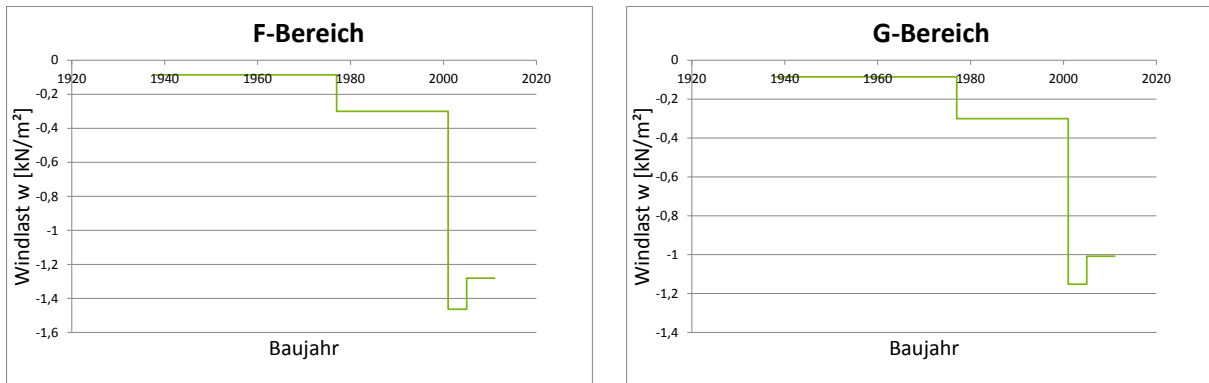


Abbildung 219: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

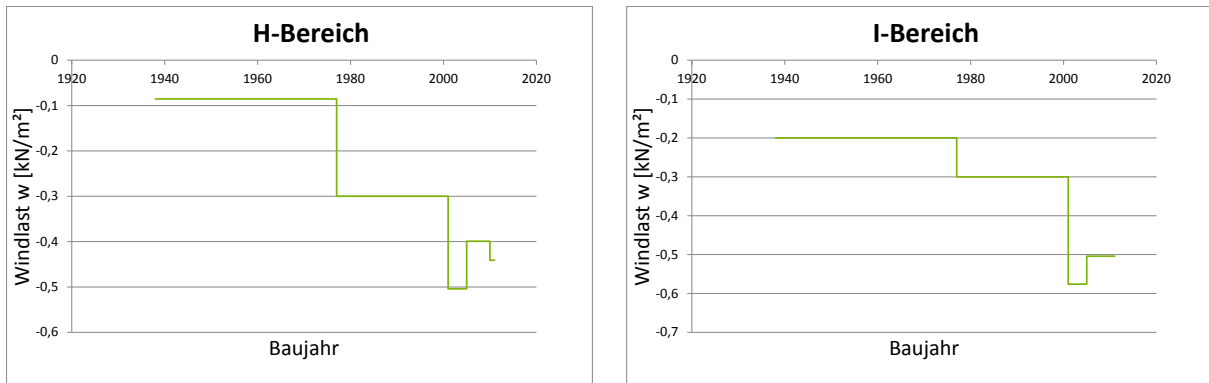


Abbildung 220: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

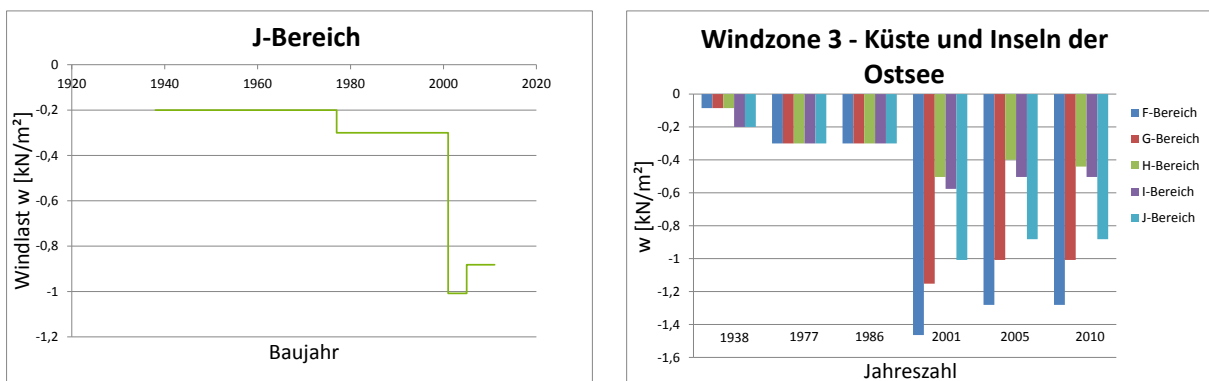


Abbildung 221: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.6 Halle A und B in der Windzone 4 Binnenland

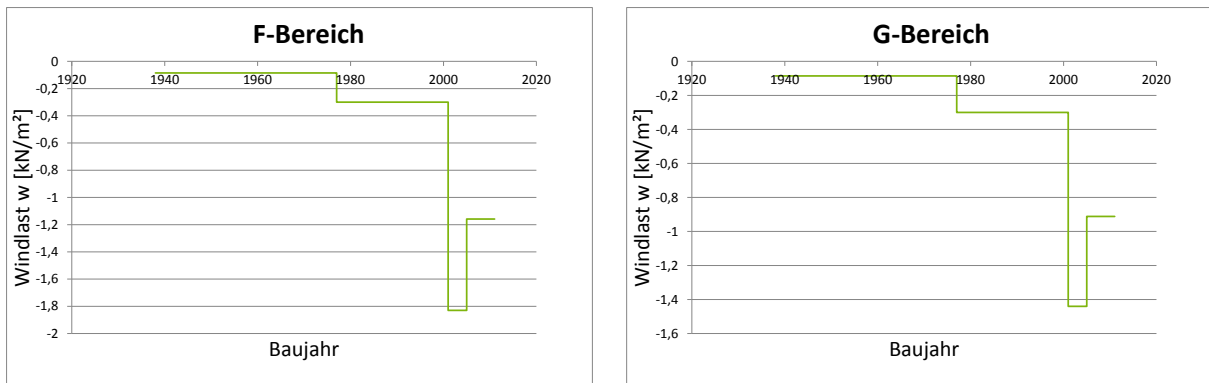


Abbildung 222: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

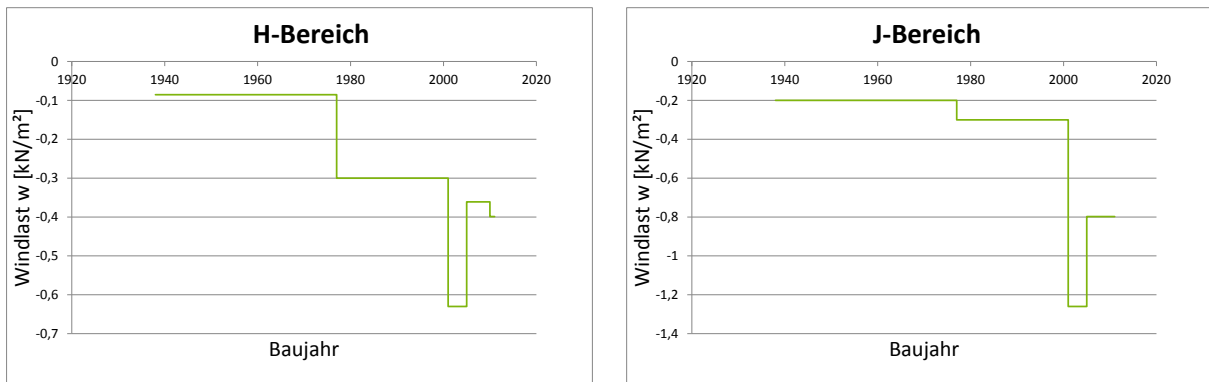


Abbildung 223: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

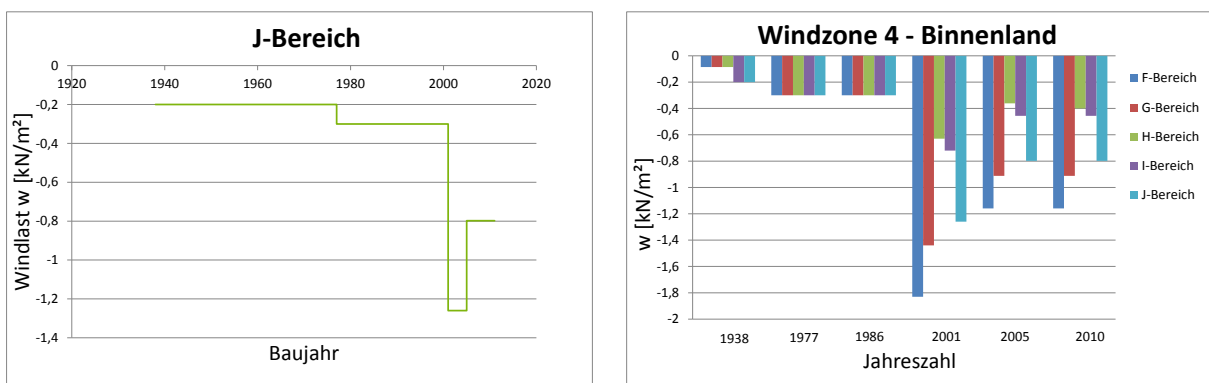


Abbildung 224: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.7 Halle A und B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

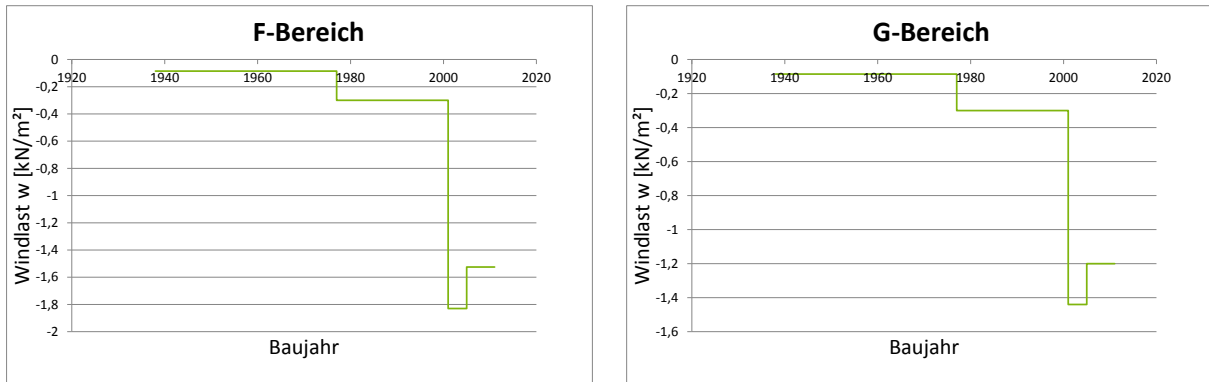


Abbildung 225: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

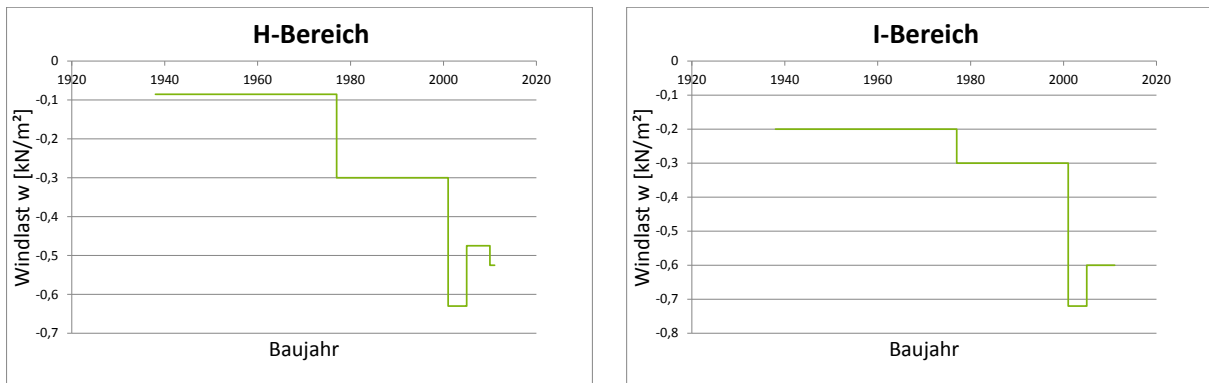


Abbildung 226: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

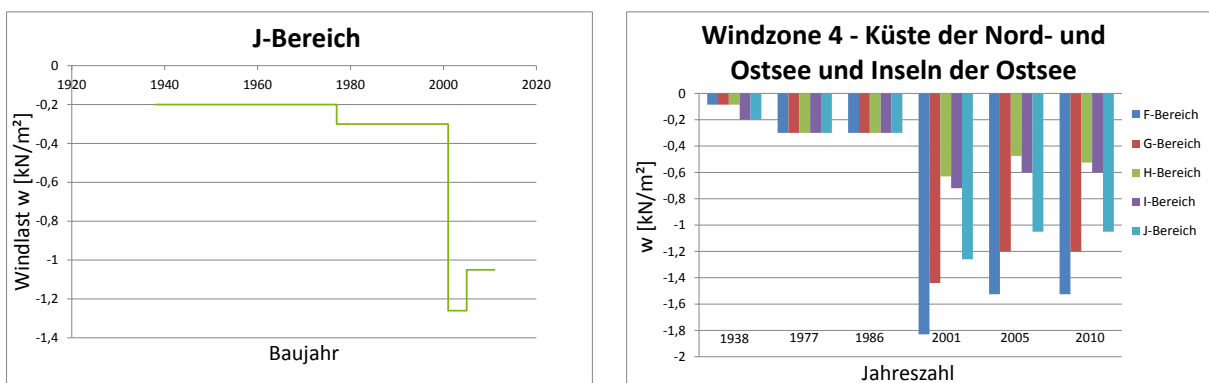


Abbildung 227: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.8 Halle A und B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

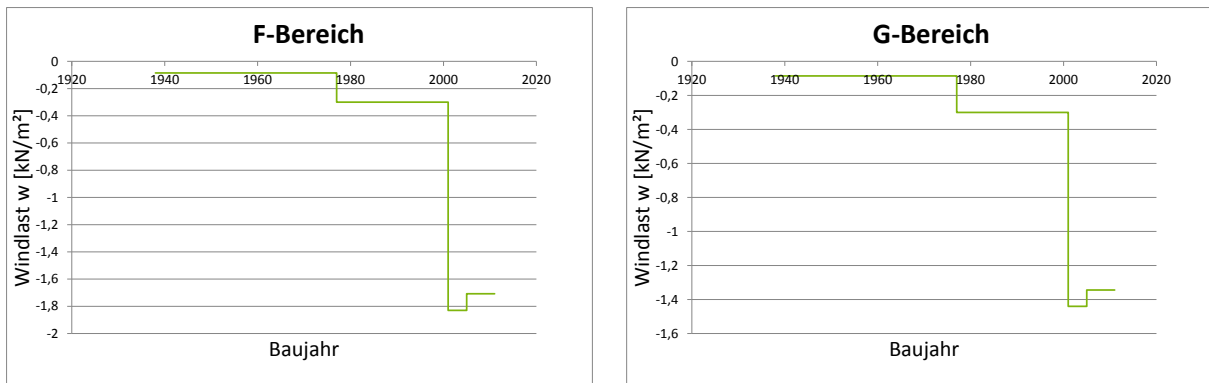


Abbildung 228: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

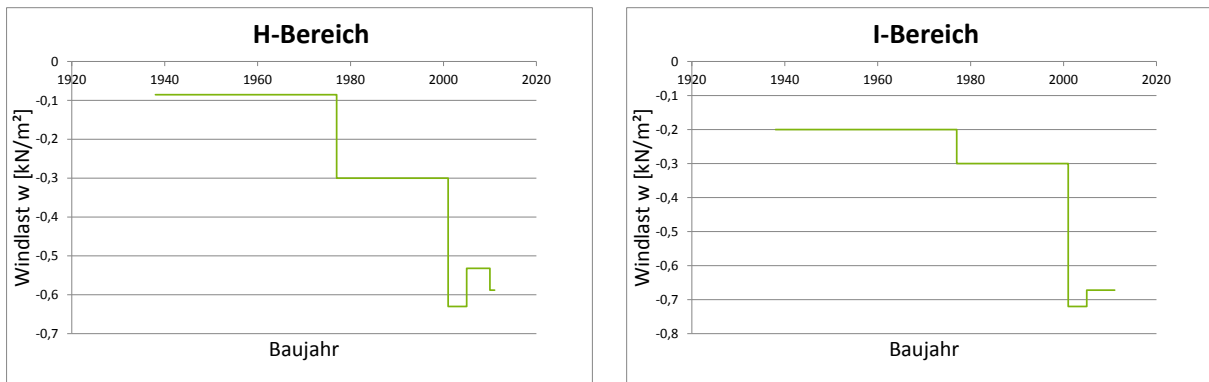


Abbildung 229: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

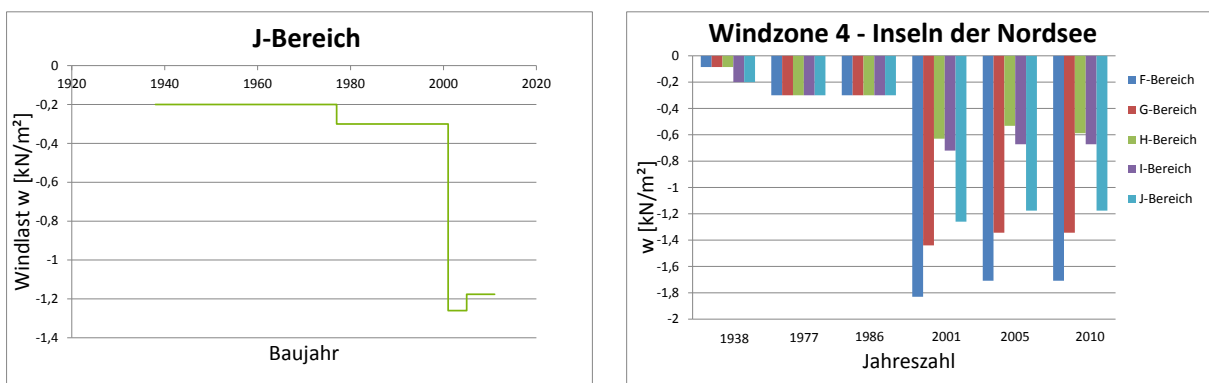


Abbildung 230: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.9 Halle C in der Windzone 1 Binnenland

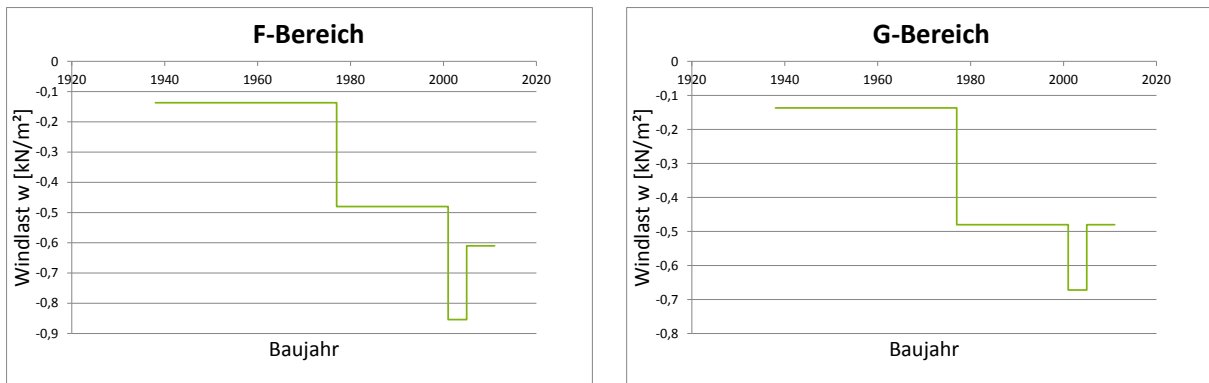


Abbildung 231: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

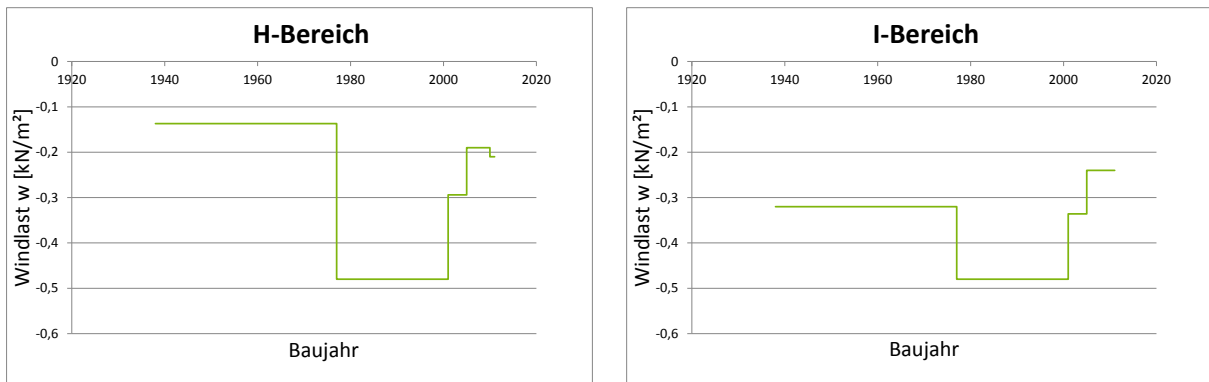


Abbildung 232: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

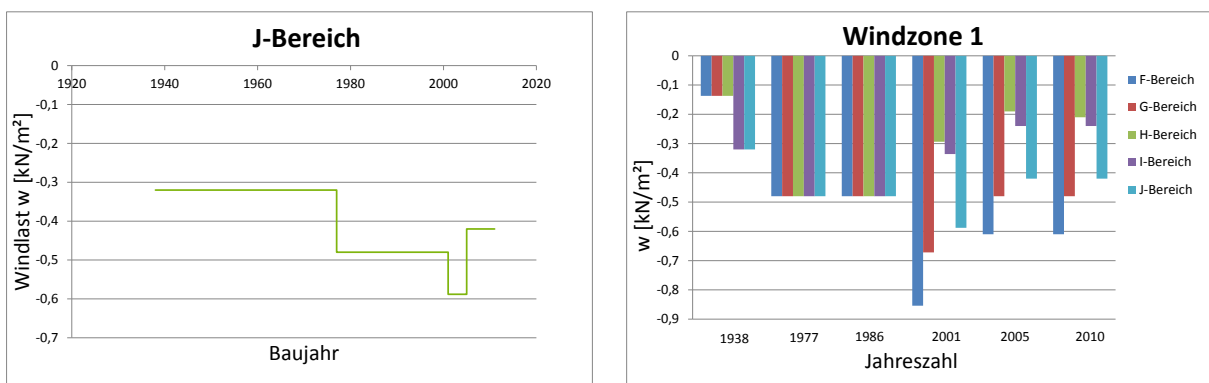


Abbildung 233: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.10 Halle C in der Windzone 2 Binnenland

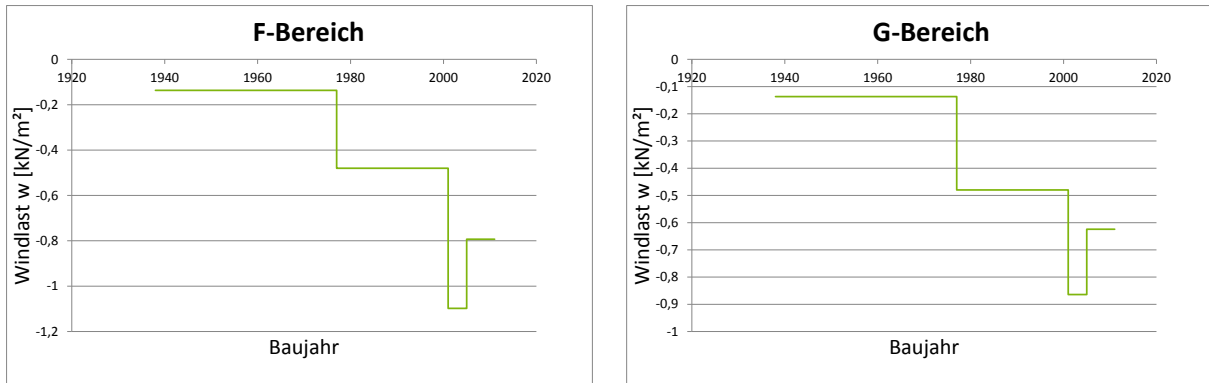


Abbildung 234: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

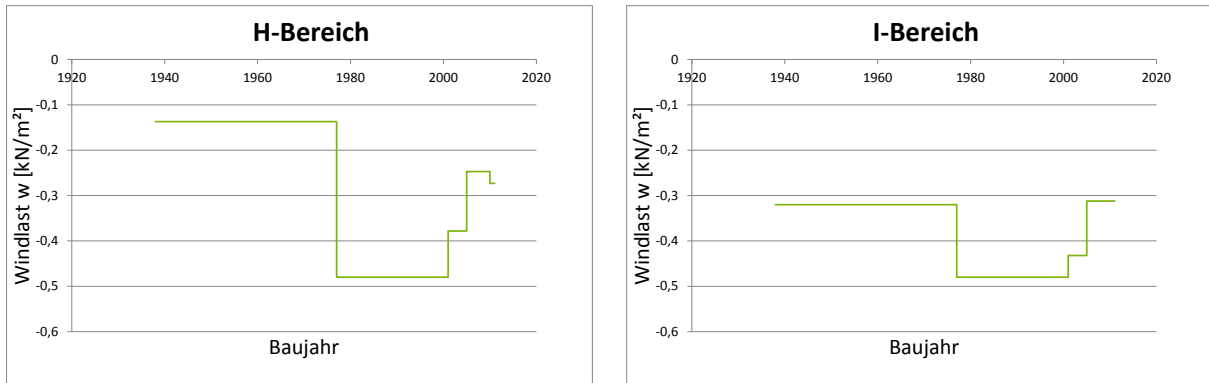


Abbildung 235: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

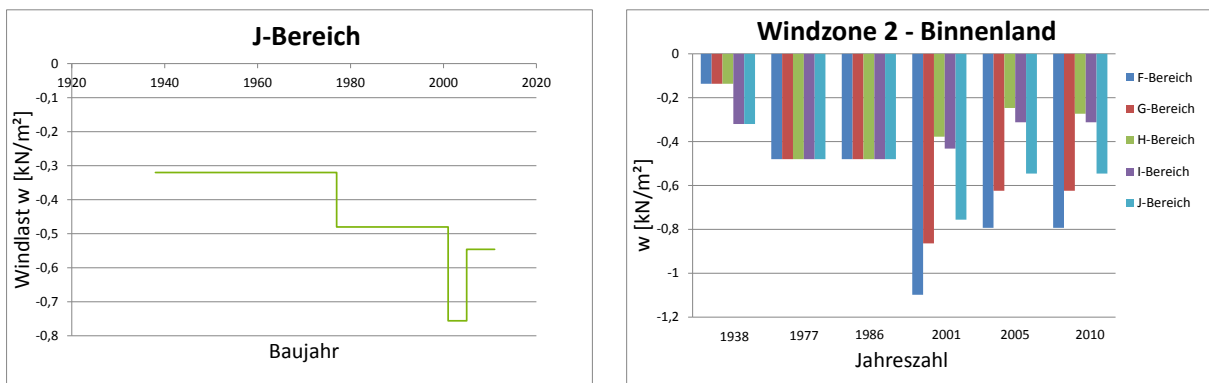


Abbildung 236: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.11 Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

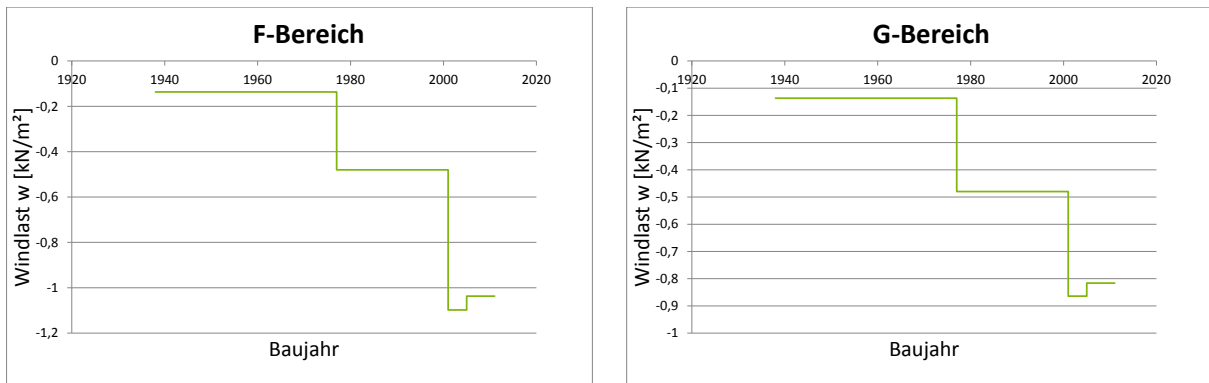


Abbildung 237: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

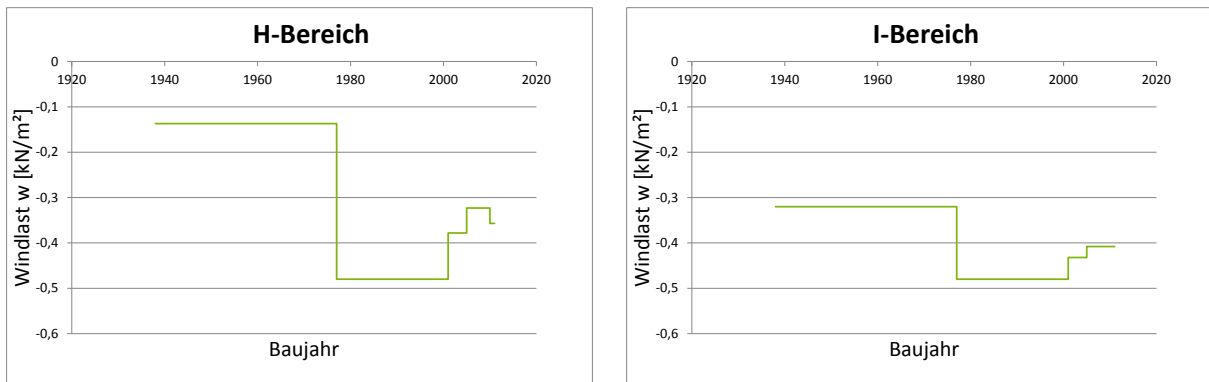


Abbildung 238: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

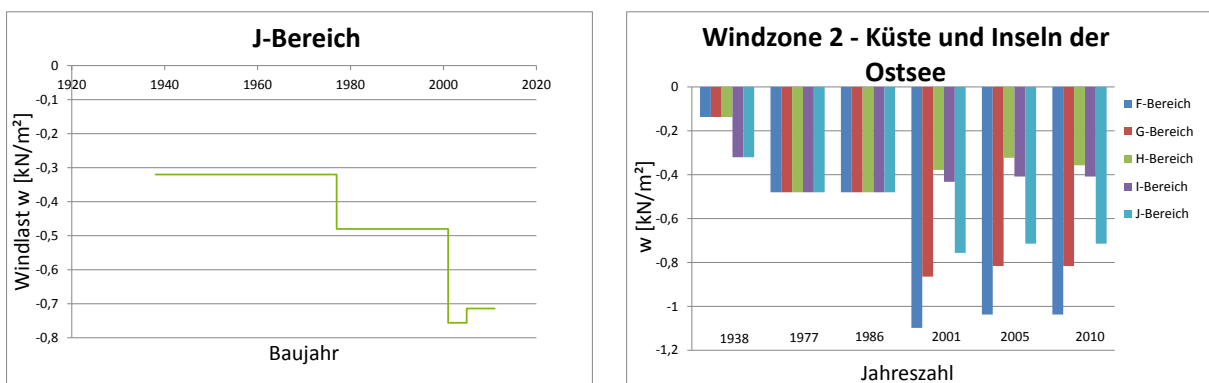


Abbildung 239: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.12 Halle C in der Windzone 3 Binnenland

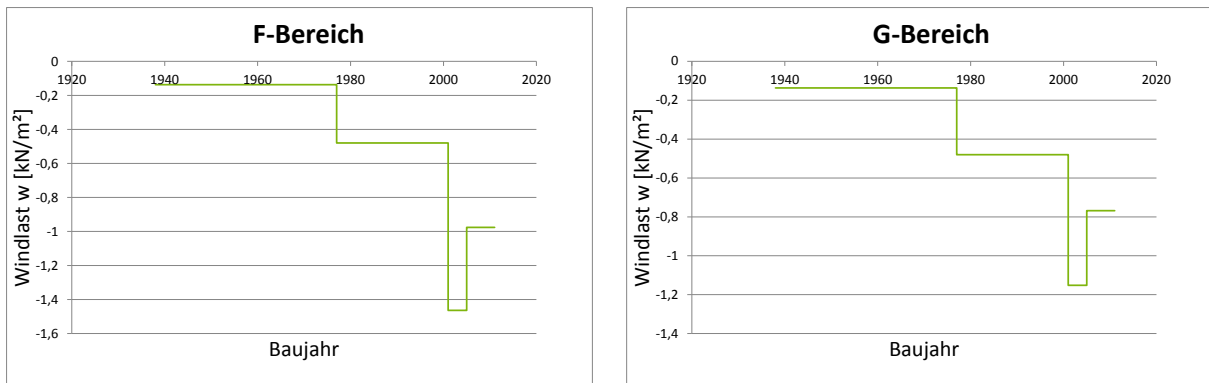


Abbildung 240: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

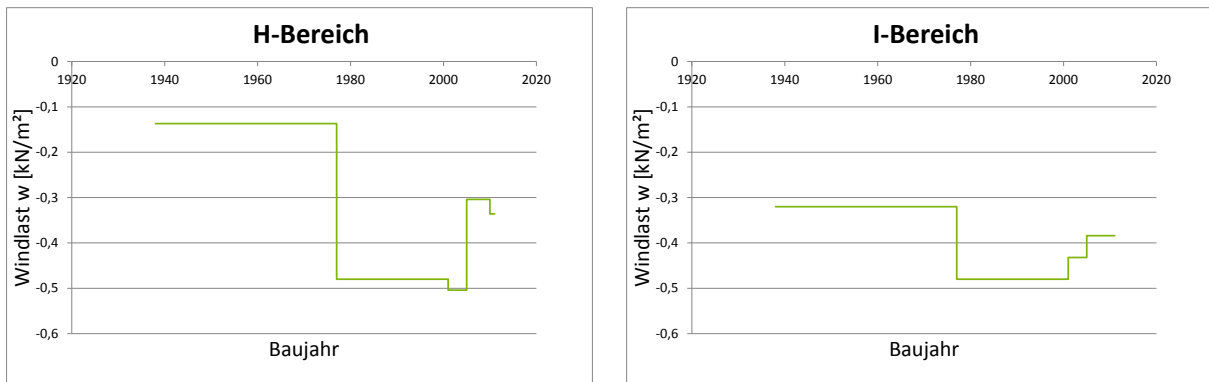


Abbildung 241: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

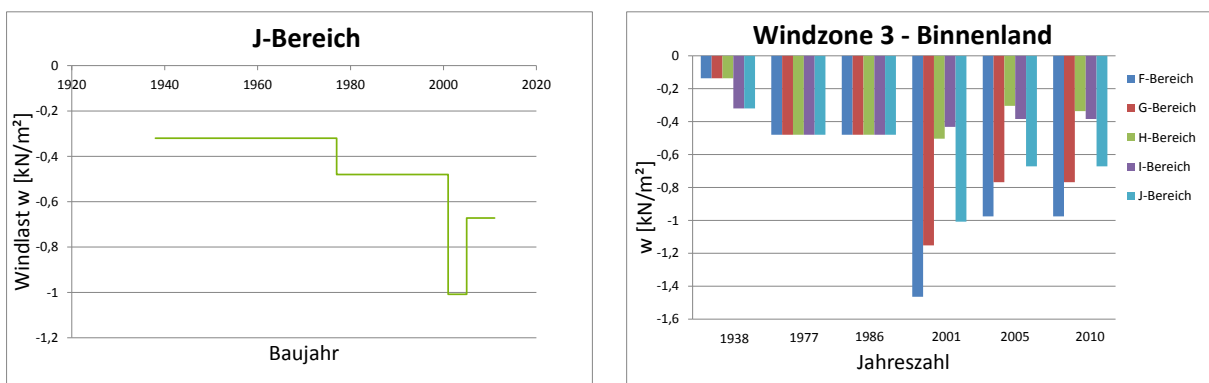


Abbildung 242: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.13 Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

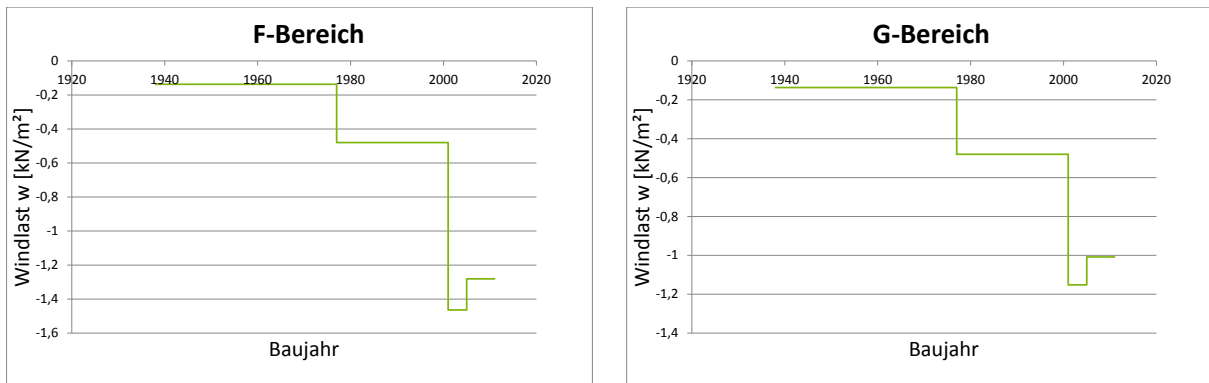


Abbildung 243: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

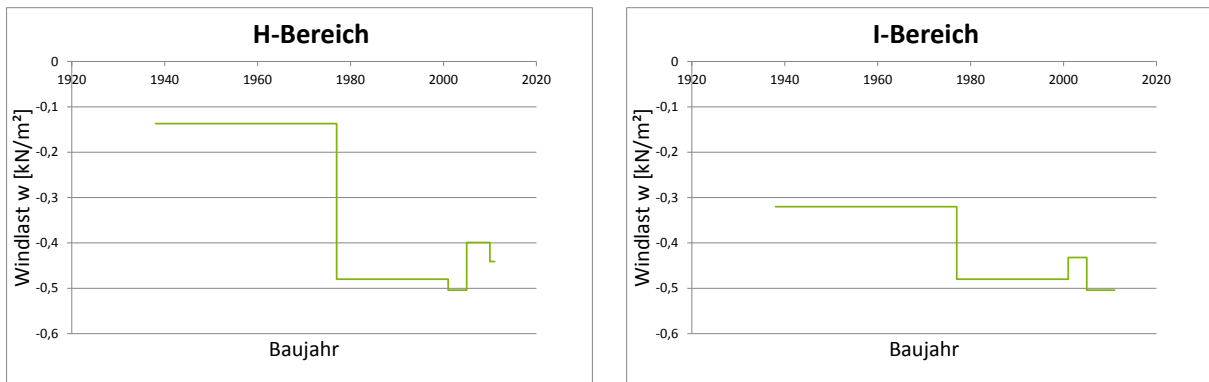


Abbildung 244: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

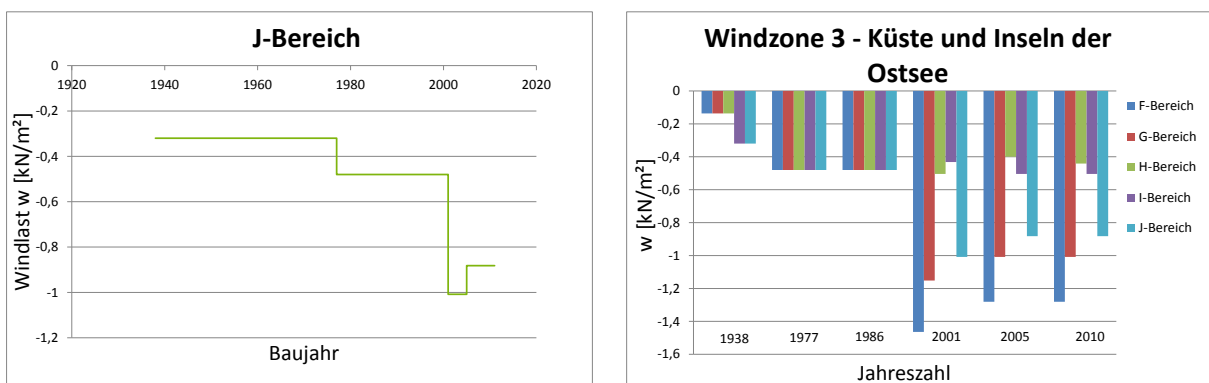


Abbildung 245: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.14 Halle C in der Windzone 4 Binnenland

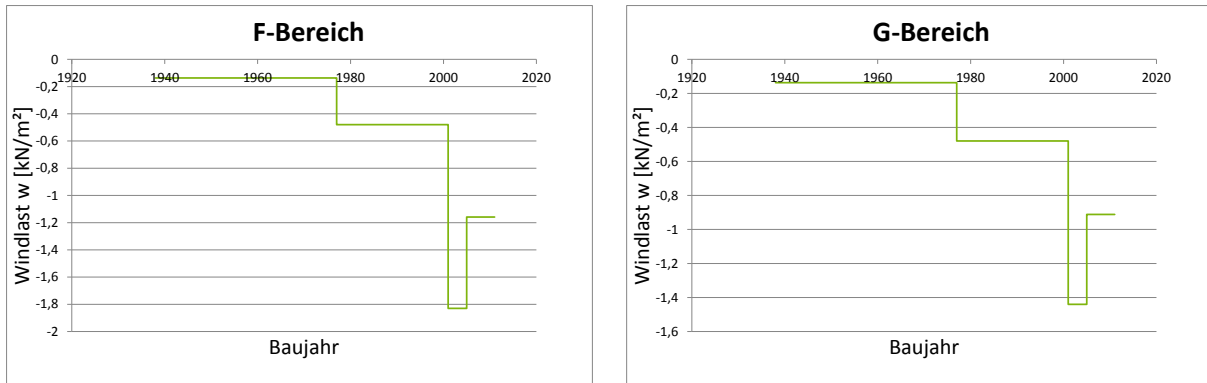


Abbildung 246: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

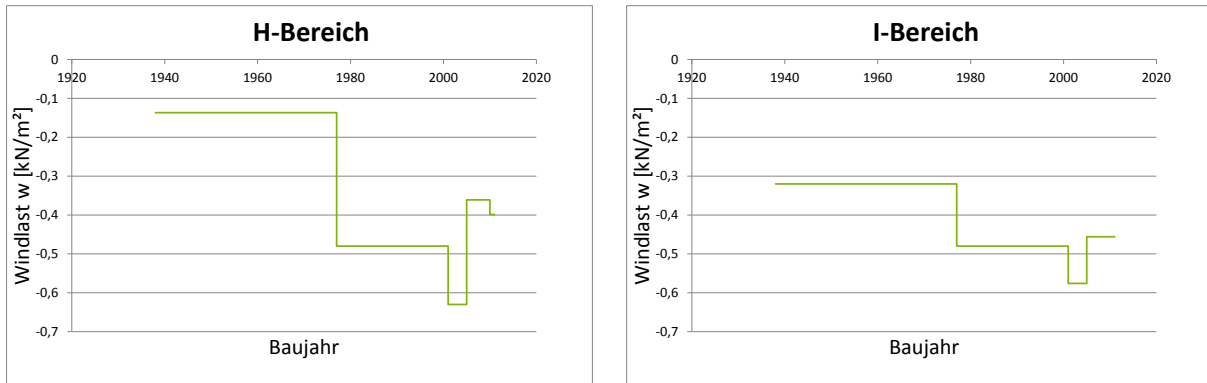


Abbildung 247: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

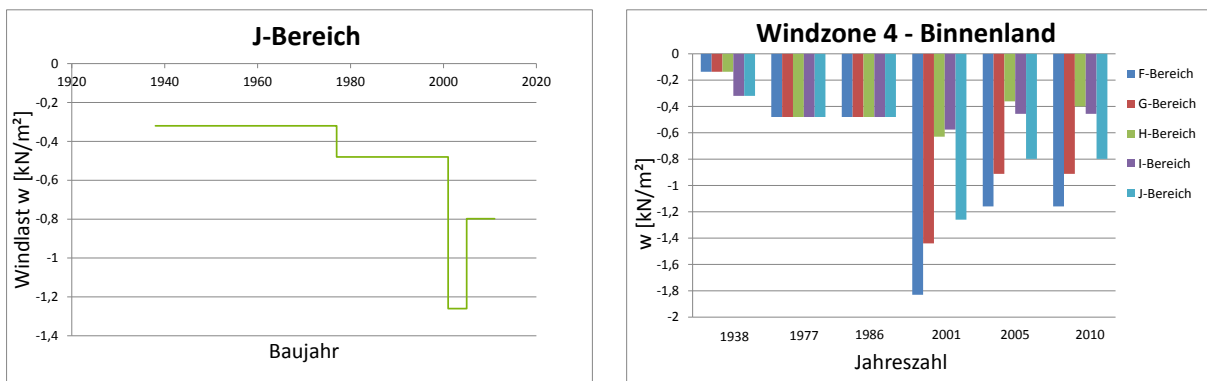


Abbildung 248: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.15 Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

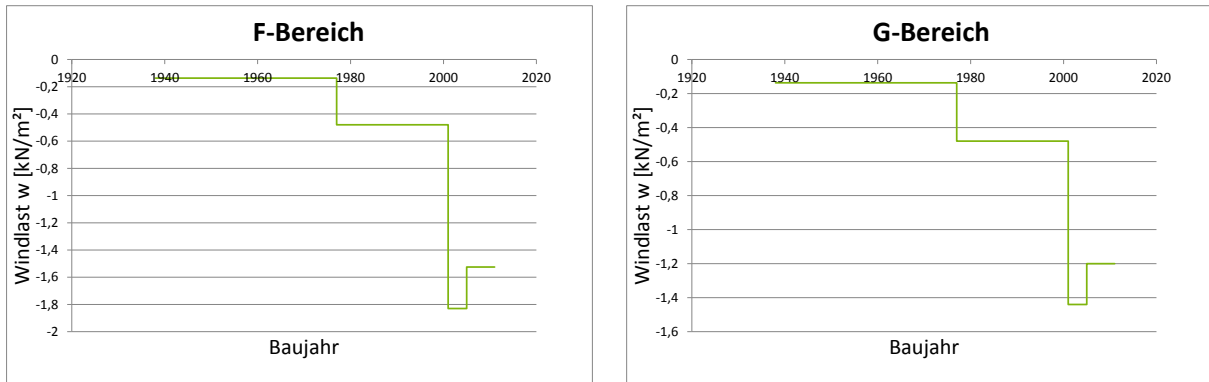


Abbildung 249: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

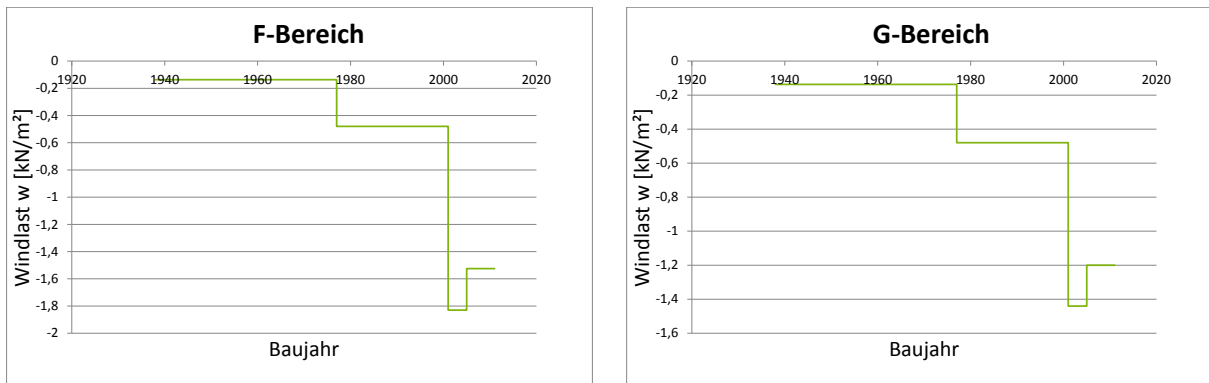


Abbildung 250: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

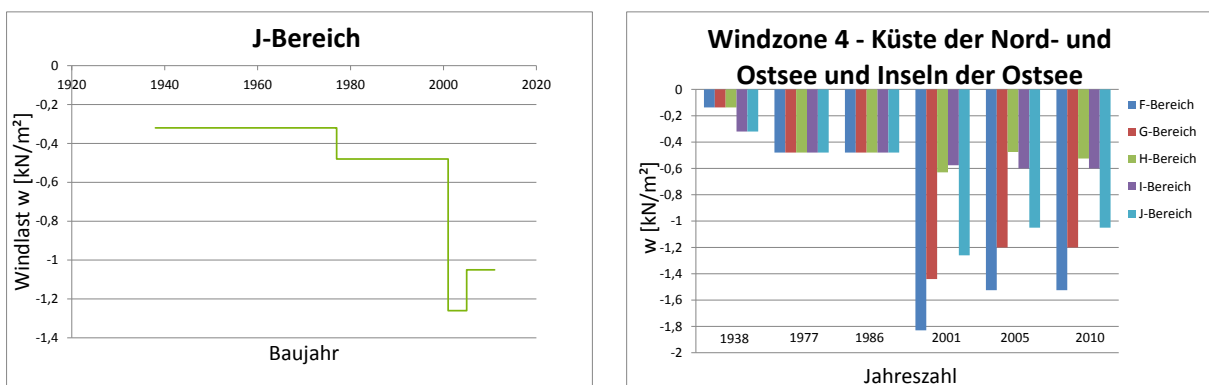


Abbildung 251: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.3.16 Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

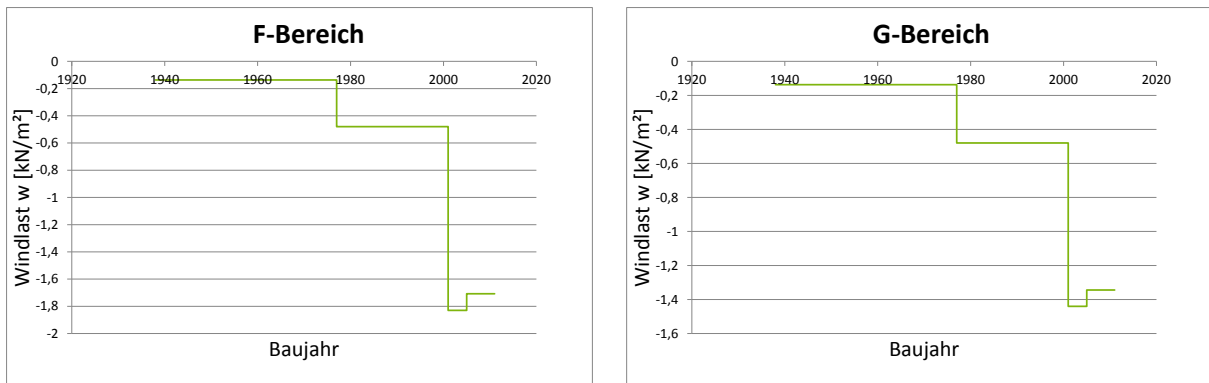


Abbildung 252: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

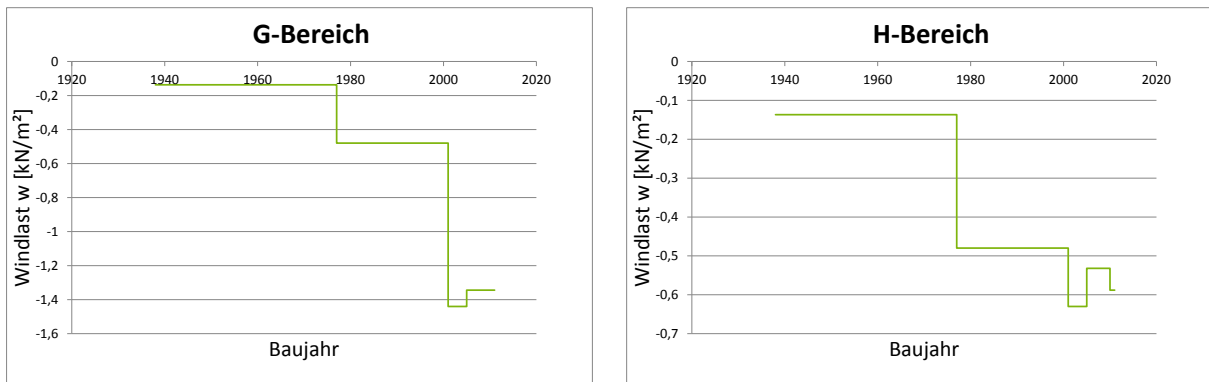


Abbildung 253: Halle C. Links: Bereich G. Rechts: Bereich H

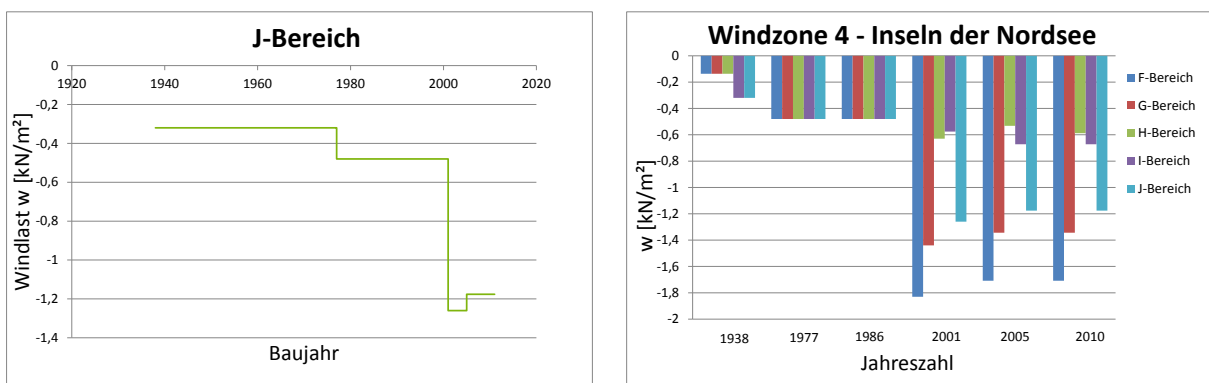


Abbildung 254: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4 Windlast auf Dächern für die globale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010

5.4.1 Halle A und B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

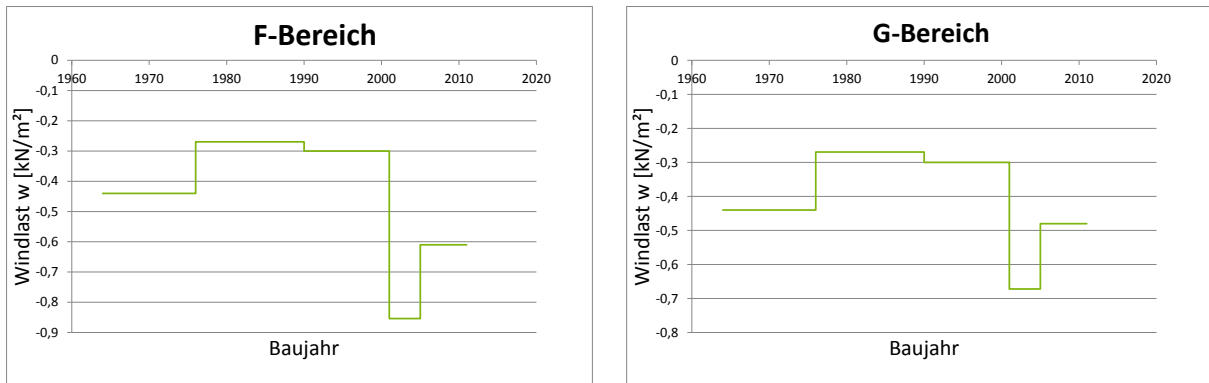


Abbildung 255: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

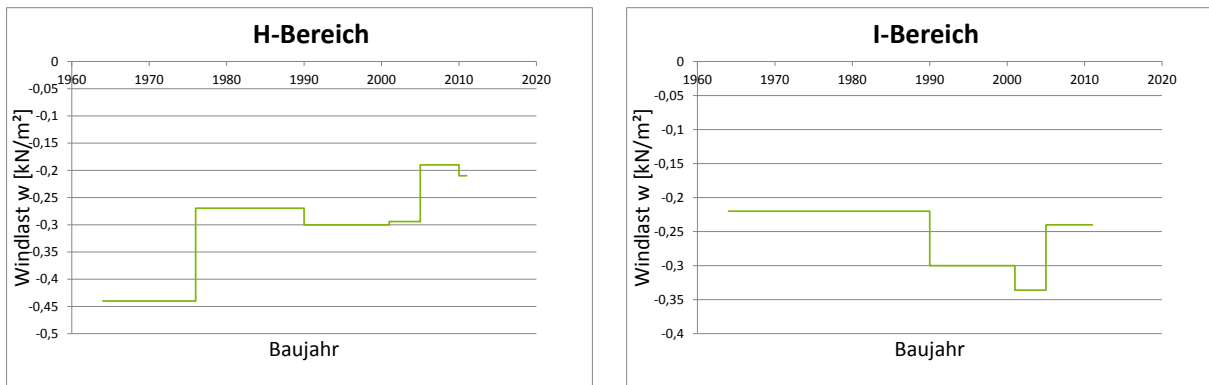


Abbildung 256: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

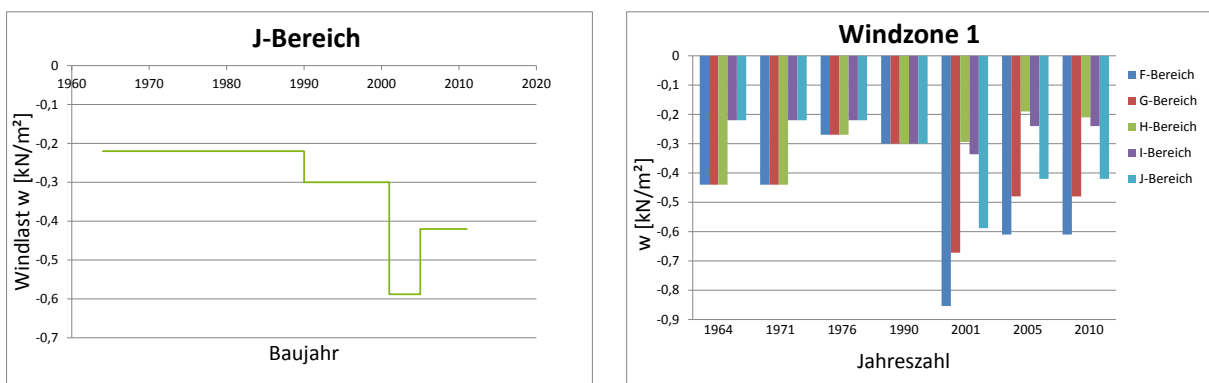


Abbildung 257: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.2 Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

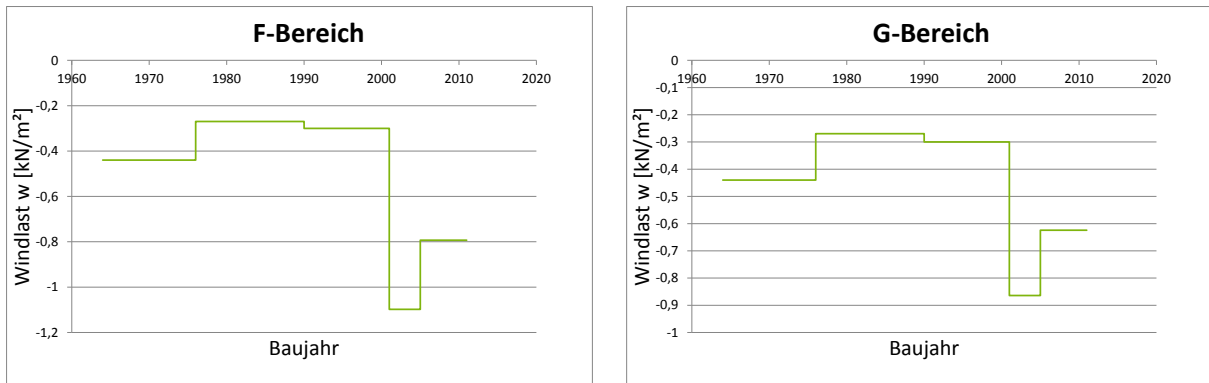


Abbildung 258: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

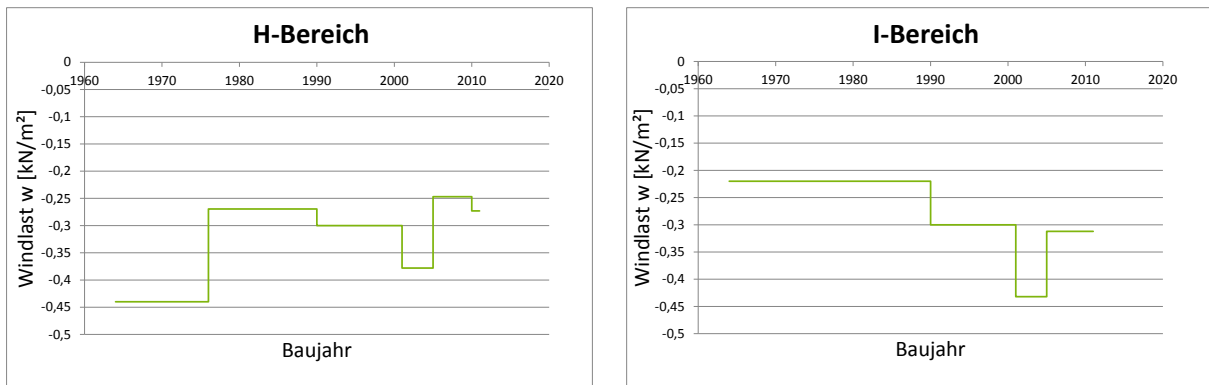


Abbildung 259: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

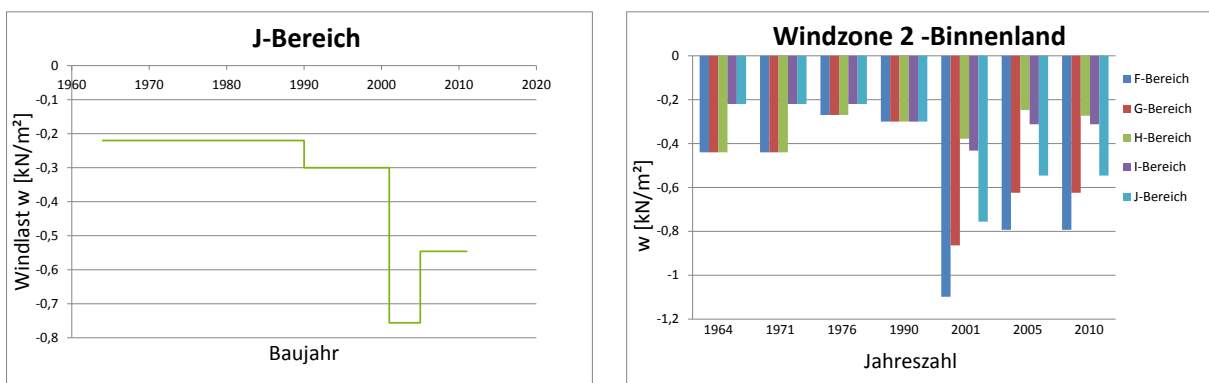


Abbildung 260: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.3 Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

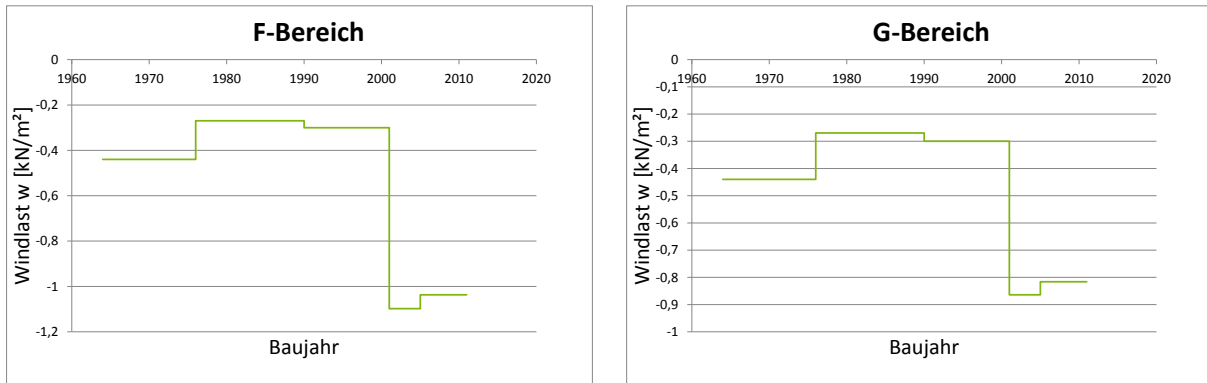


Abbildung 261: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

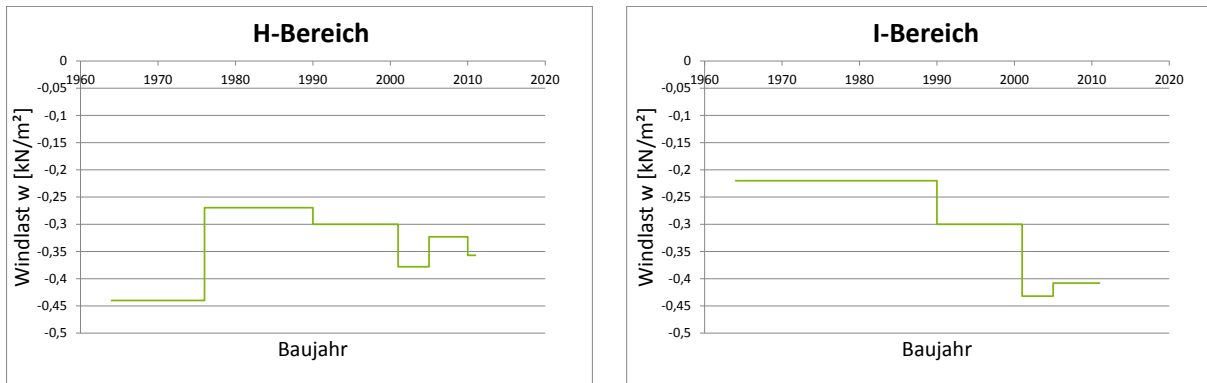


Abbildung 262: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich D

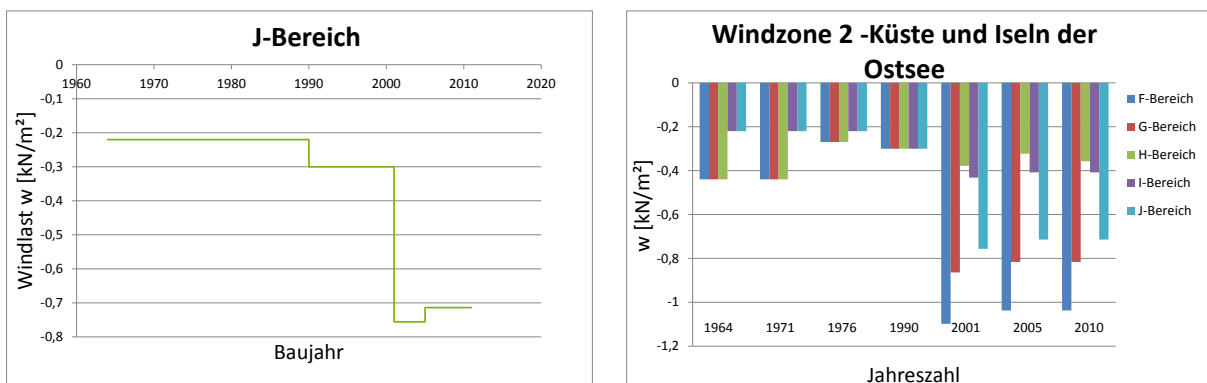


Abbildung 263: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.4 Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

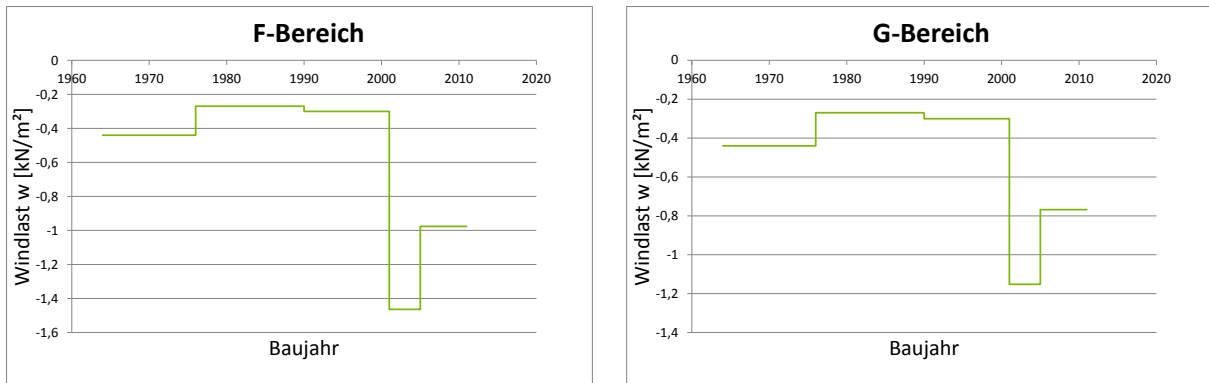


Abbildung 264: Halle F und G. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

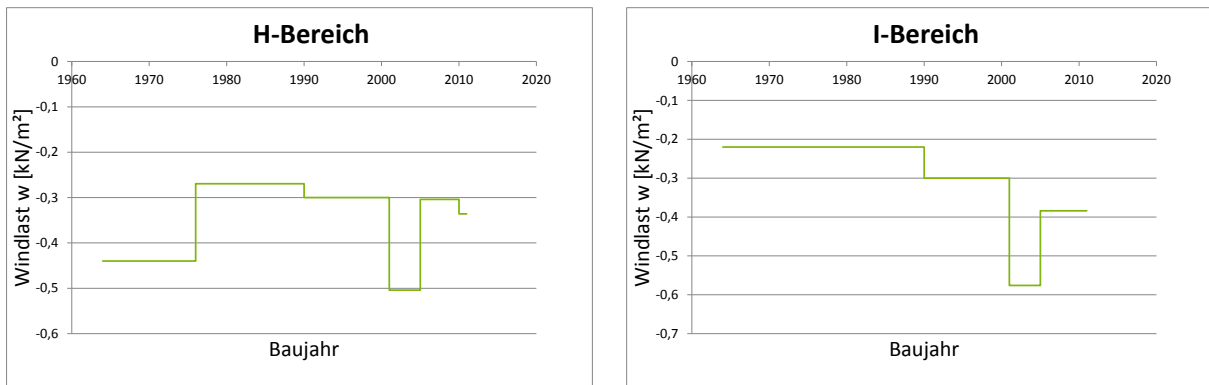


Abbildung 265: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

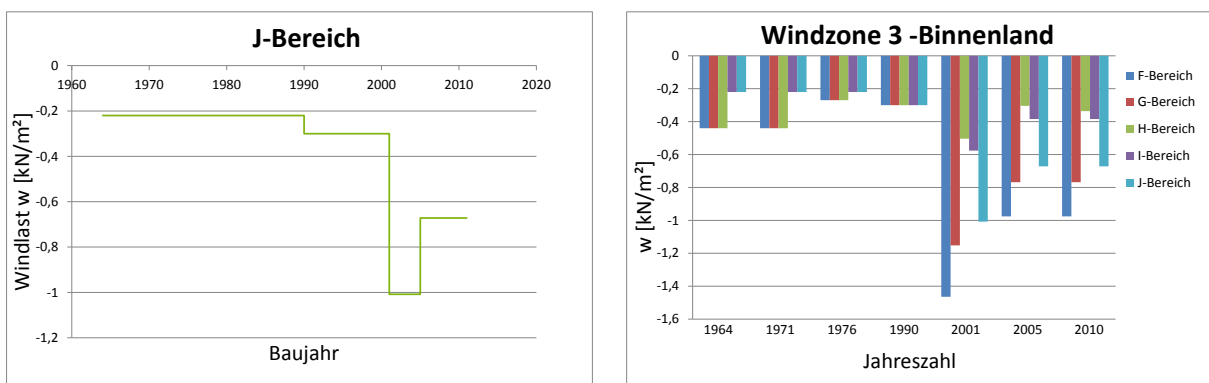


Abbildung 266: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.5 Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

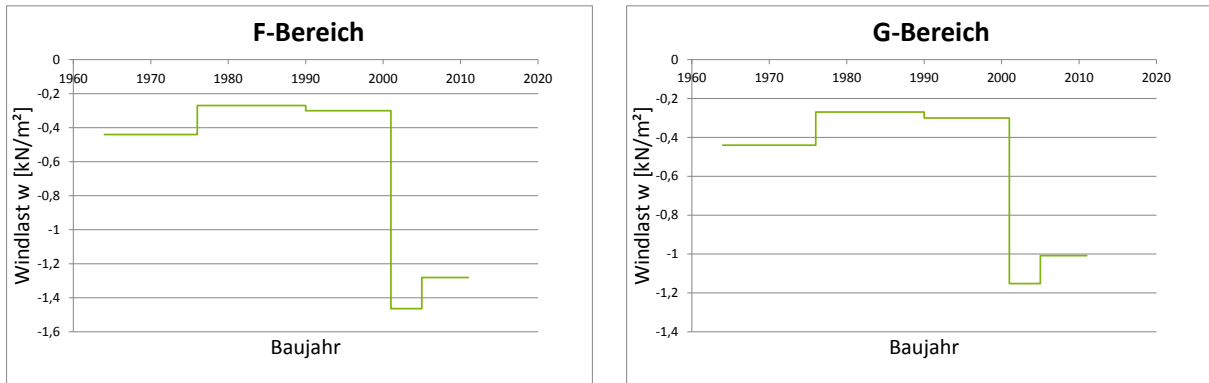


Abbildung 267: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

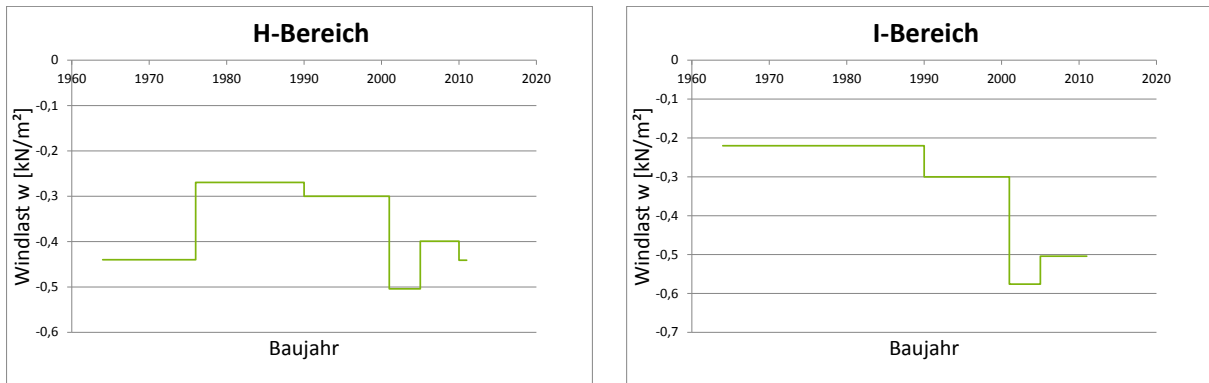


Abbildung 268: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

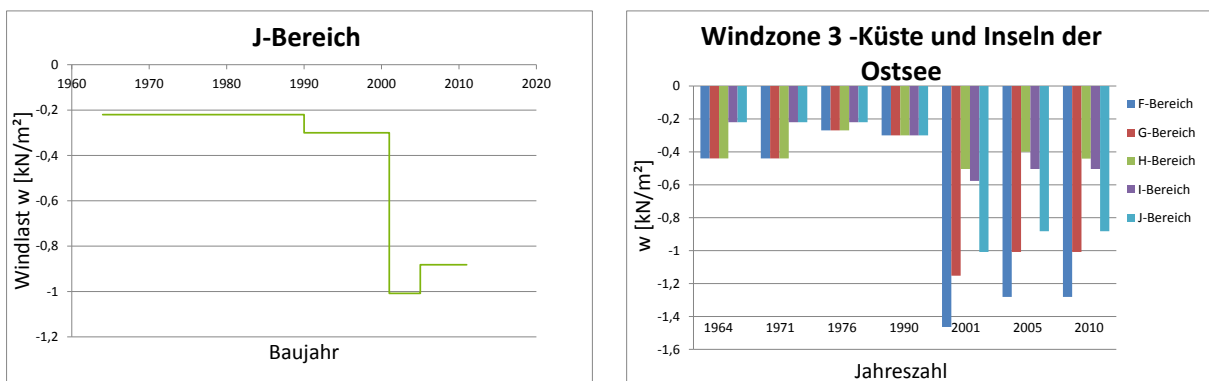


Abbildung 269: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.6 Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

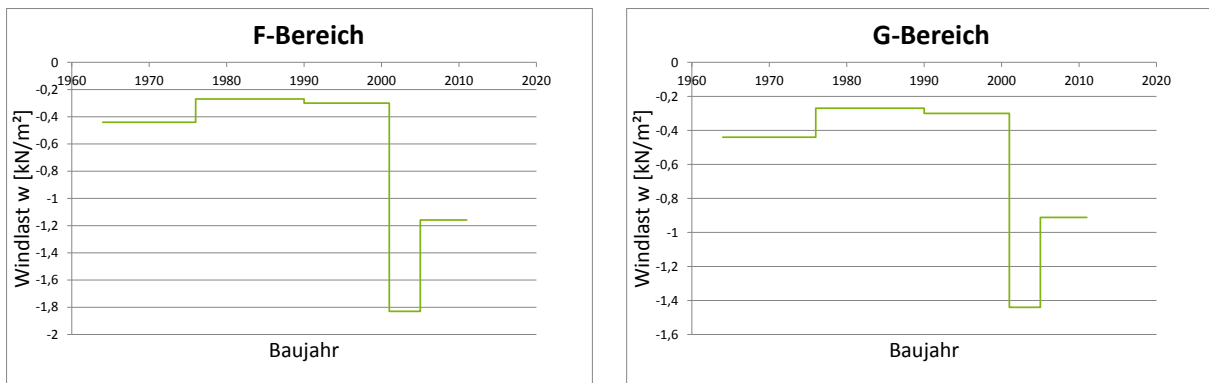


Abbildung 270: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

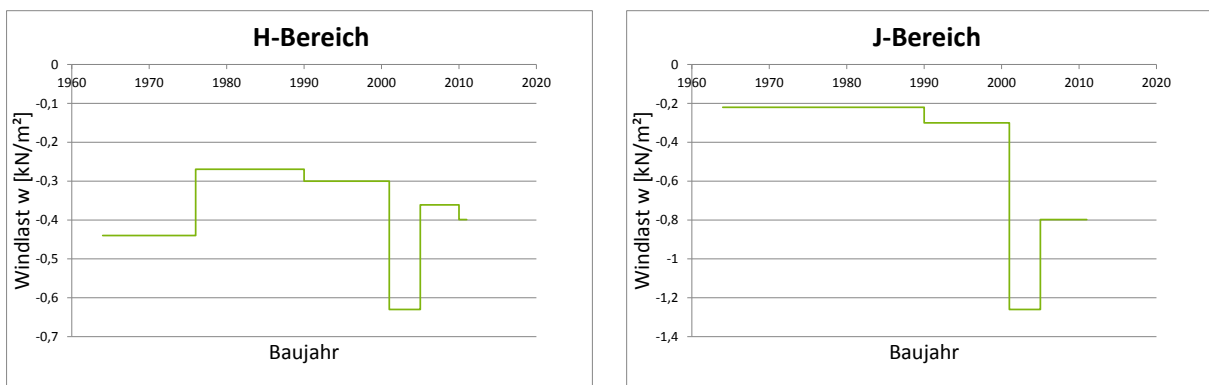


Abbildung 271: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

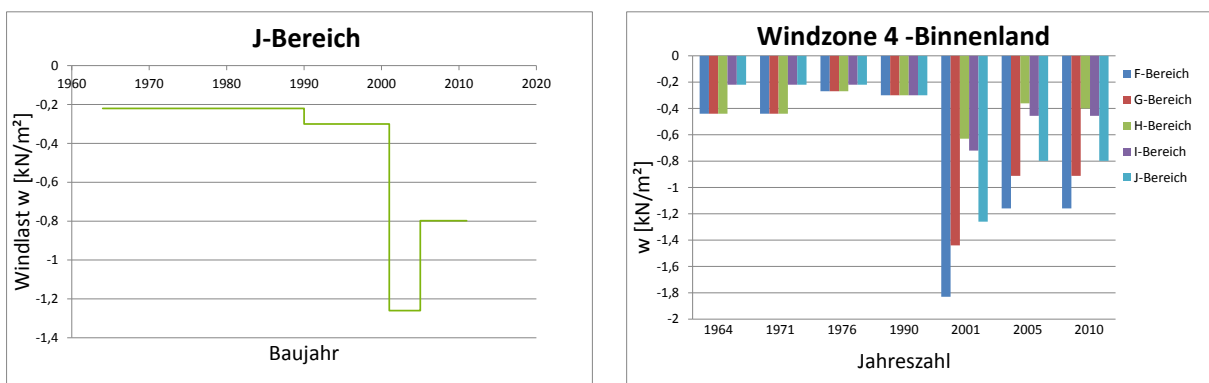


Abbildung 272: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.7 Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

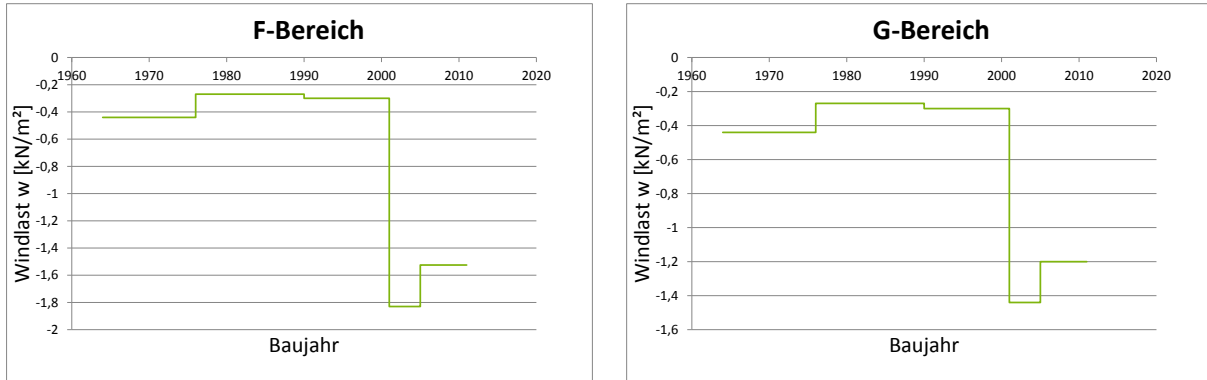


Abbildung 273: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

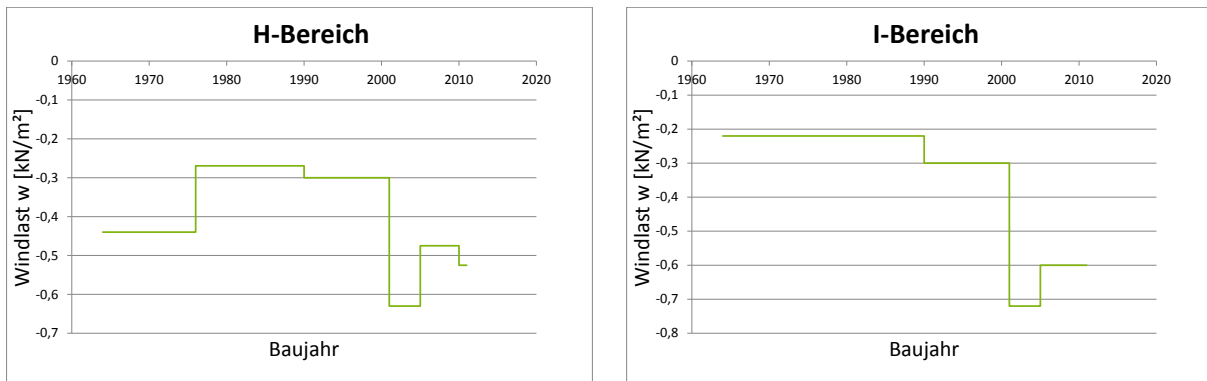


Abbildung 274: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

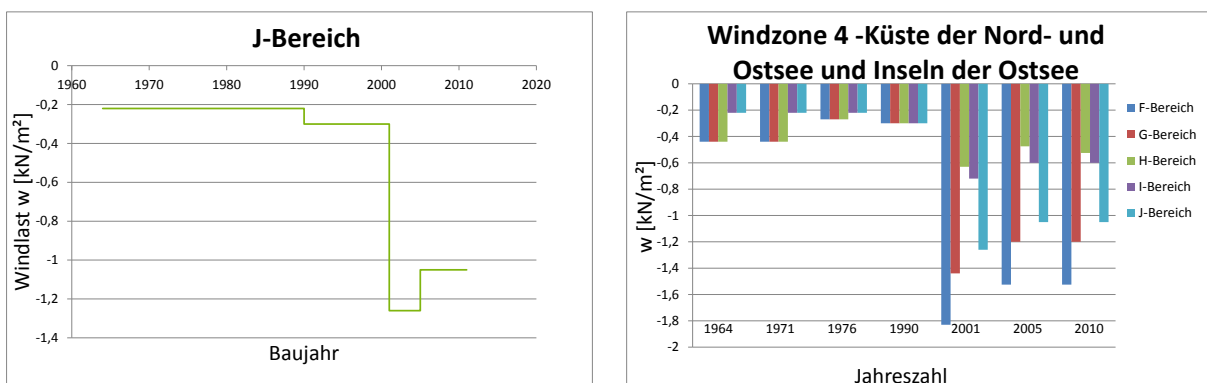


Abbildung 275: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.8 Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

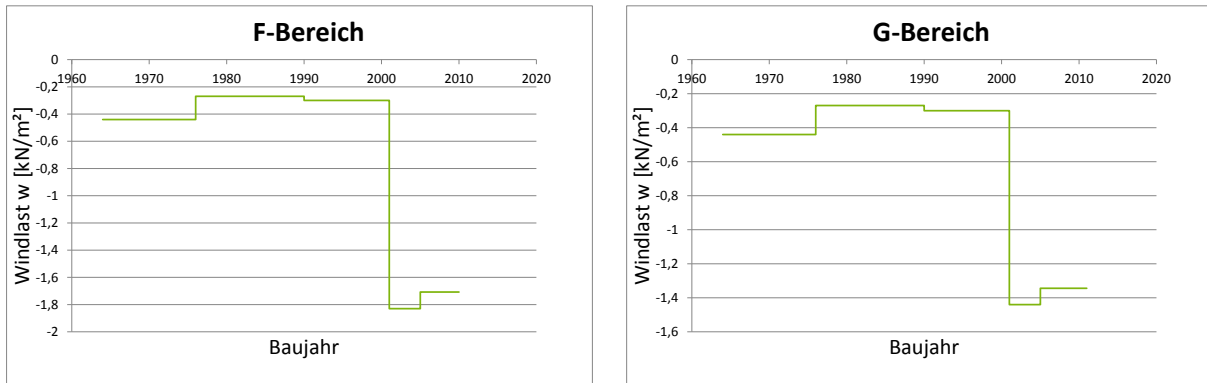


Abbildung 276: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

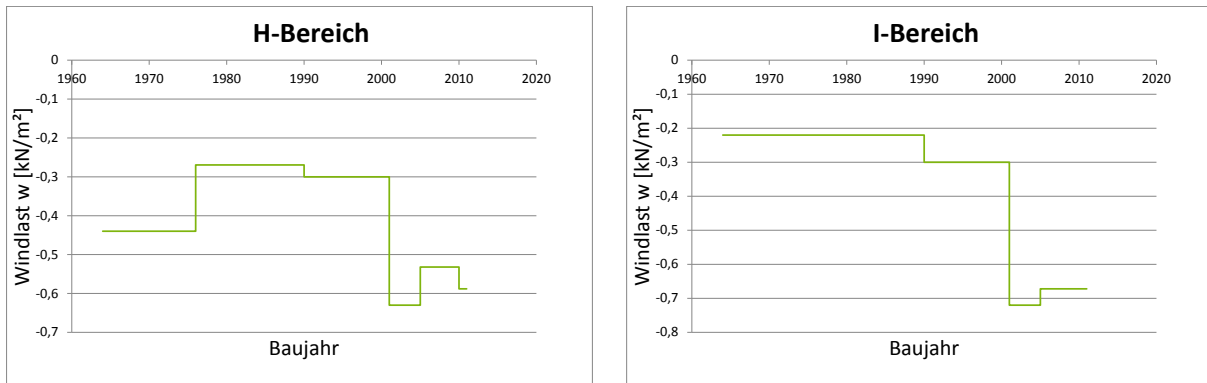


Abbildung 277: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

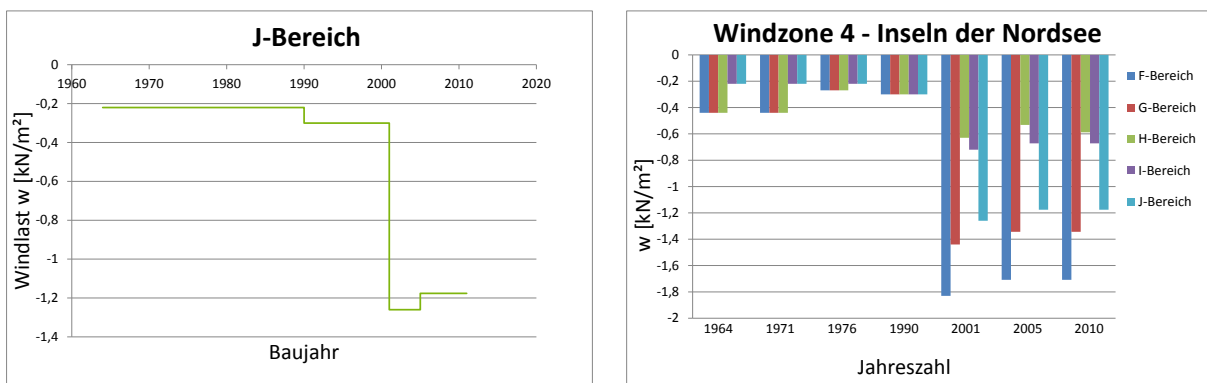


Abbildung 278: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.9 Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

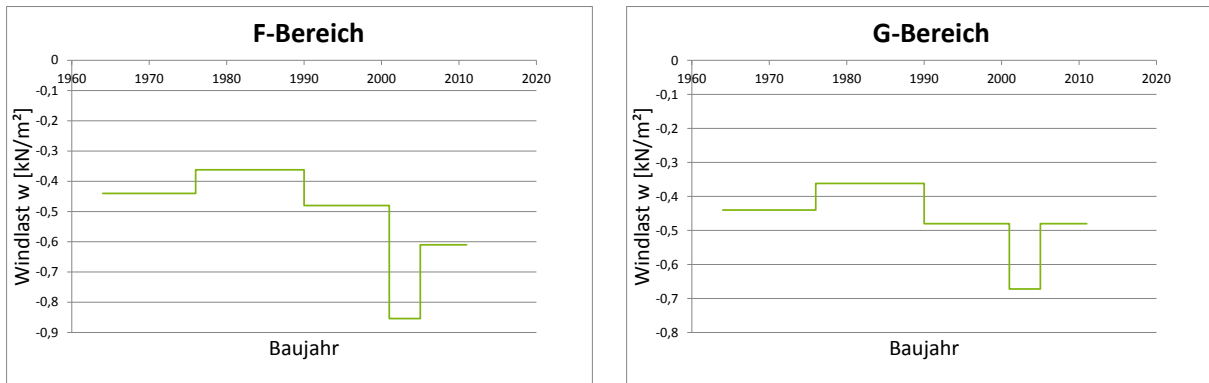


Abbildung 279: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

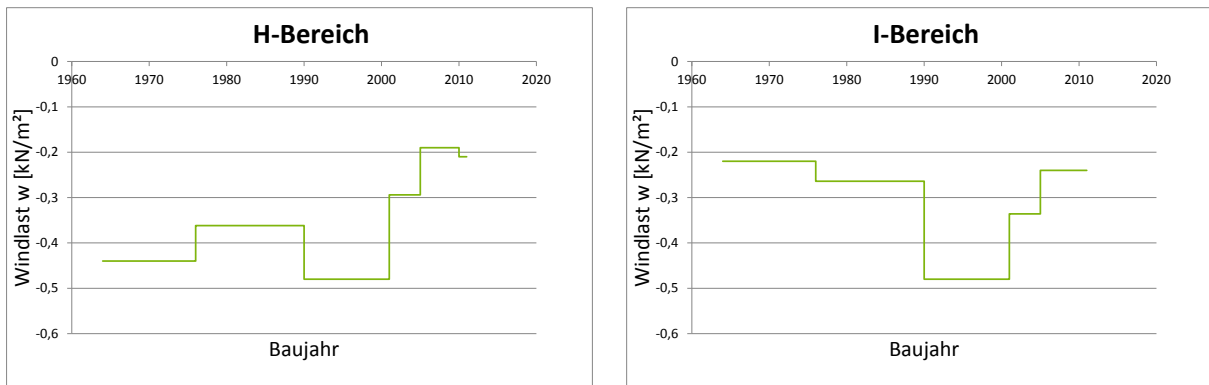


Abbildung 280: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

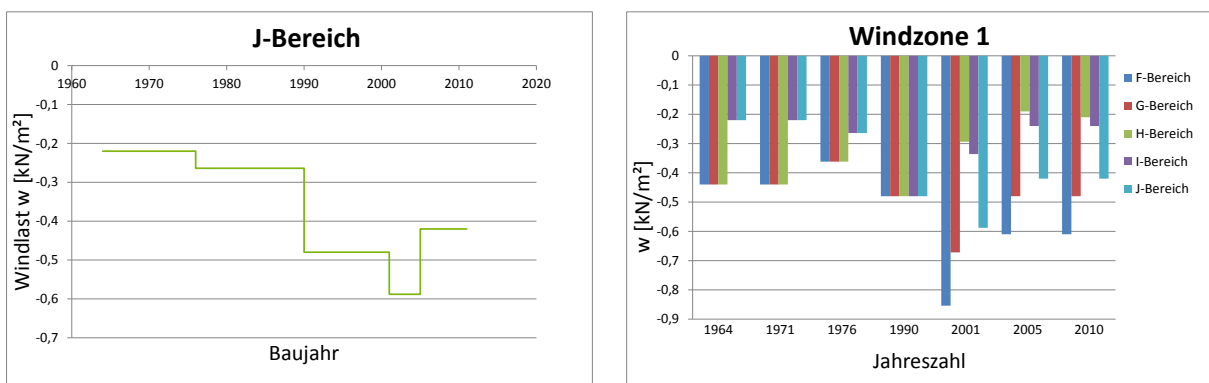


Abbildung 281: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.10 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

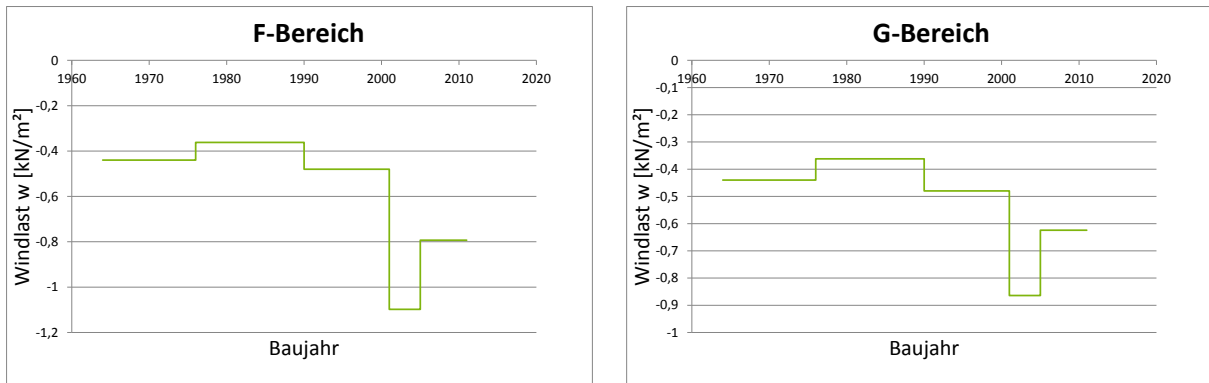


Abbildung 282: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

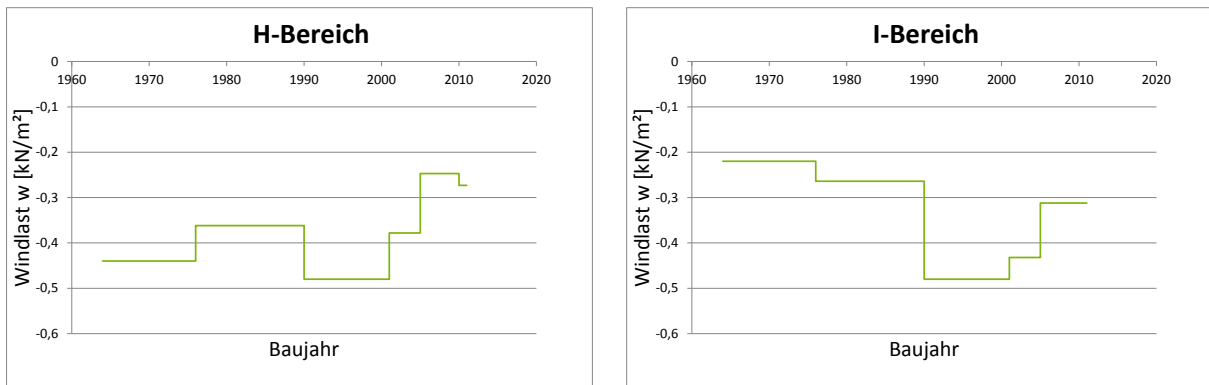


Abbildung 283: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

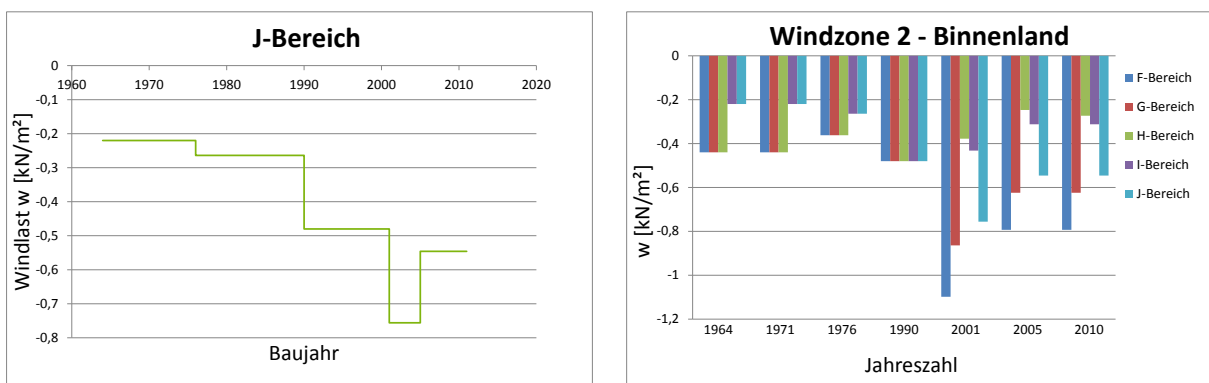


Abbildung 284: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.11 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

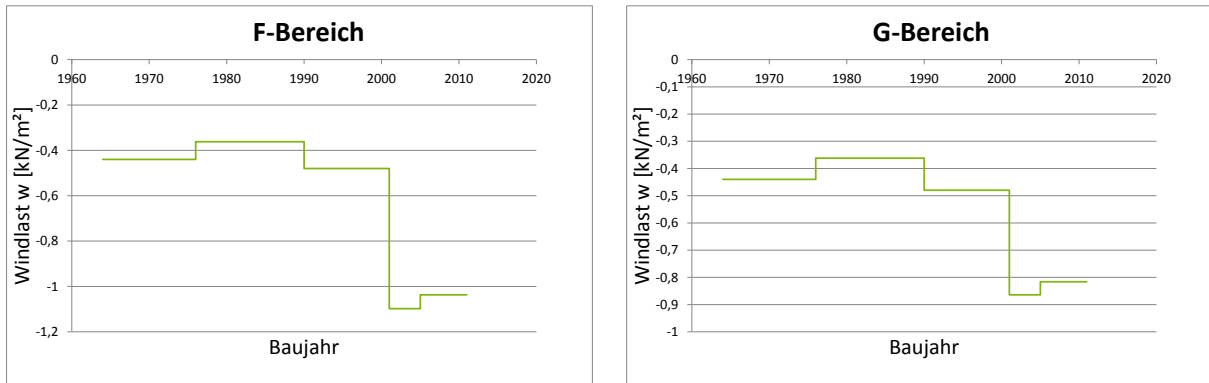


Abbildung 285: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

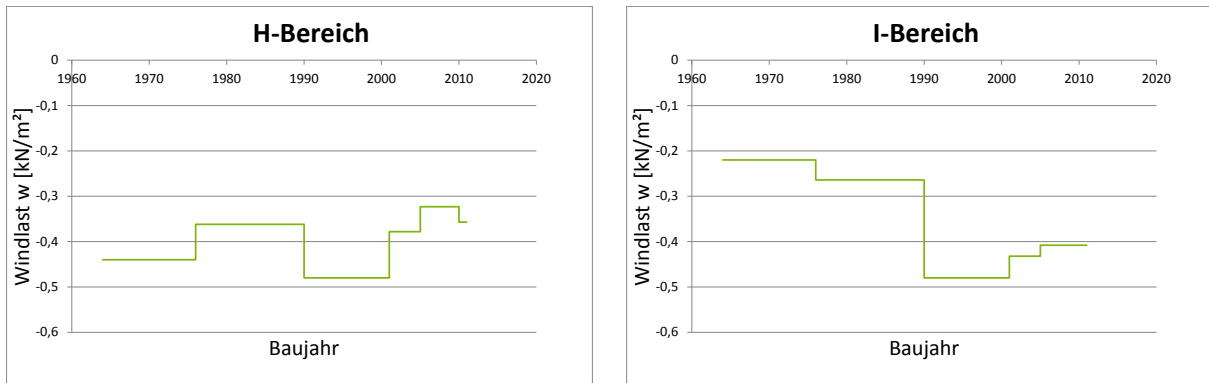


Abbildung 286: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

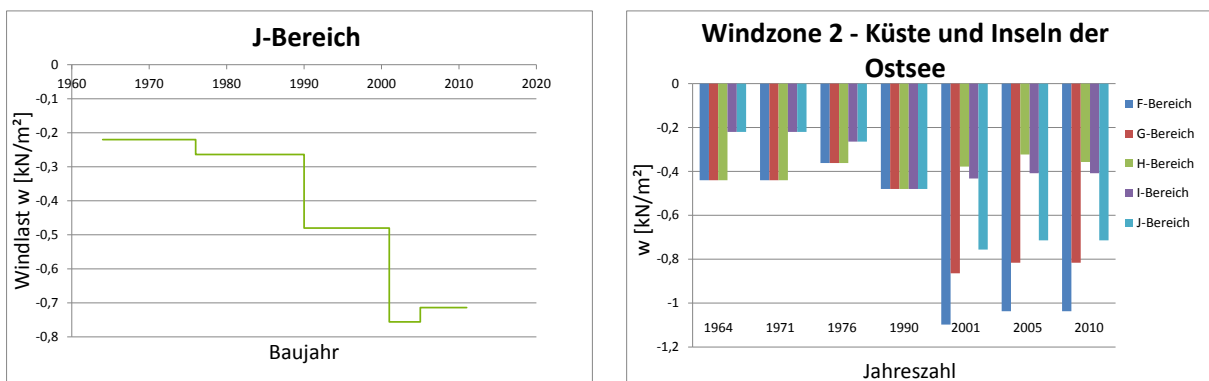


Abbildung 287: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.12 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

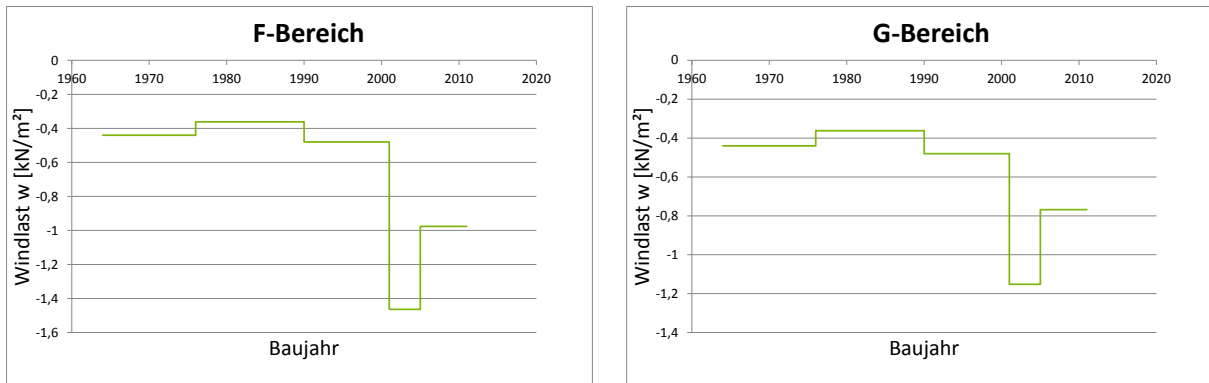


Abbildung 288: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

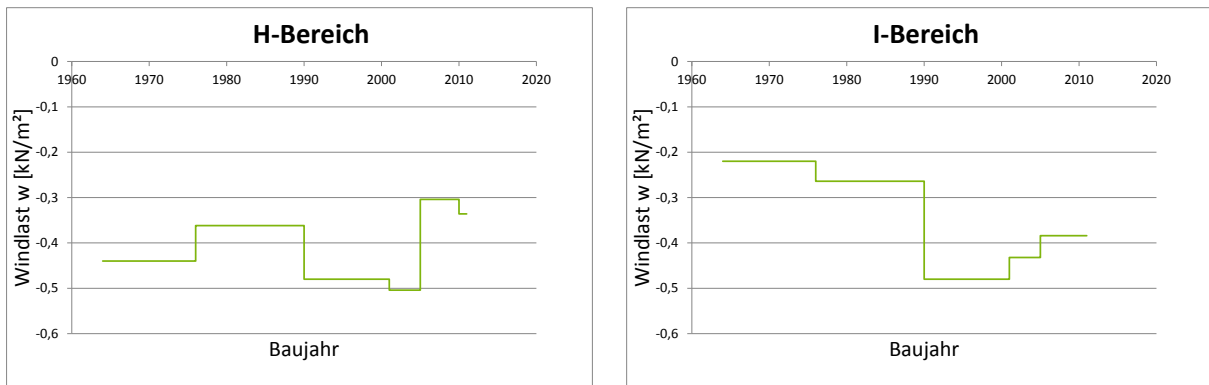


Abbildung 289: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

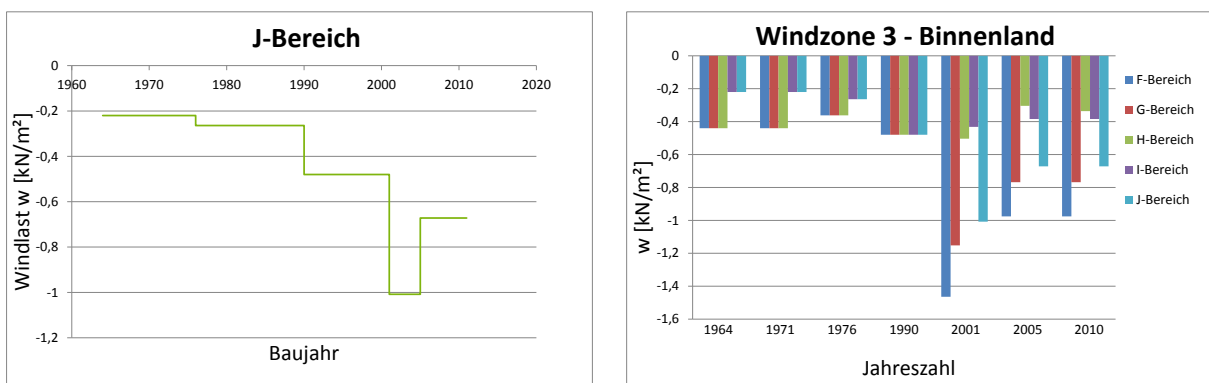


Abbildung 290: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.13 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

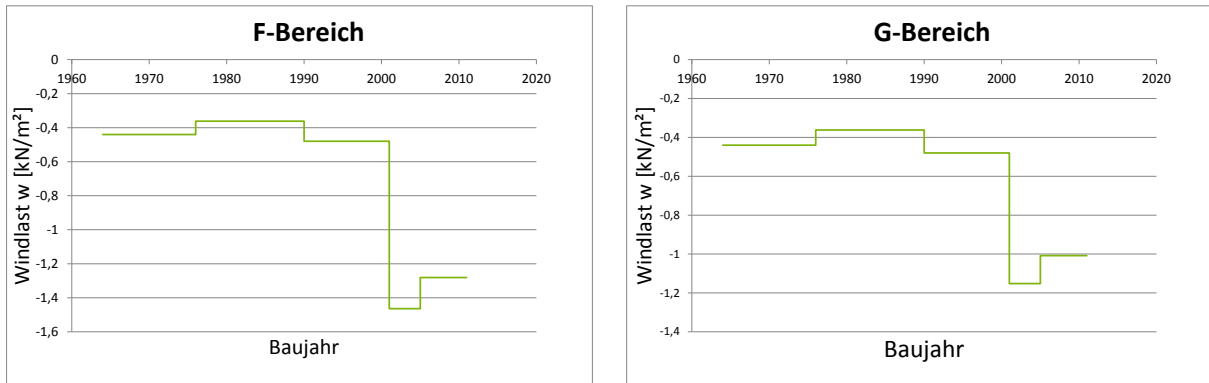


Abbildung 291: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

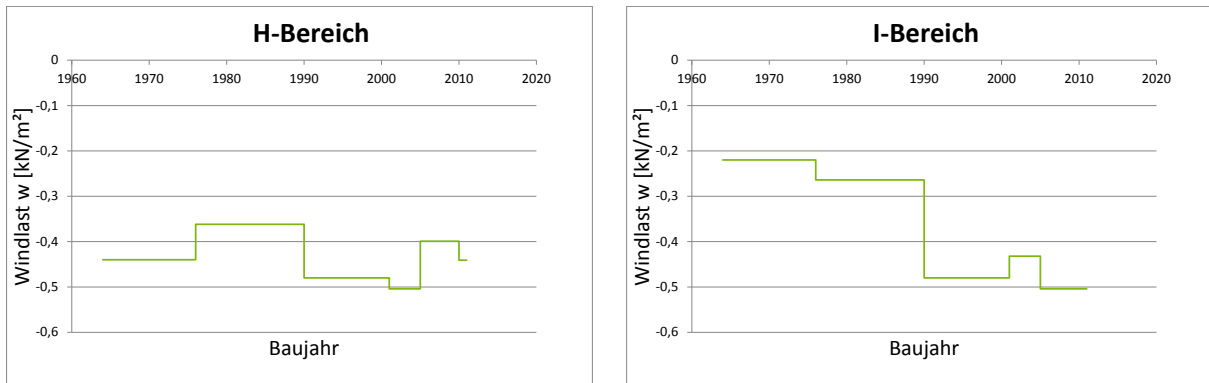


Abbildung 292: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

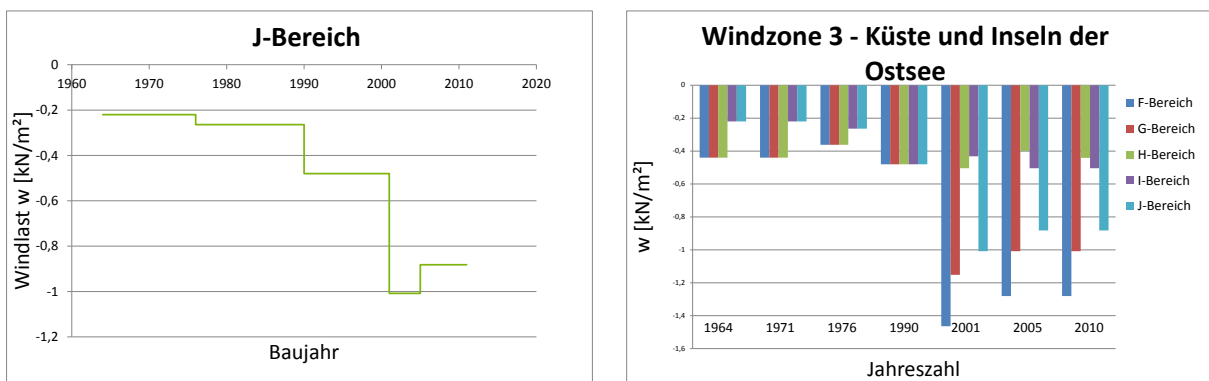


Abbildung 293: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.14 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

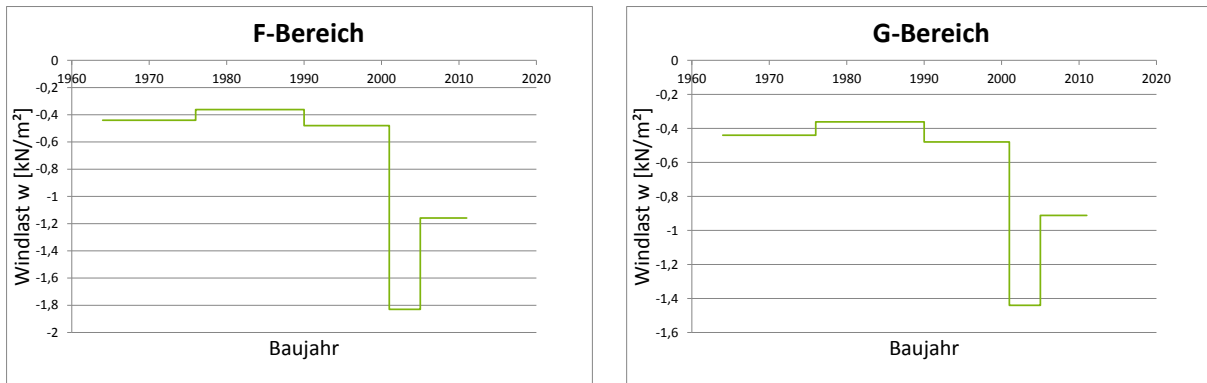


Abbildung 294: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

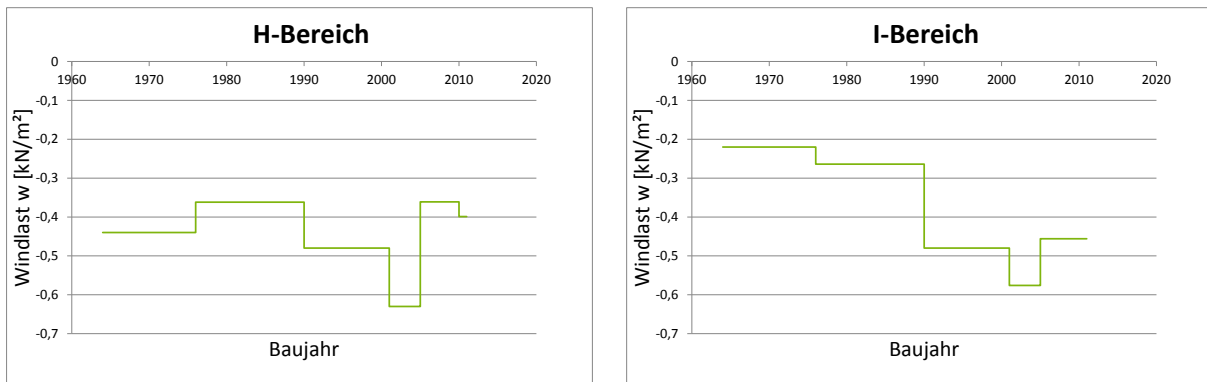


Abbildung 295: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

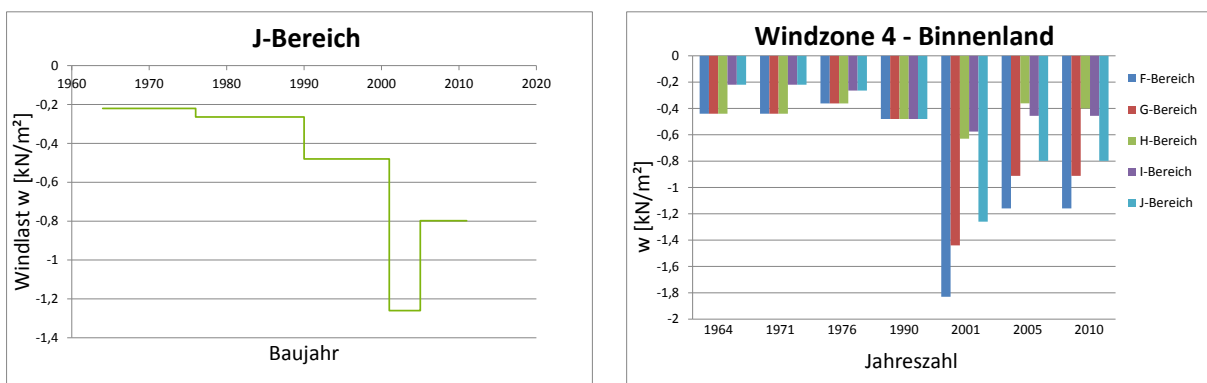


Abbildung 296: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.15 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

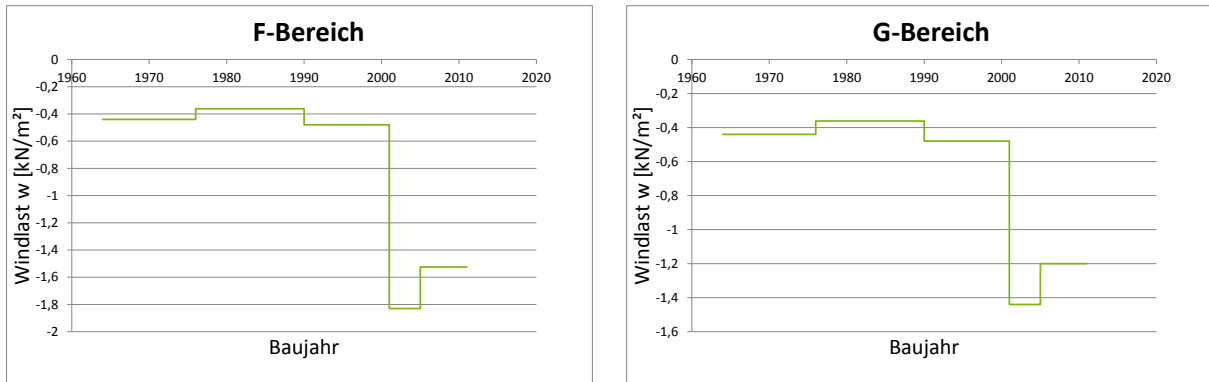


Abbildung 297: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

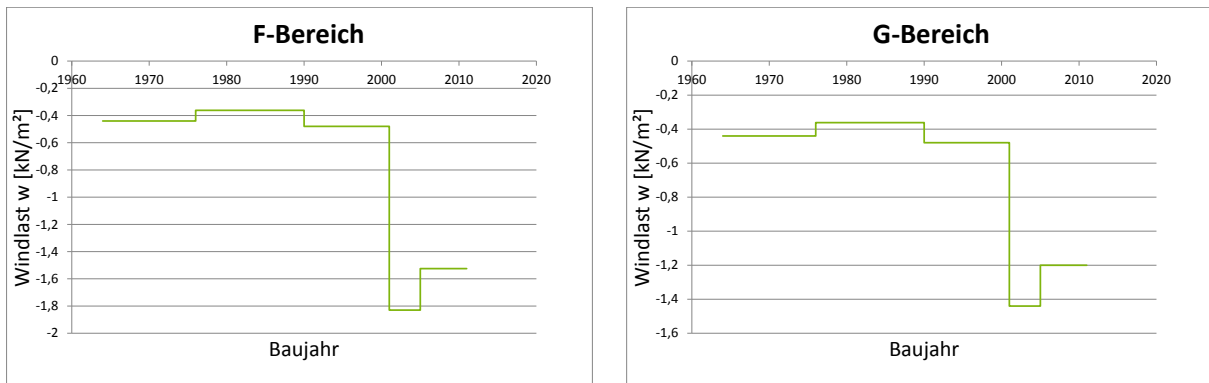


Abbildung 298: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

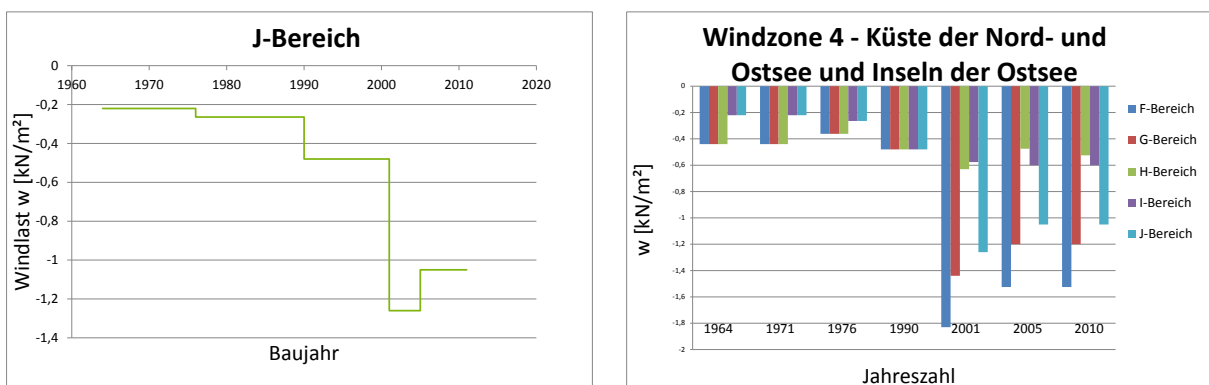


Abbildung 299: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.4.16 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

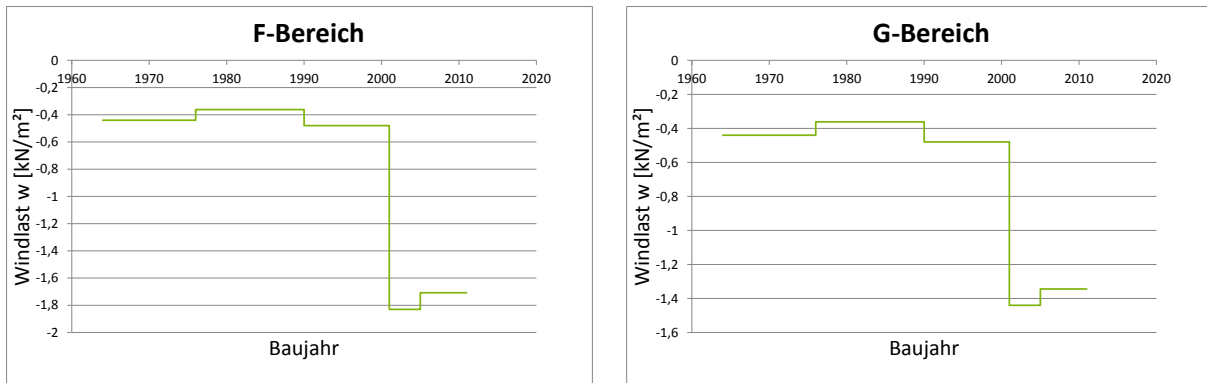


Abbildung 300: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

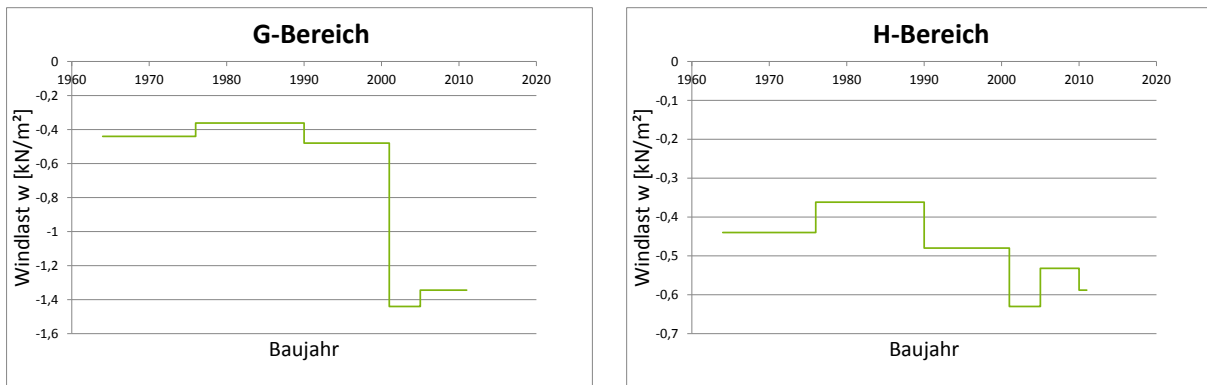


Abbildung 301: Halle C. Links: Bereich G. Rechts: Bereich H

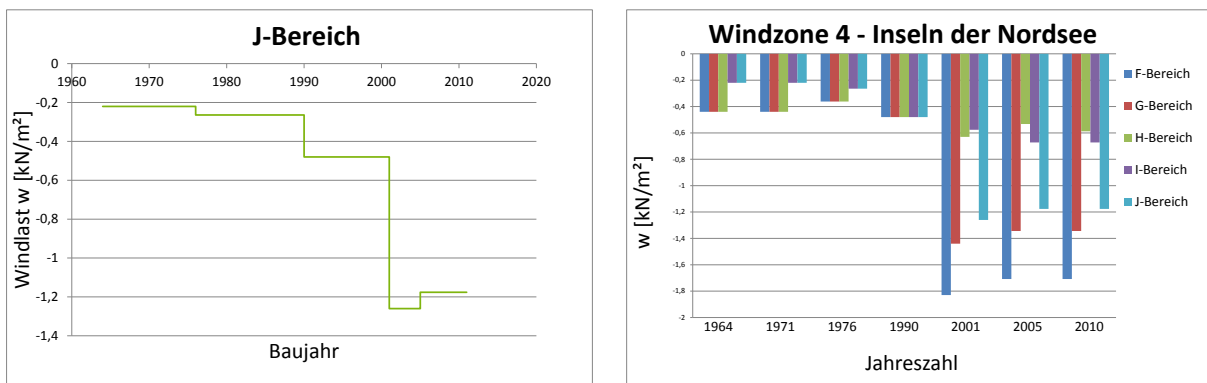


Abbildung 302: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5 Windlast auf Wände für die lokale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010

5.5.1 Halle A in der Windzone 1 Binnenland

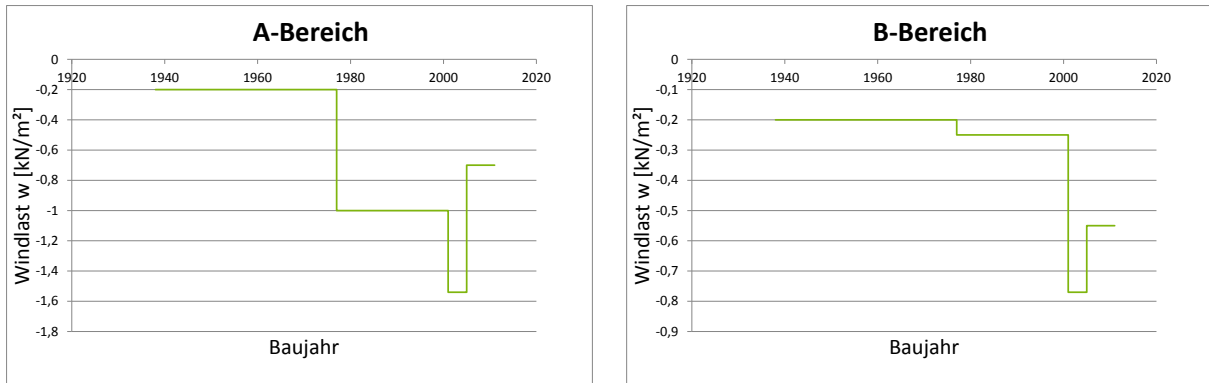


Abbildung 303: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

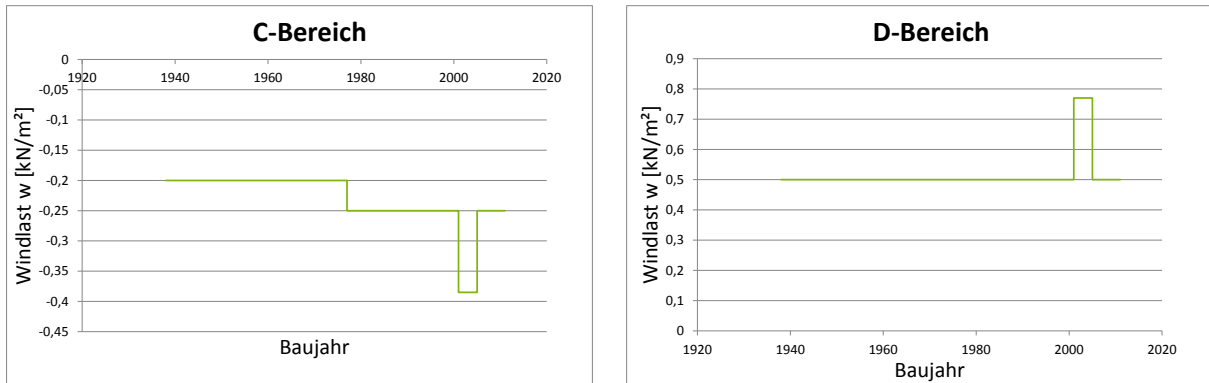


Abbildung 304: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

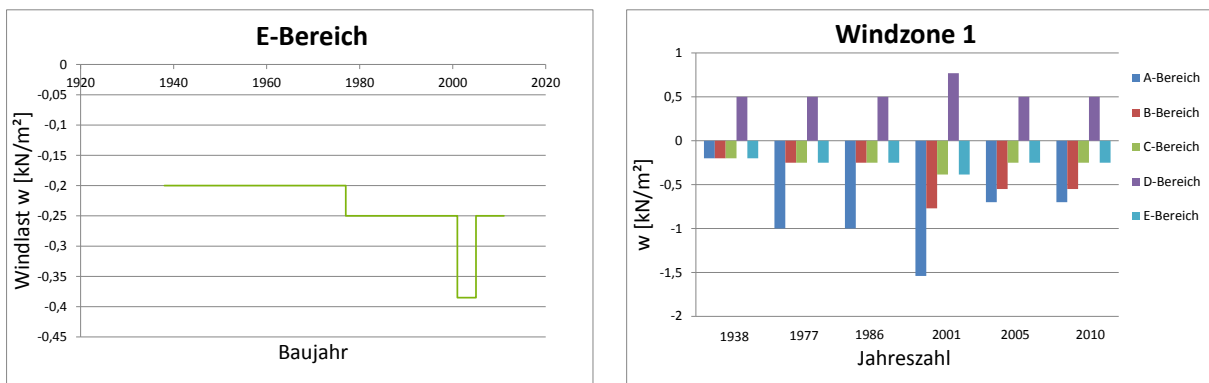


Abbildung 305: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.2 Halle A in der Windzone 2 Binnenland

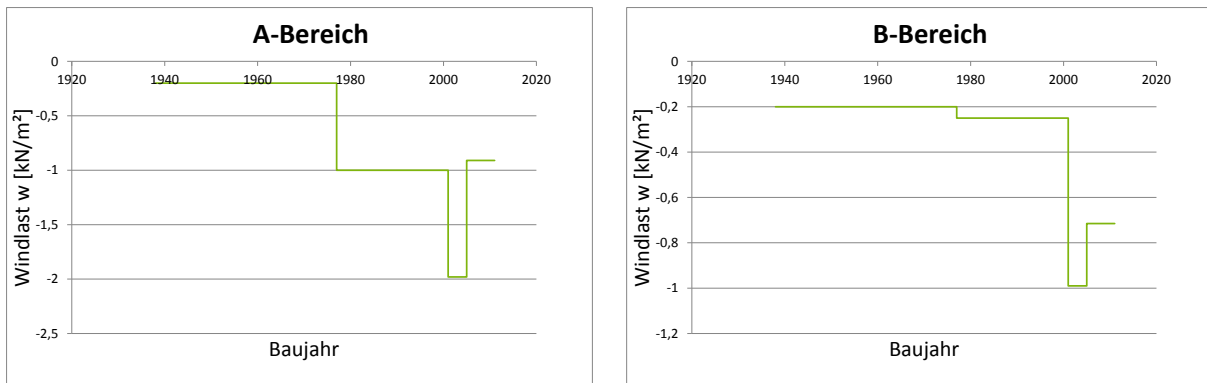


Abbildung 306: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

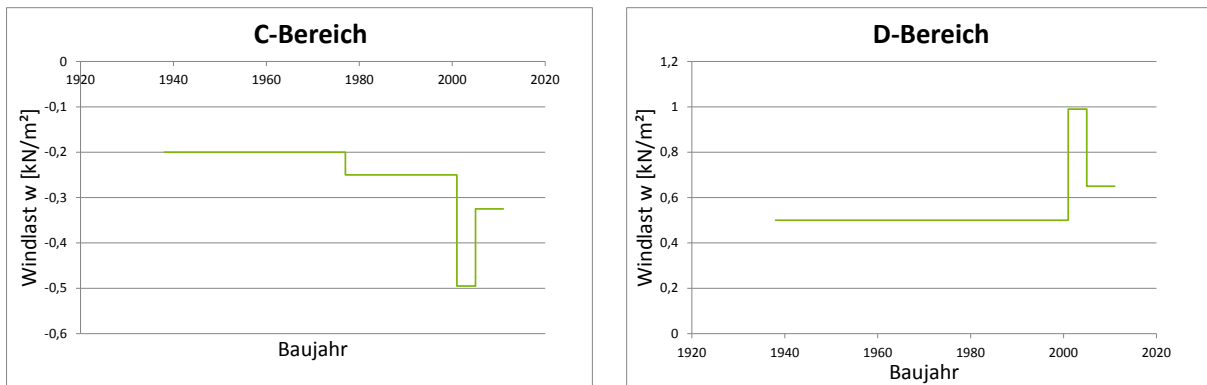


Abbildung 307: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

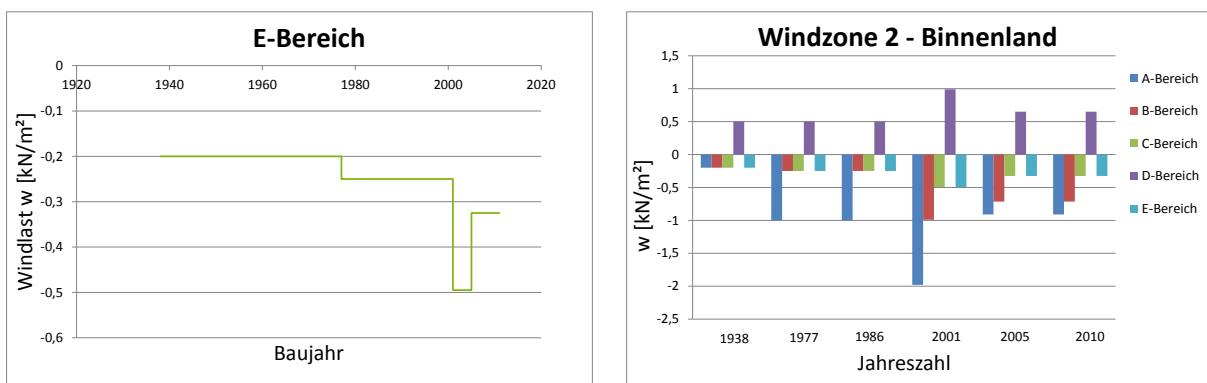


Abbildung 308: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.3 Halle A in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

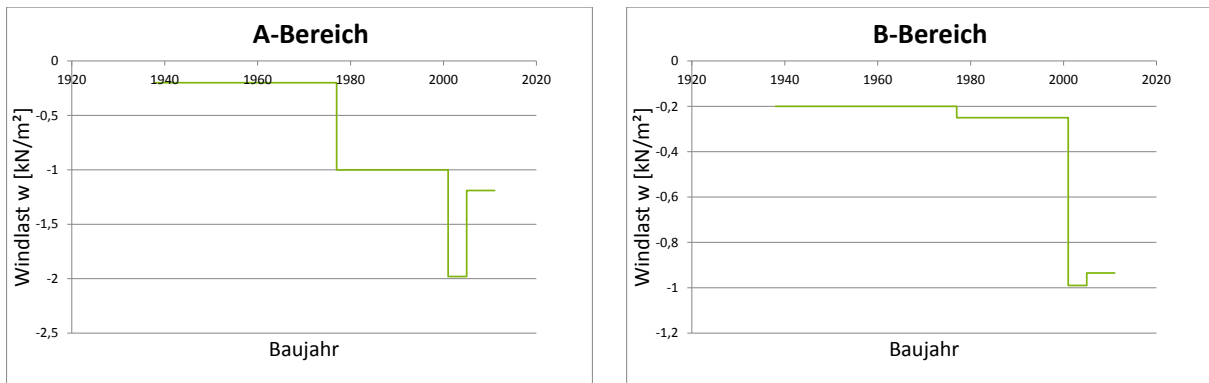


Abbildung 309: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

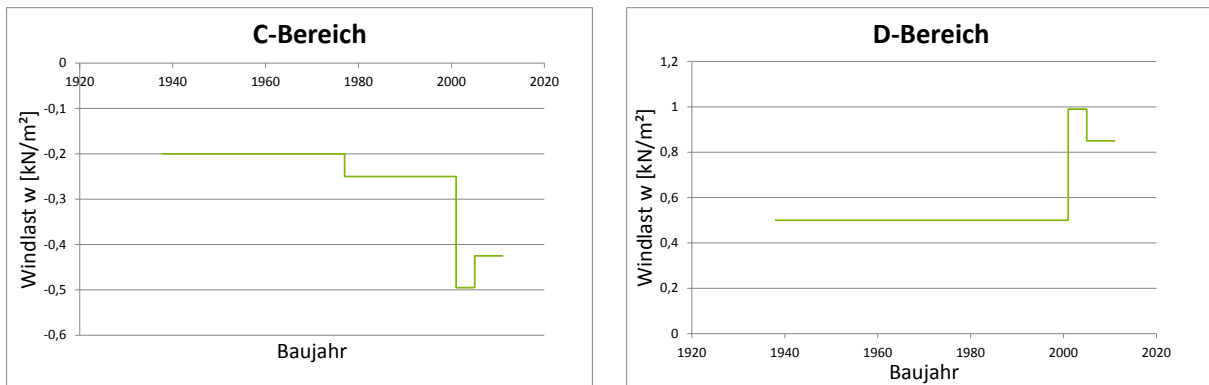


Abbildung 310: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

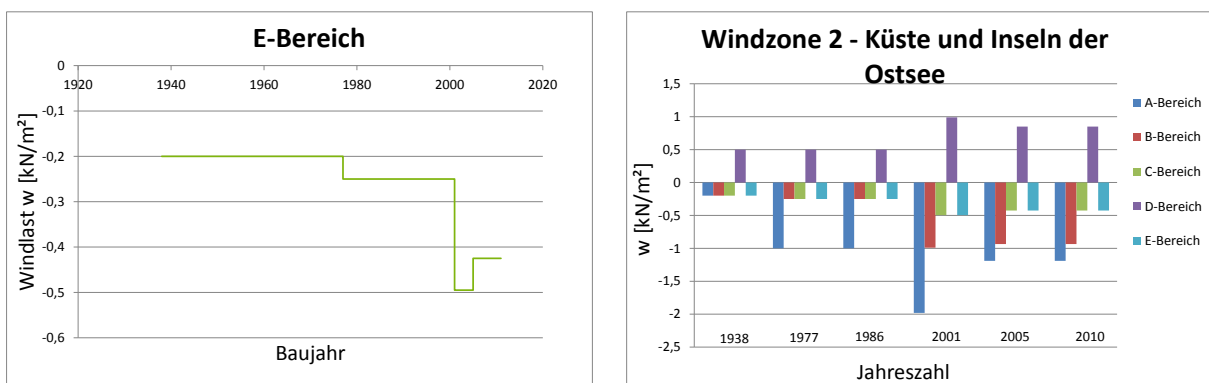


Abbildung 311: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.4 Halle A in der Windzone 3 Binnenland

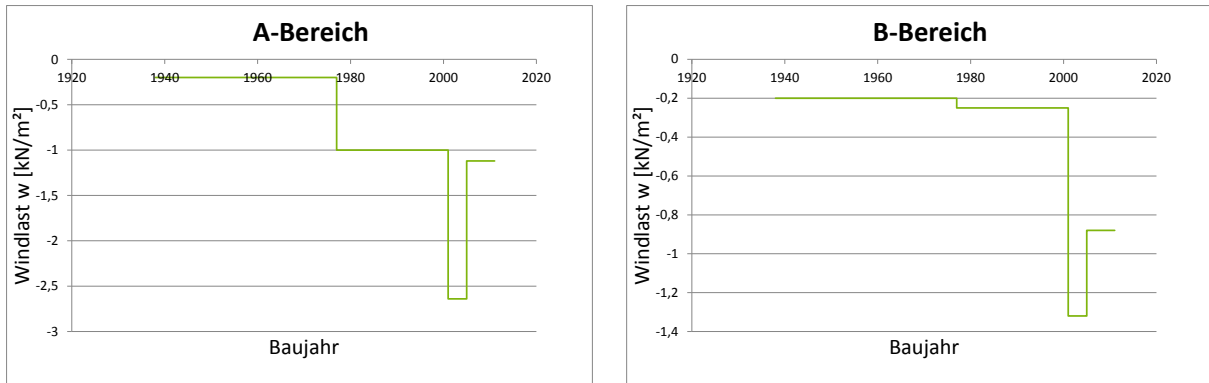


Abbildung 312: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

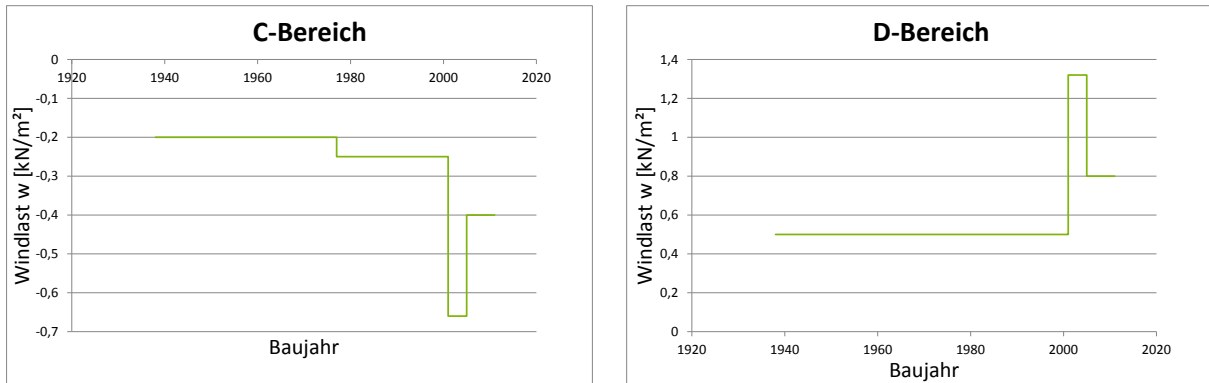


Abbildung 313: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

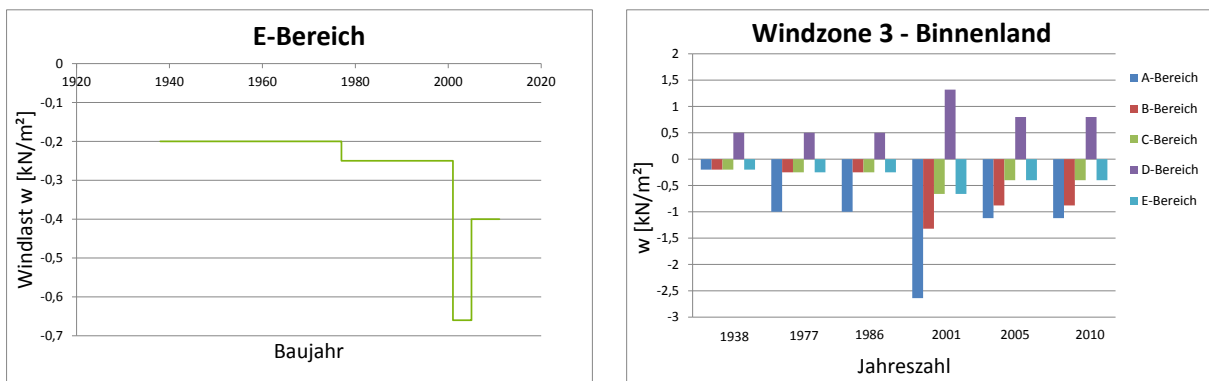


Abbildung 314: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.5 Halle A in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

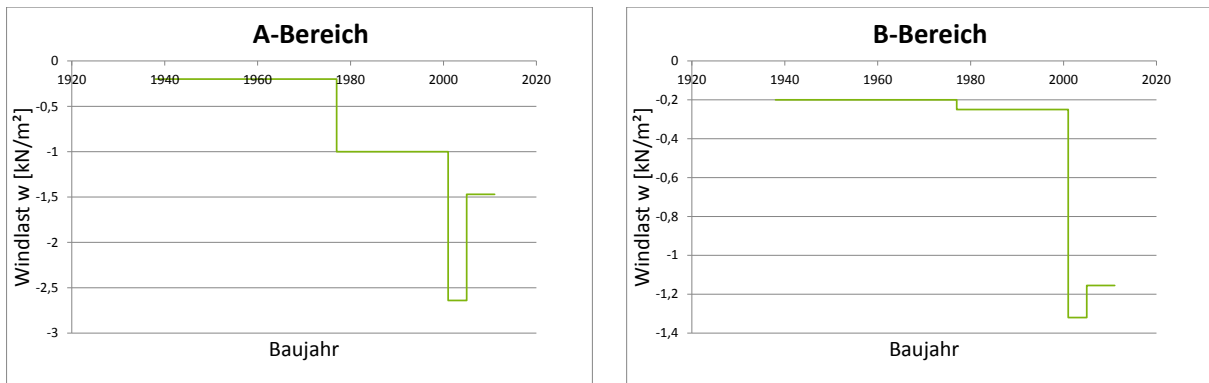


Abbildung 315: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

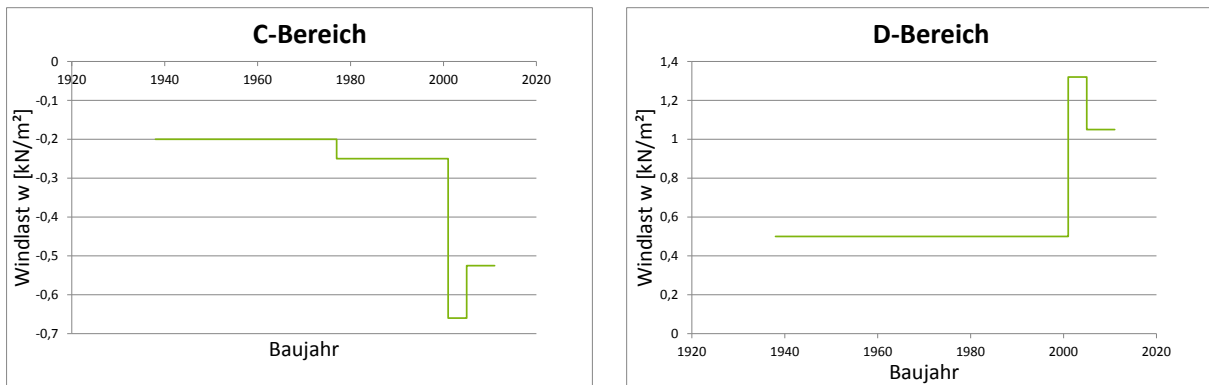


Abbildung 316: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

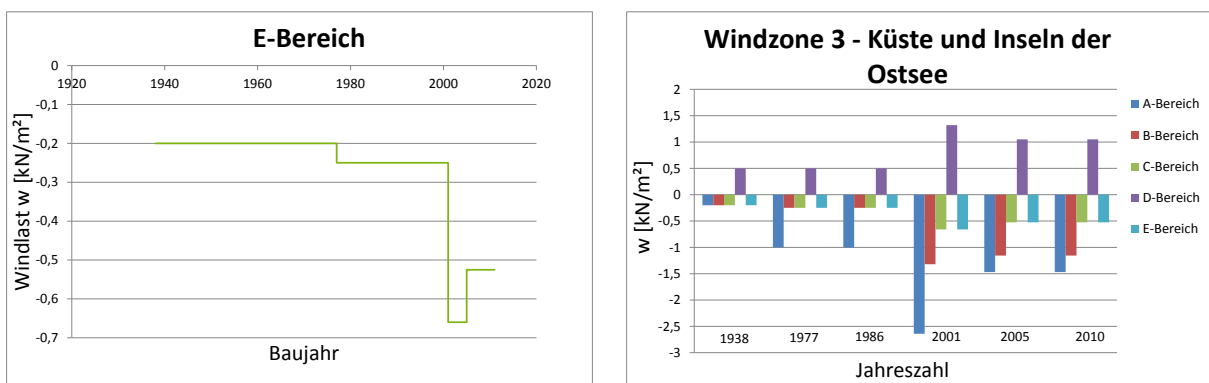


Abbildung 317: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.6 Halle A in der Windzone 4 Binnenland

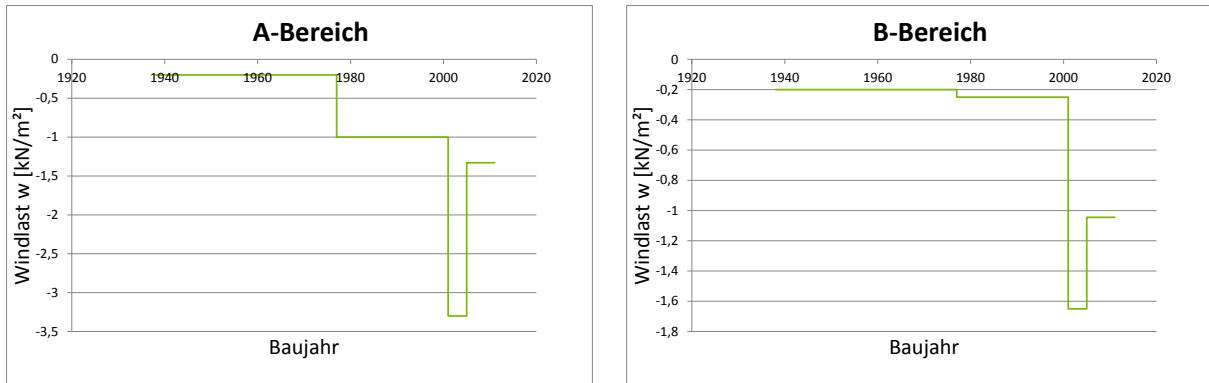


Abbildung 318: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

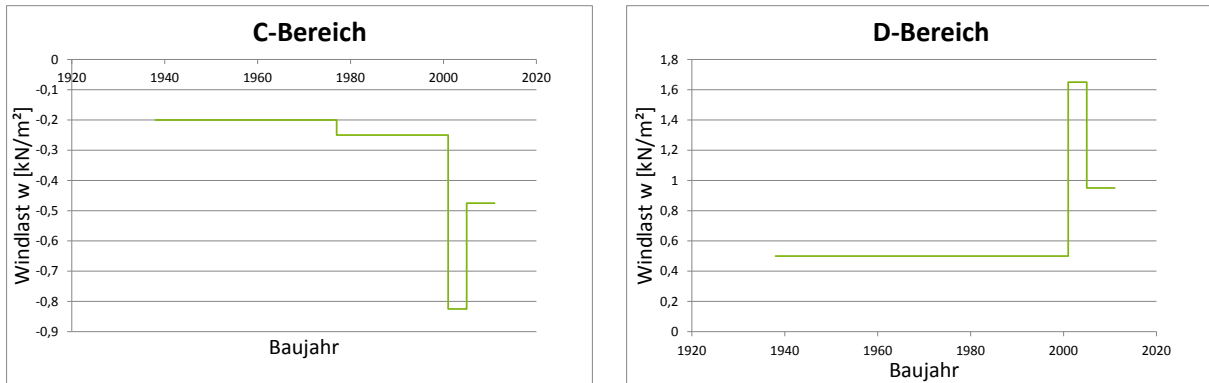


Abbildung 319: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

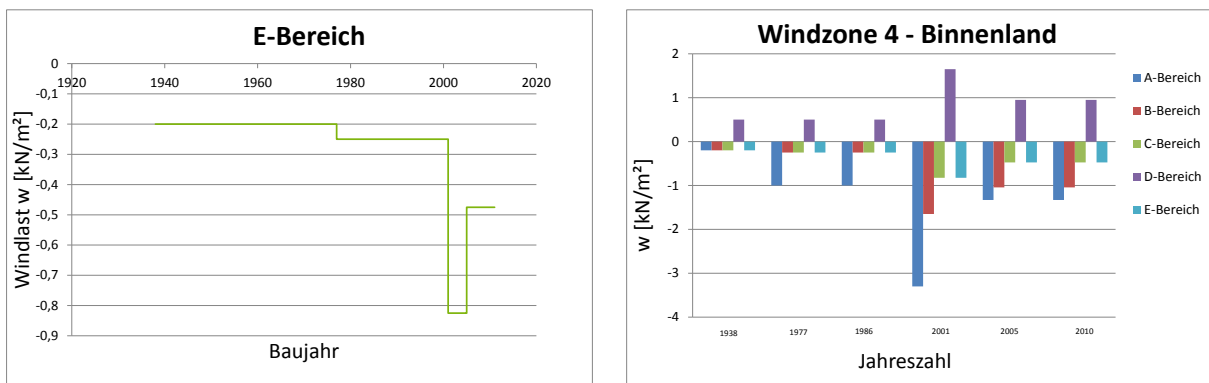


Abbildung 320: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.7 Halle A in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

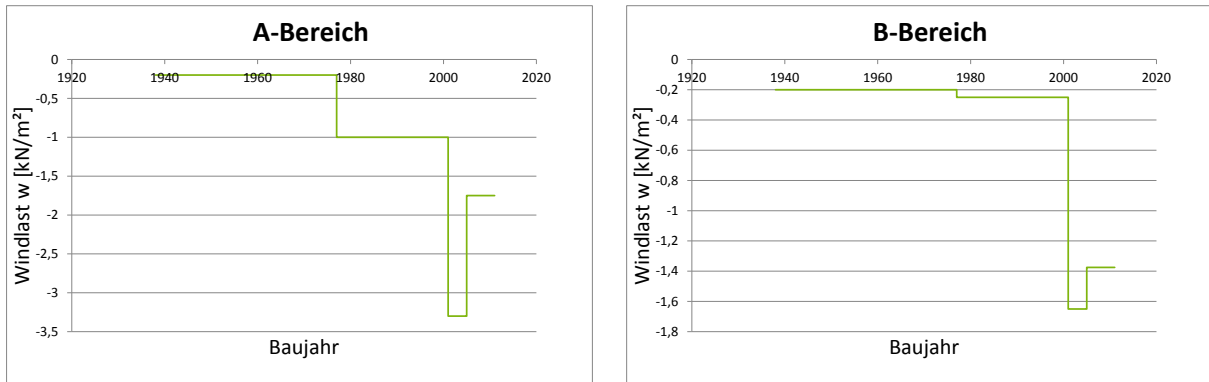


Abbildung 321: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

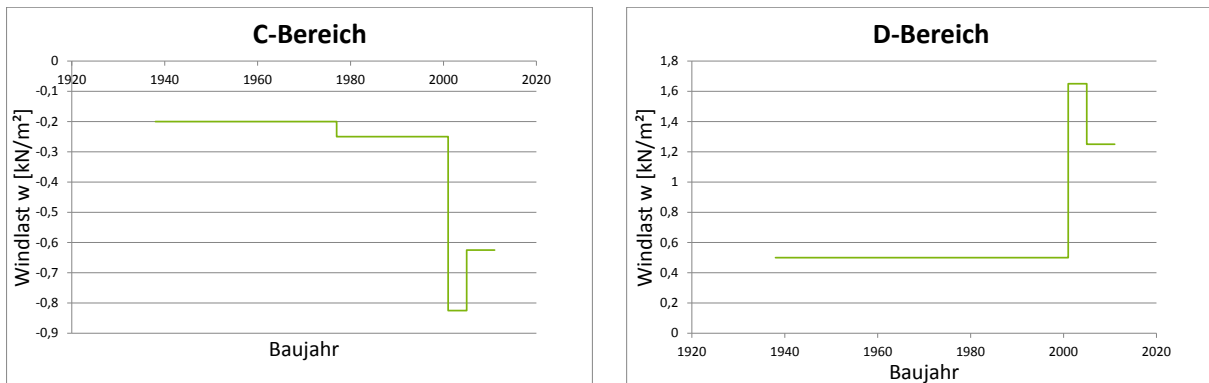


Abbildung 322: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

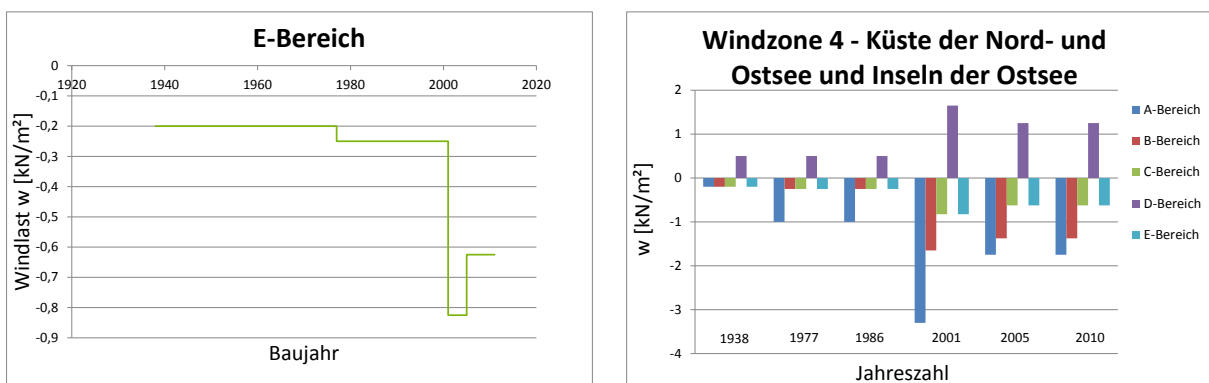


Abbildung 323: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.8 Halle A in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

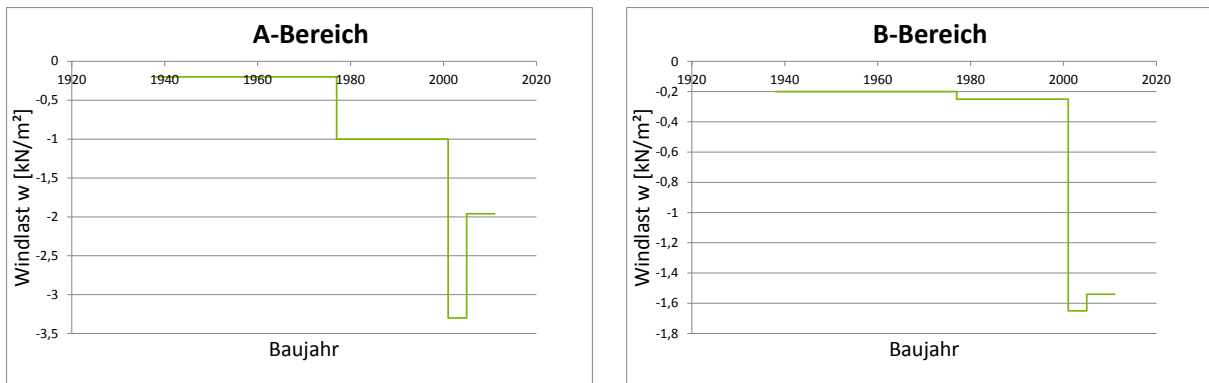


Abbildung 324: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

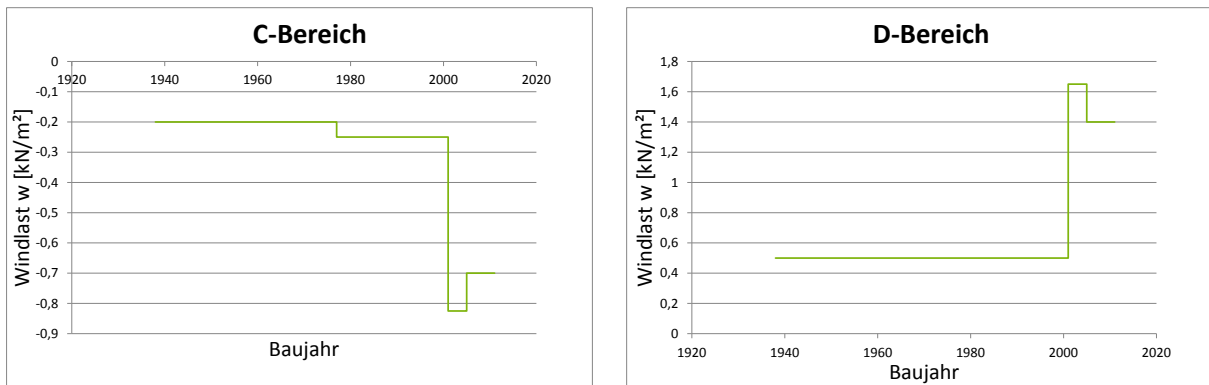


Abbildung 325: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

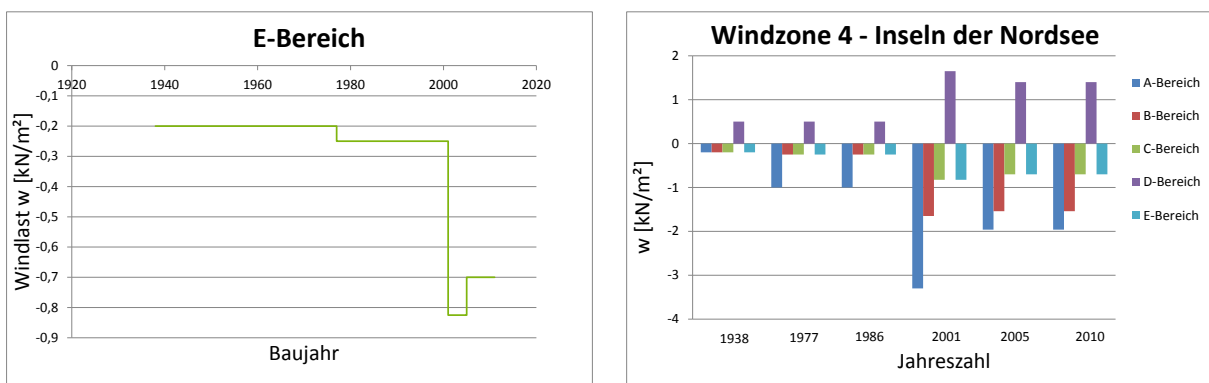


Abbildung 326: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.9 Halle B in der Windzone 1 Binnenland

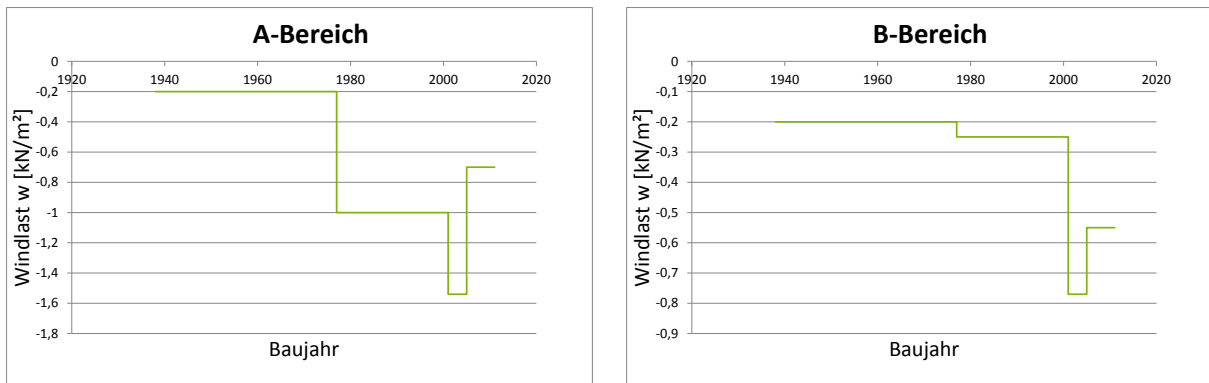


Abbildung 327: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

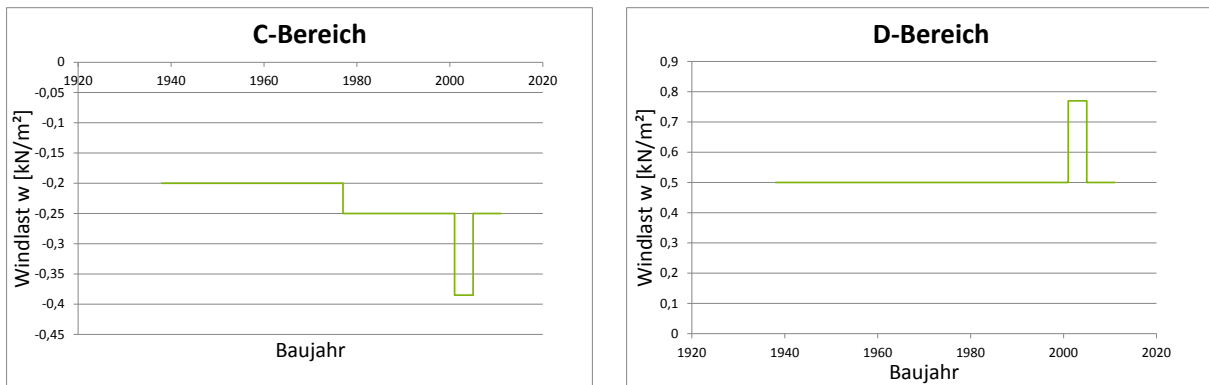


Abbildung 328: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

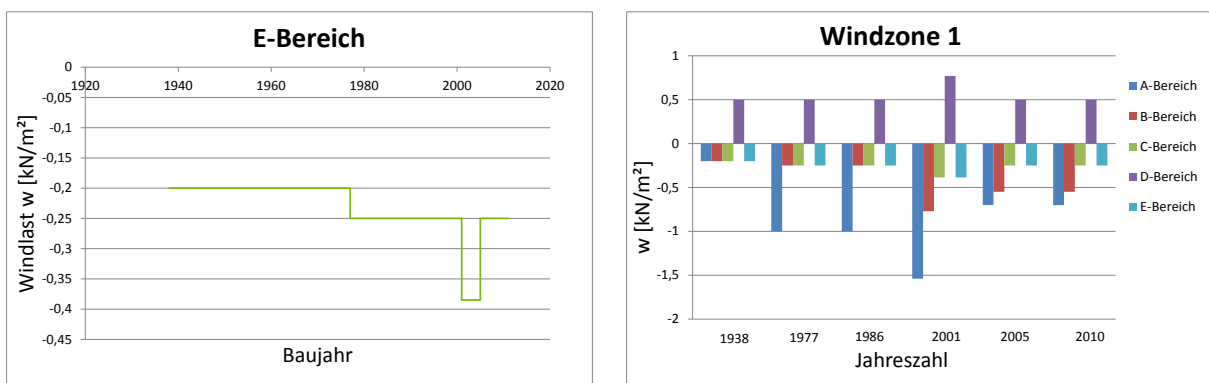


Abbildung 329: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.10 Halle B in der Windzone 2 Binnenland

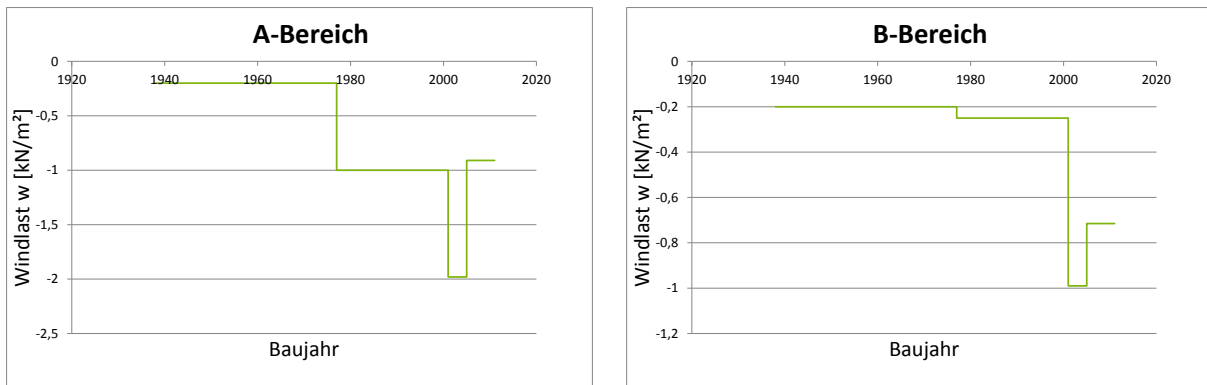


Abbildung 330: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

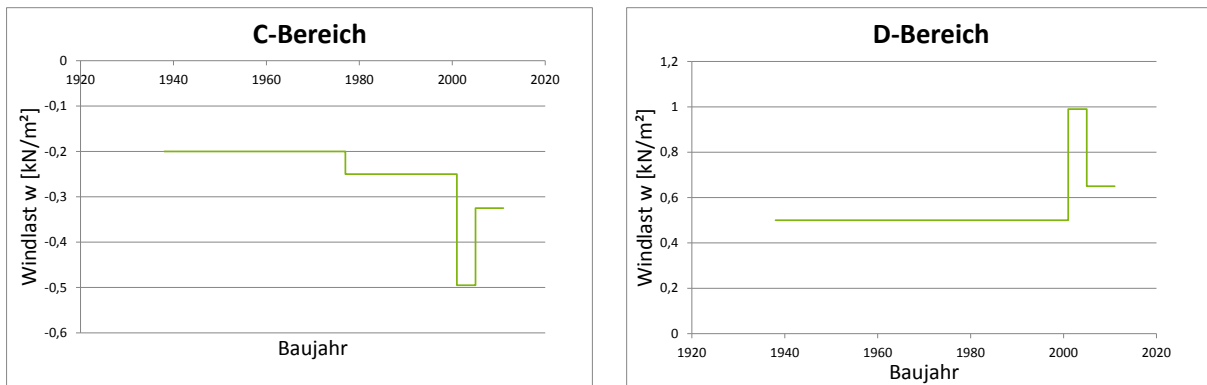


Abbildung 331: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

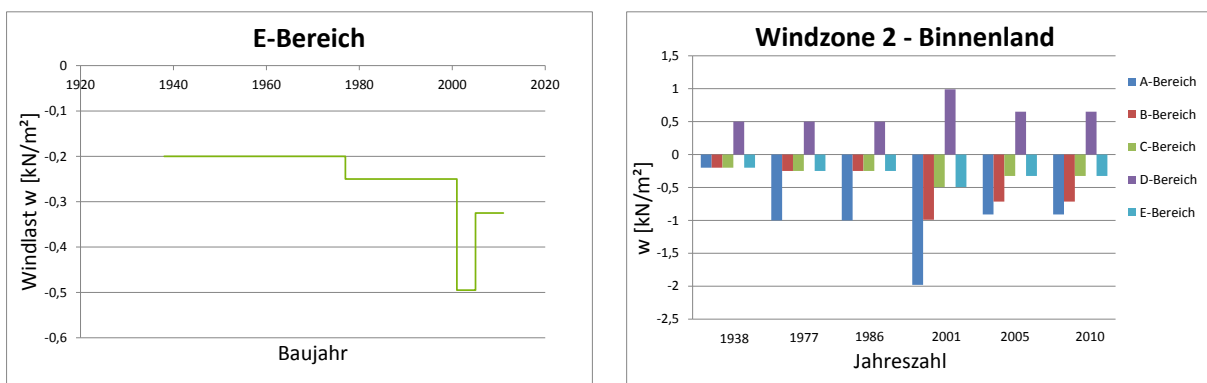


Abbildung 332: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.11 Halle B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

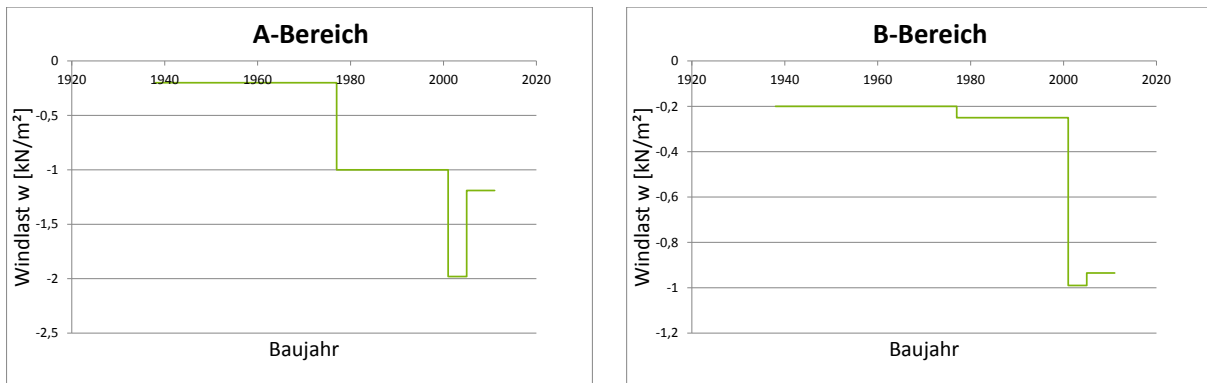


Abbildung 333: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

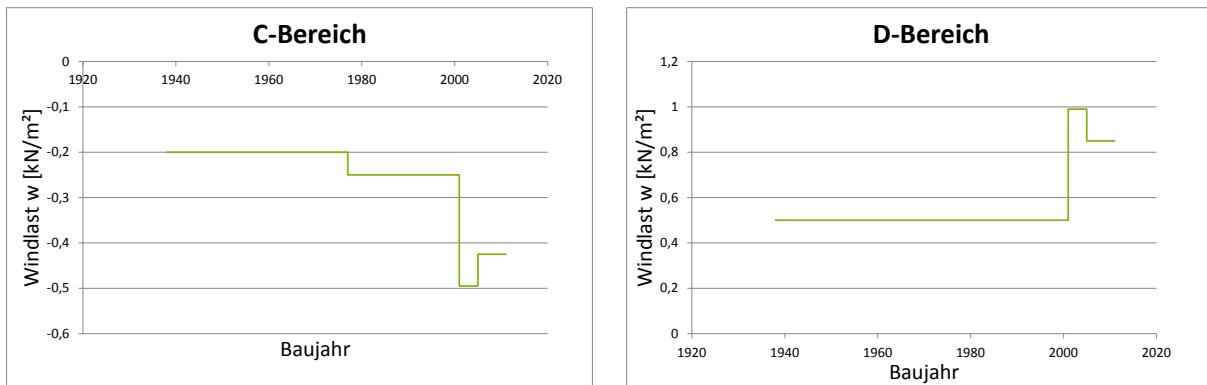


Abbildung 334: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

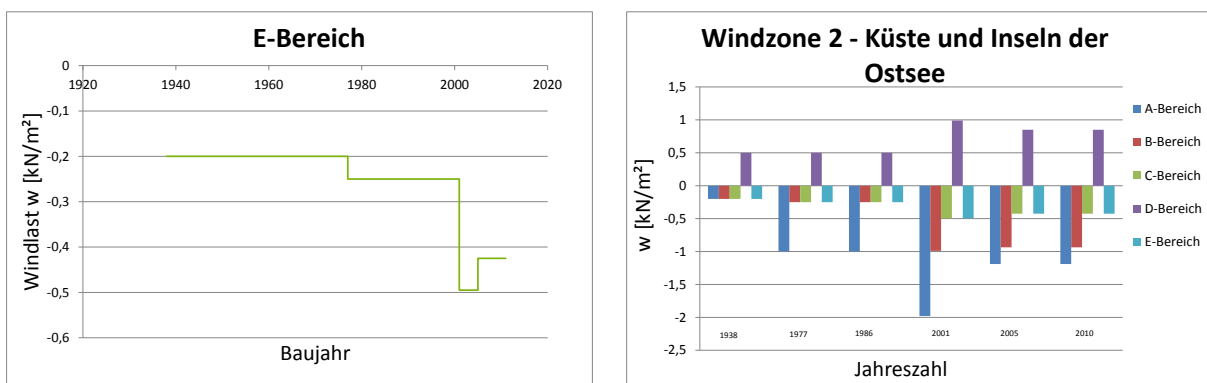


Abbildung 335: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.12 Halle B in der Windzone 3 Binnenland

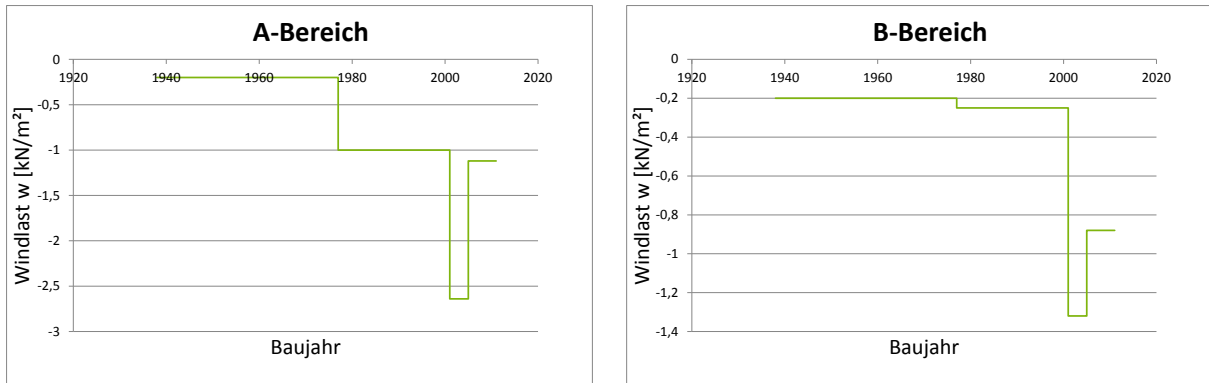


Abbildung 336: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

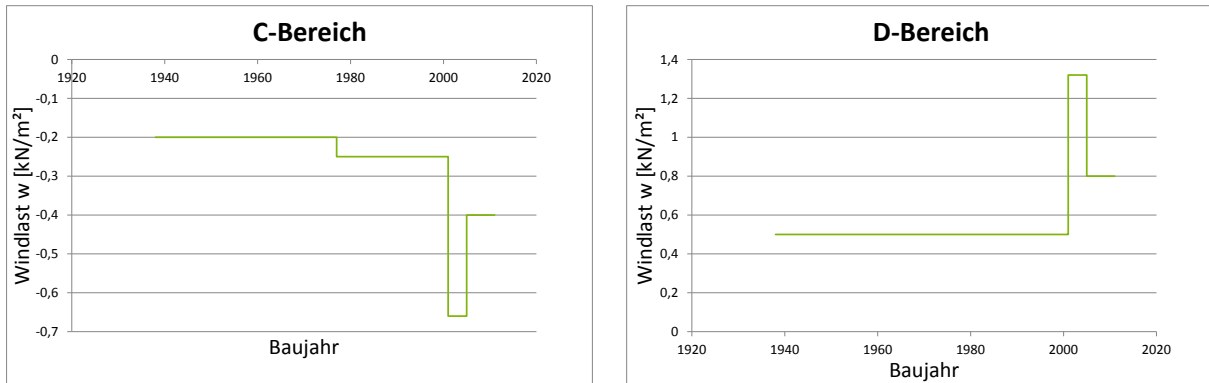


Abbildung 337: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

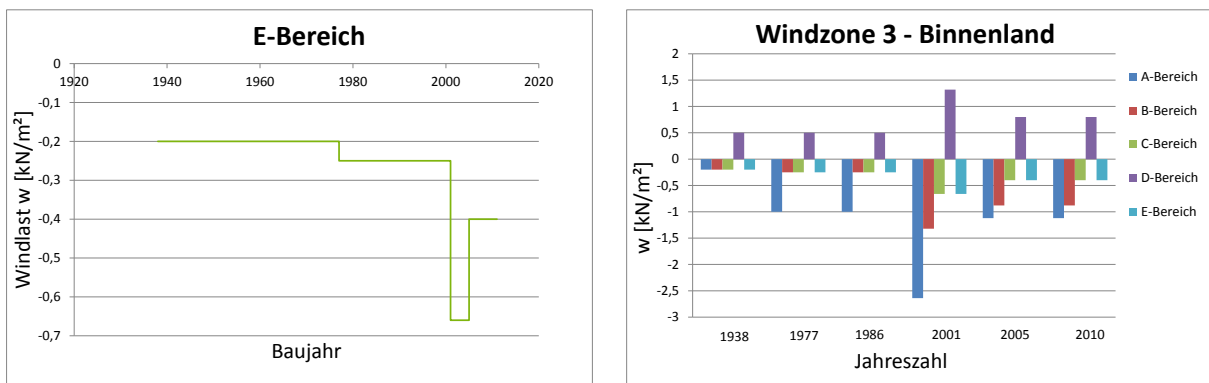


Abbildung 338: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.13 Halle B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

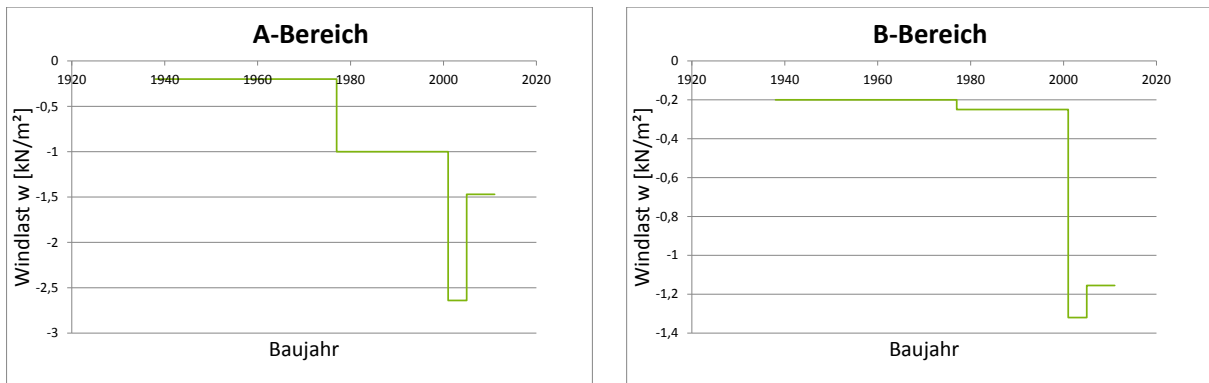


Abbildung 339: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

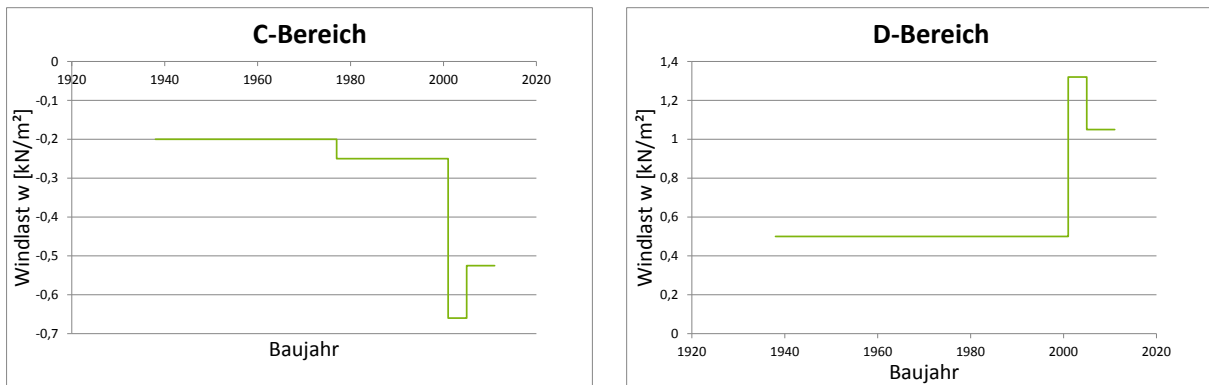


Abbildung 340: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

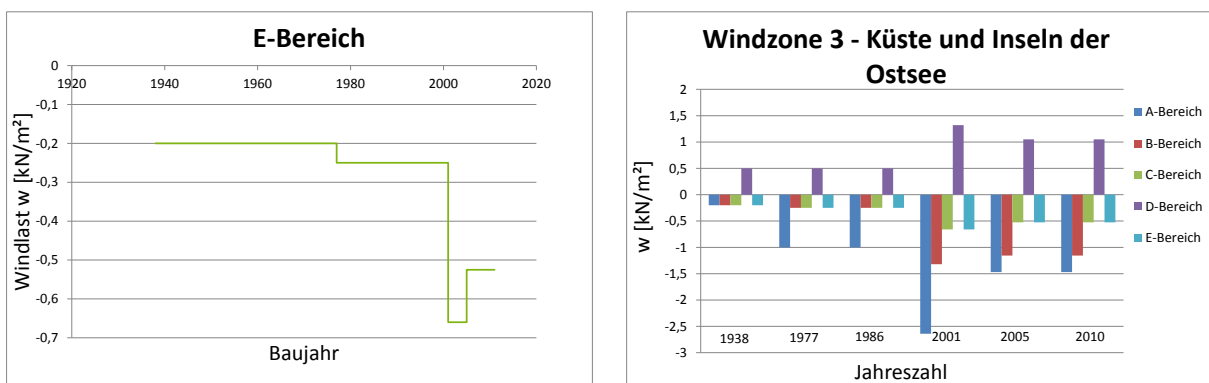


Abbildung 341: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.14 Halle B in der Windzone 4 Binnenland

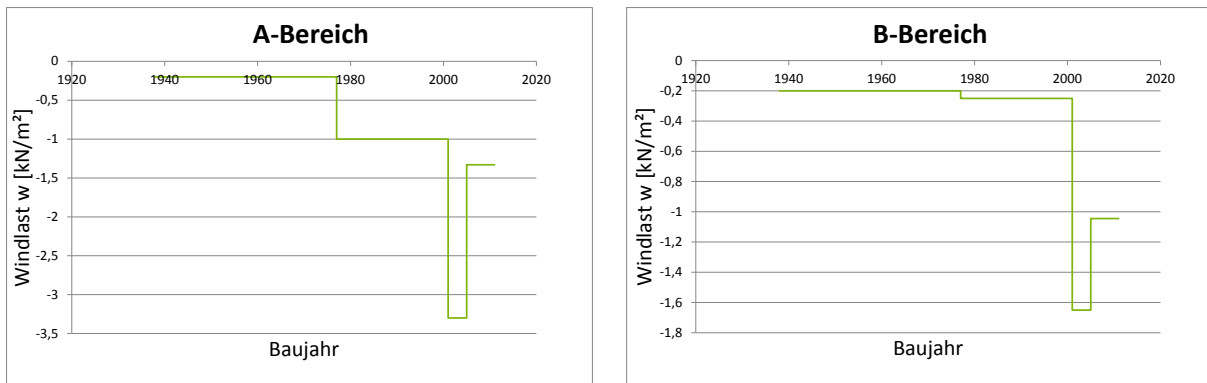


Abbildung 342: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

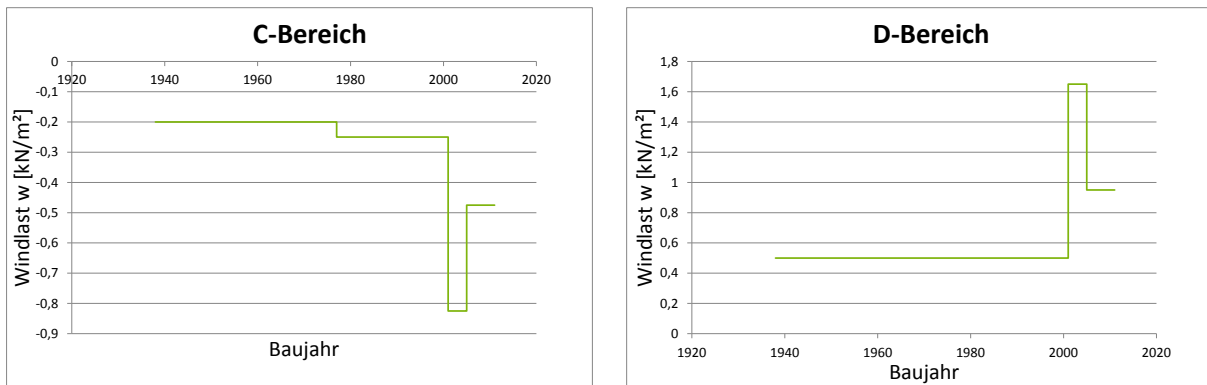


Abbildung 343: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

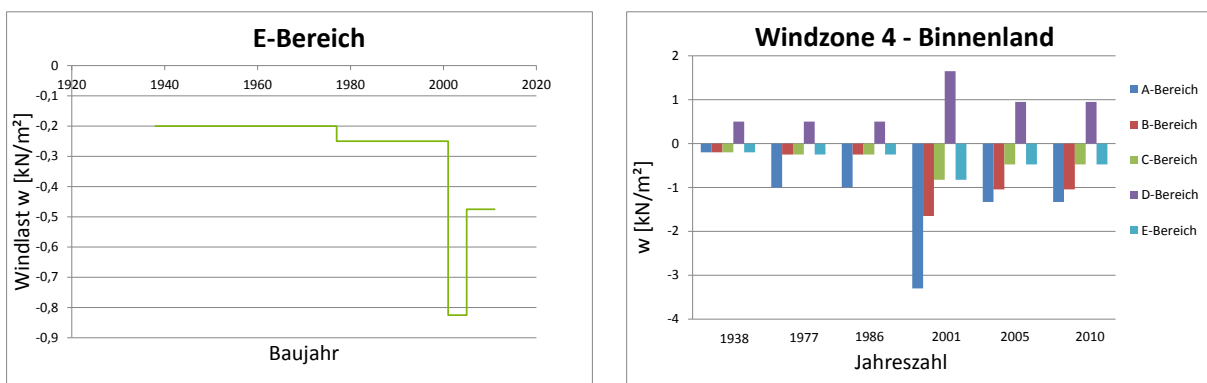


Abbildung 344: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.15 Halle B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

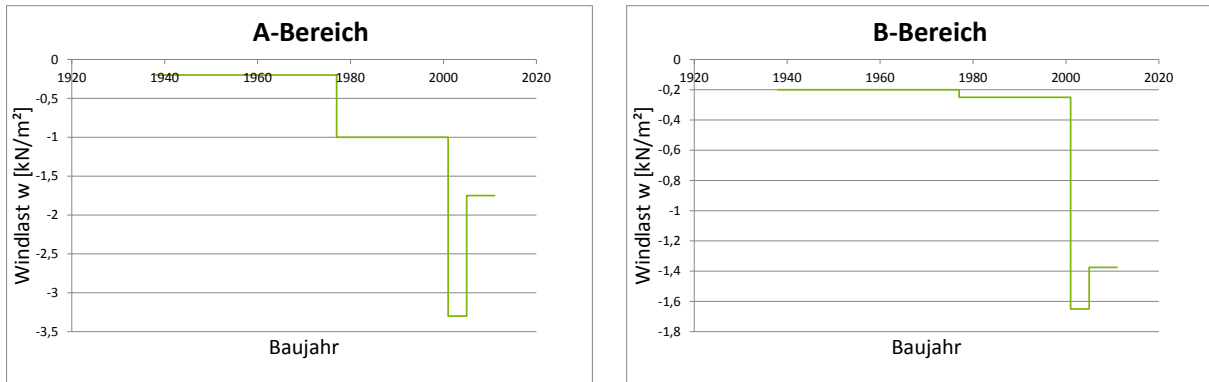


Abbildung 345: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

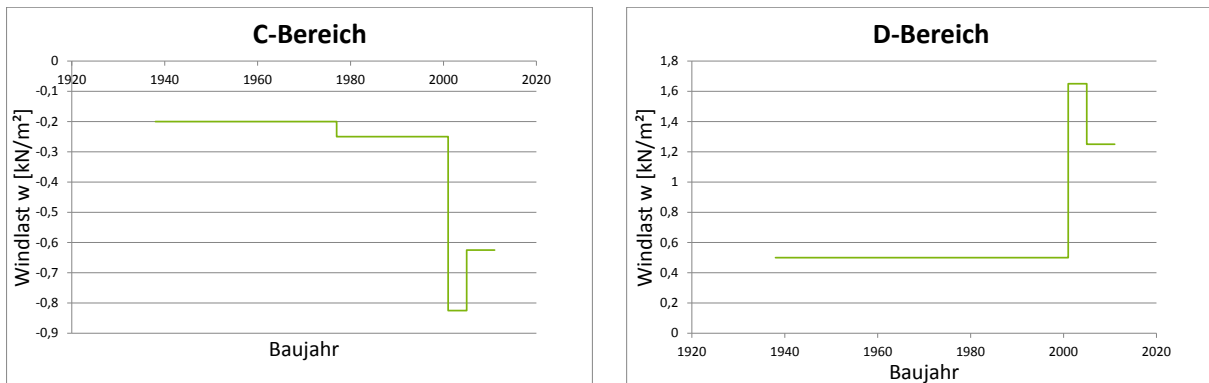


Abbildung 346: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

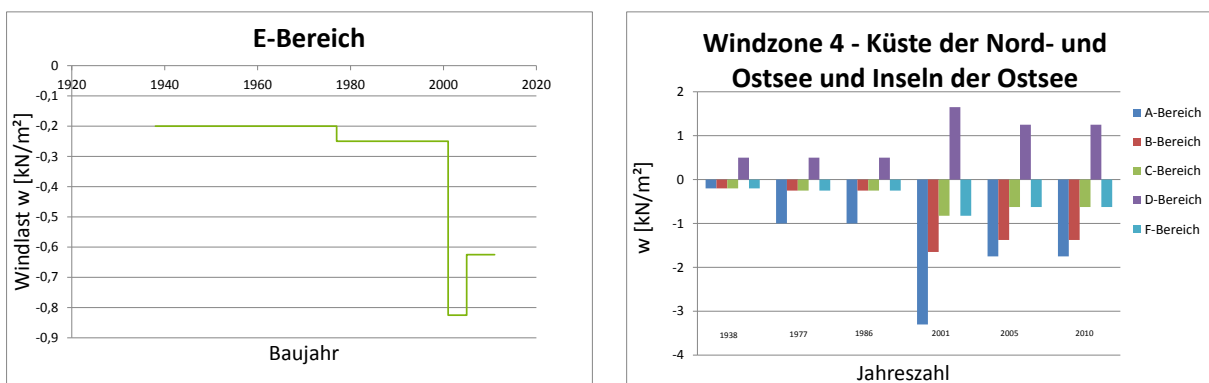


Abbildung 347: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.16 Halle B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

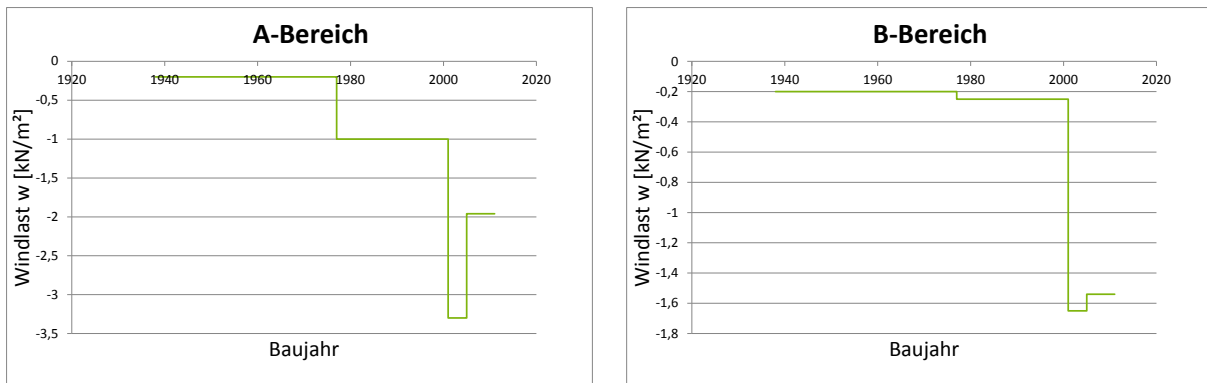


Abbildung 348: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

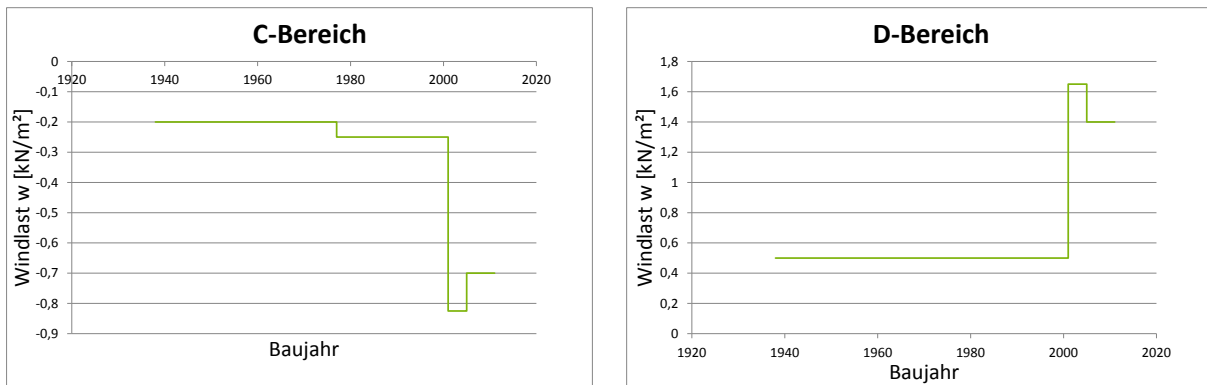


Abbildung 349: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

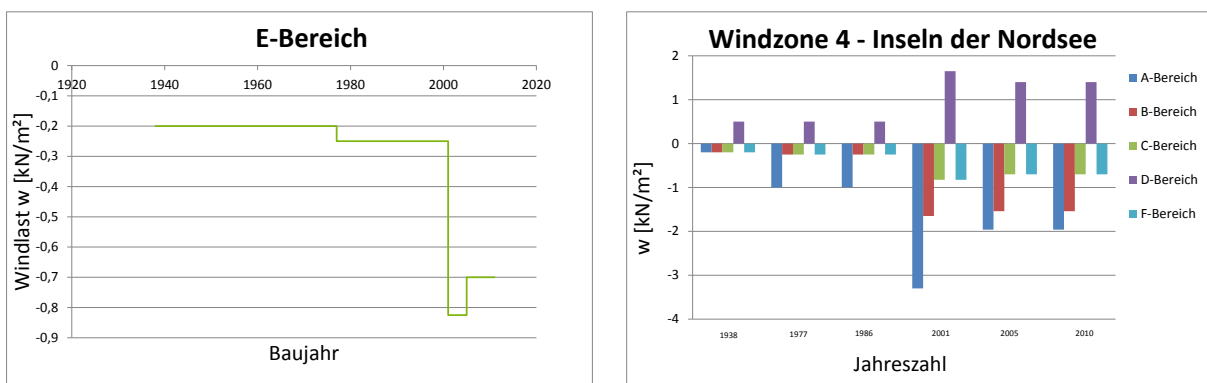


Abbildung 350: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.5.17 Halle C in der Windzone 1 Binnenland

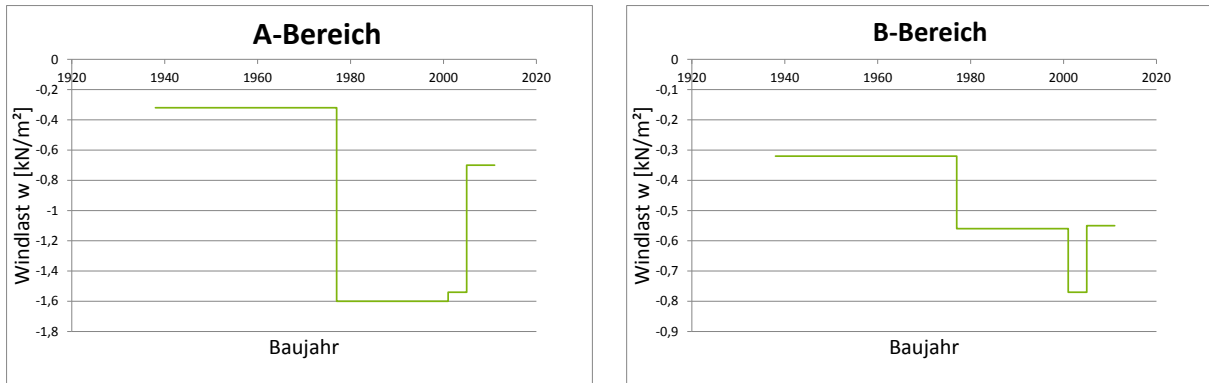


Abbildung 351: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

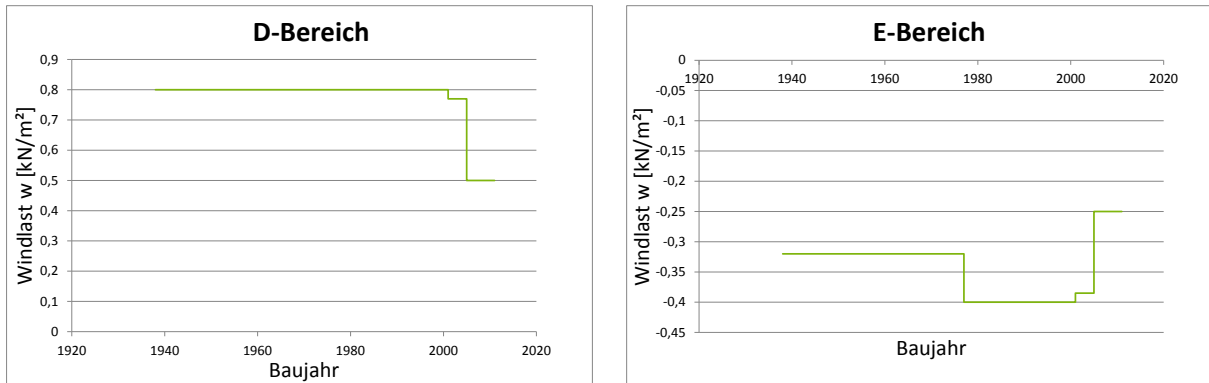


Abbildung 352: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

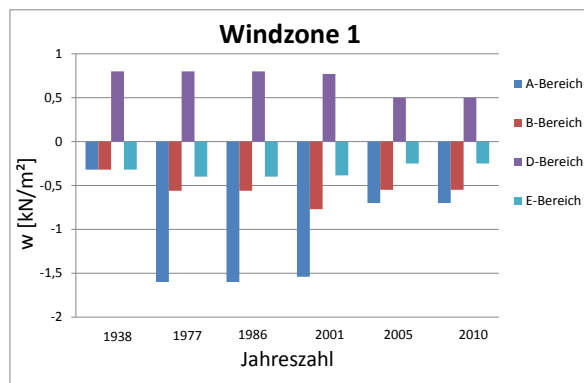


Abbildung 353: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.18 Halle C in der Windzone 2 Binnenland

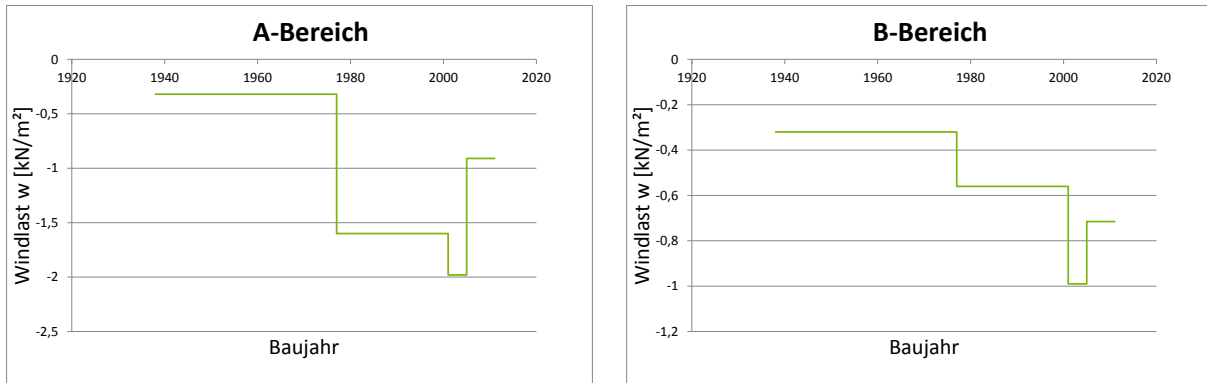


Abbildung 354: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

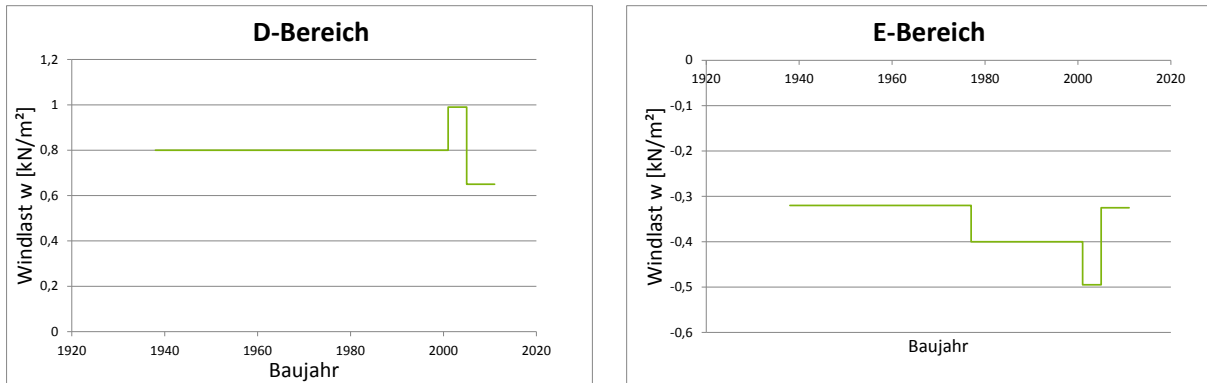


Abbildung 355: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

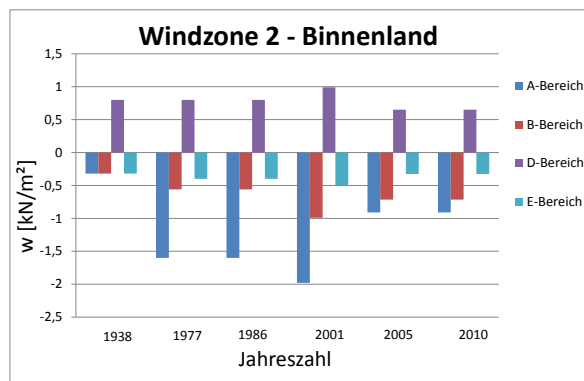


Abbildung 356: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.19 Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

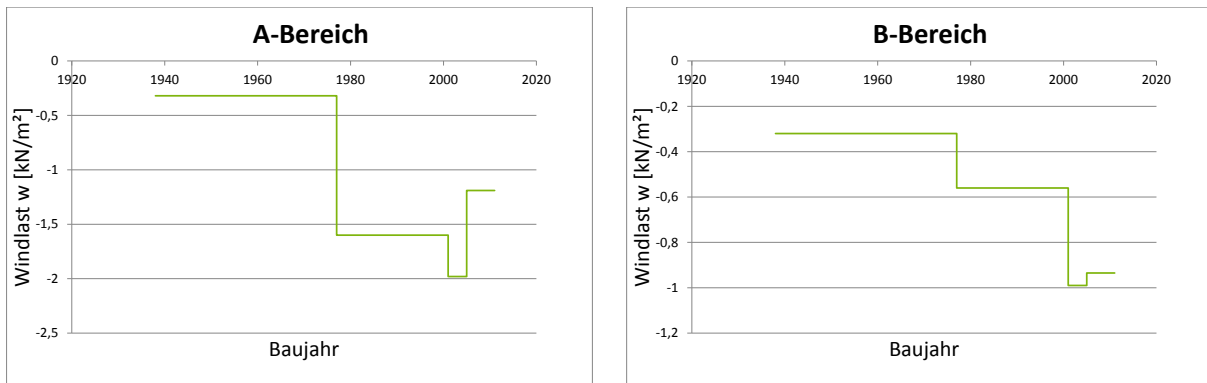


Abbildung 357: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

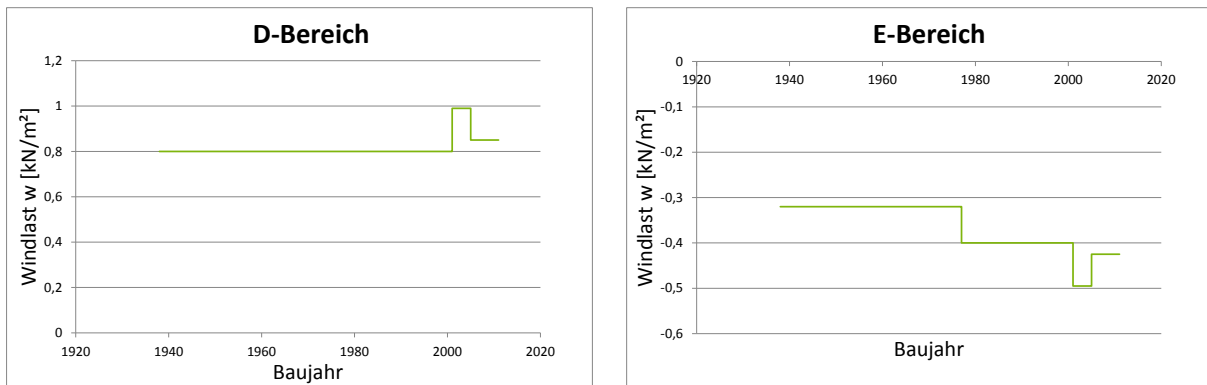


Abbildung 358: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

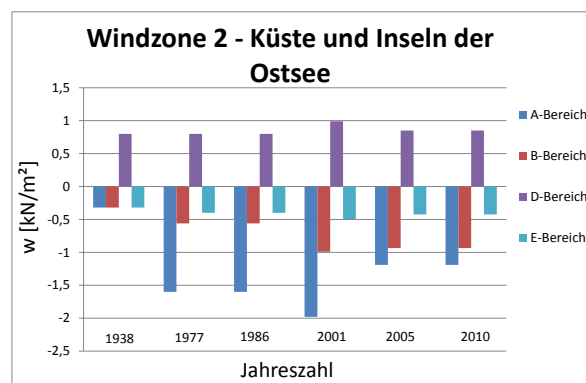


Abbildung 359: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.20 Halle C in der Windzone 3 Binnenland

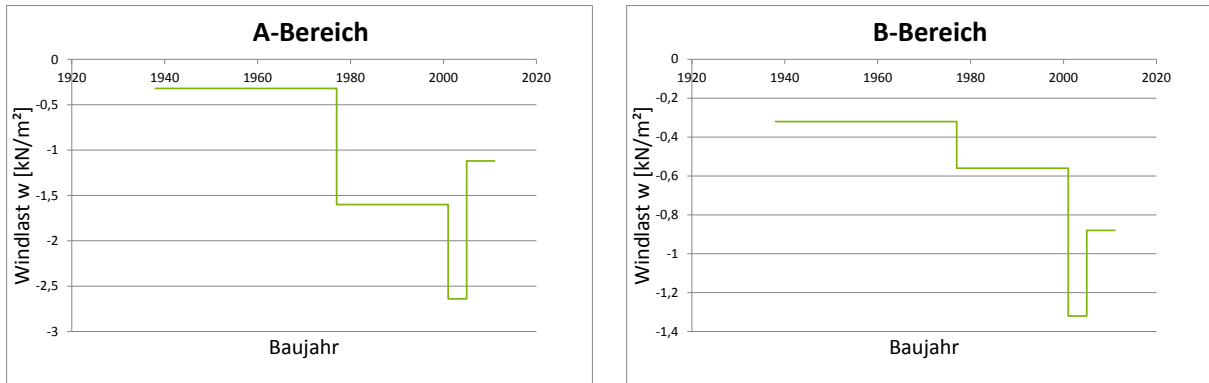


Abbildung 360: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

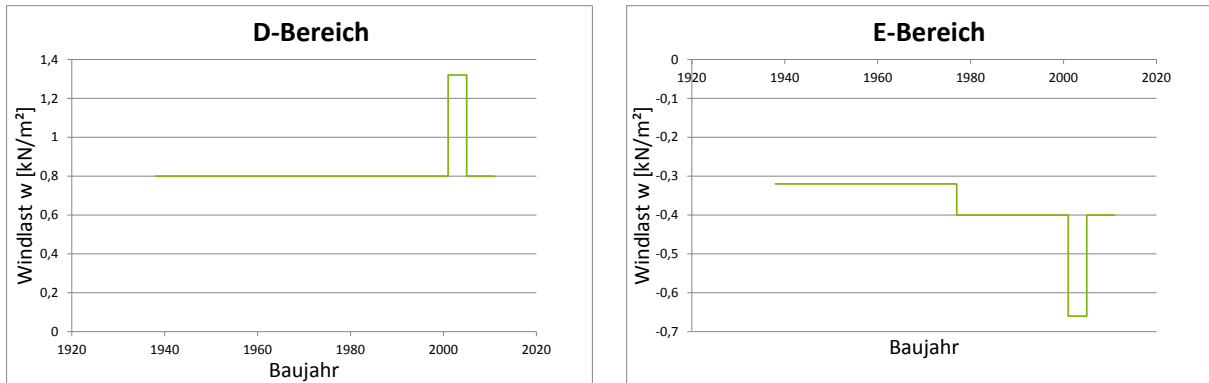


Abbildung 361: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

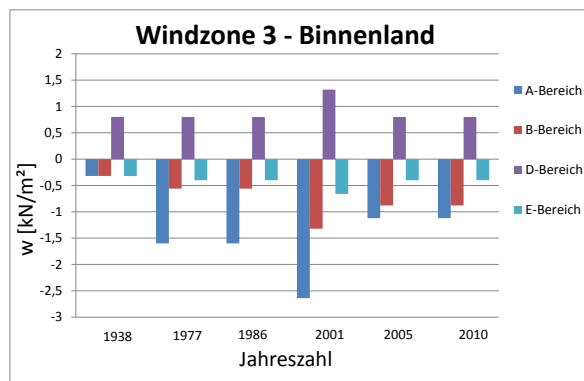


Abbildung 362: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.21 Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

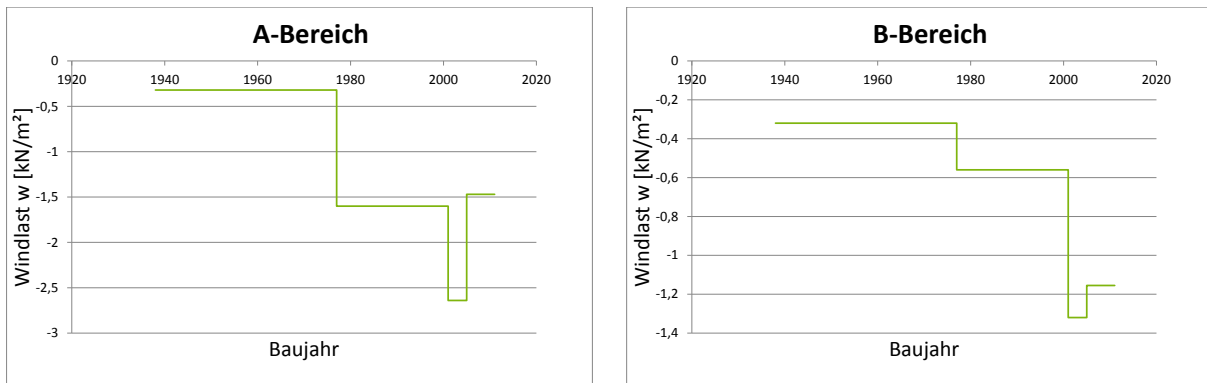


Abbildung 363: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

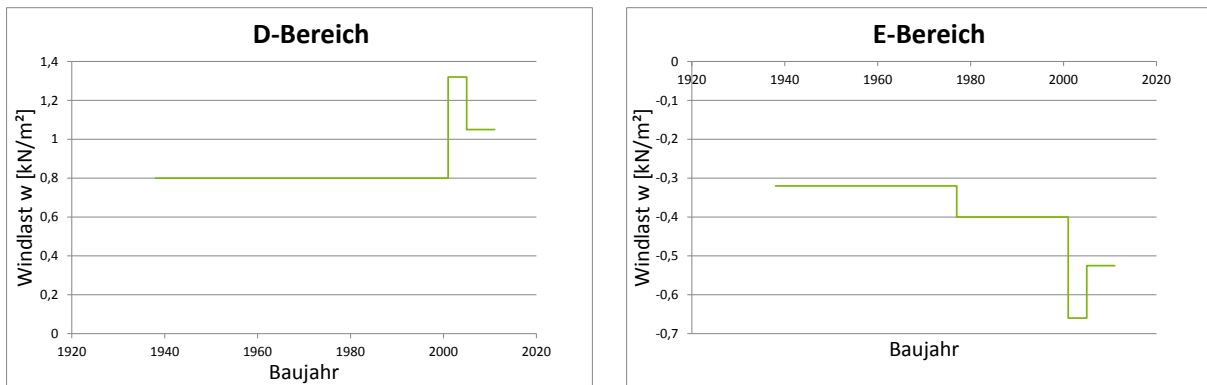


Abbildung 364: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

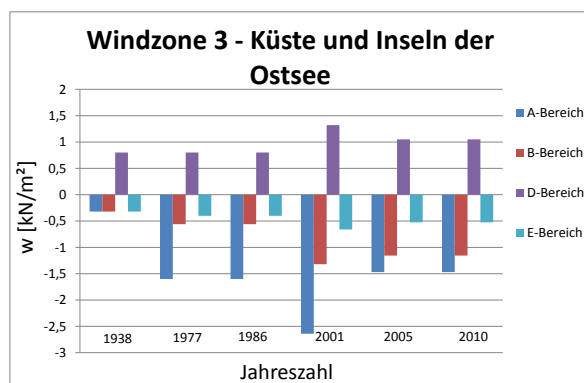


Abbildung 365: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.22 Halle C in der Windzone 4 Binnenland

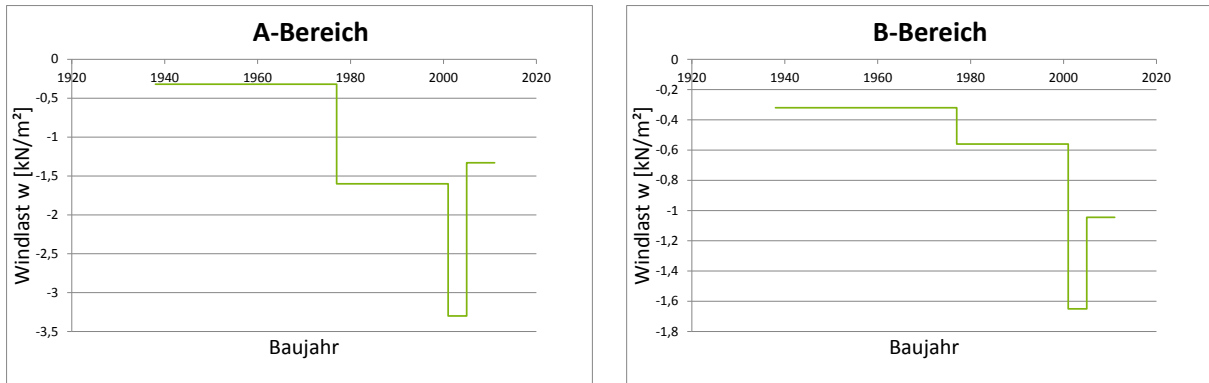


Abbildung 366: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

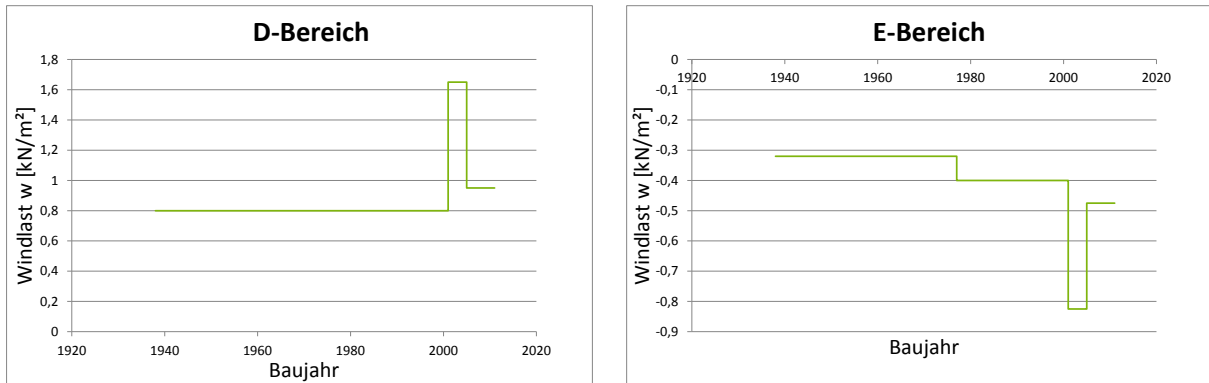


Abbildung 367: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

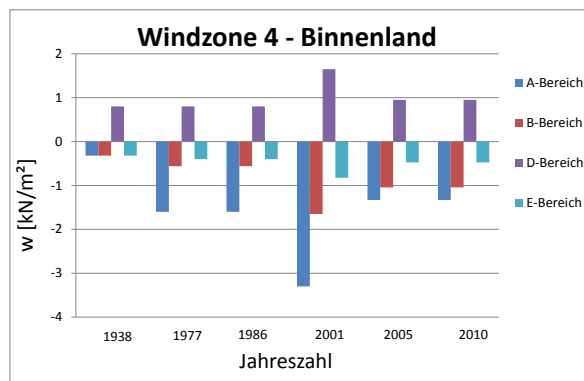


Abbildung 368: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.23 Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

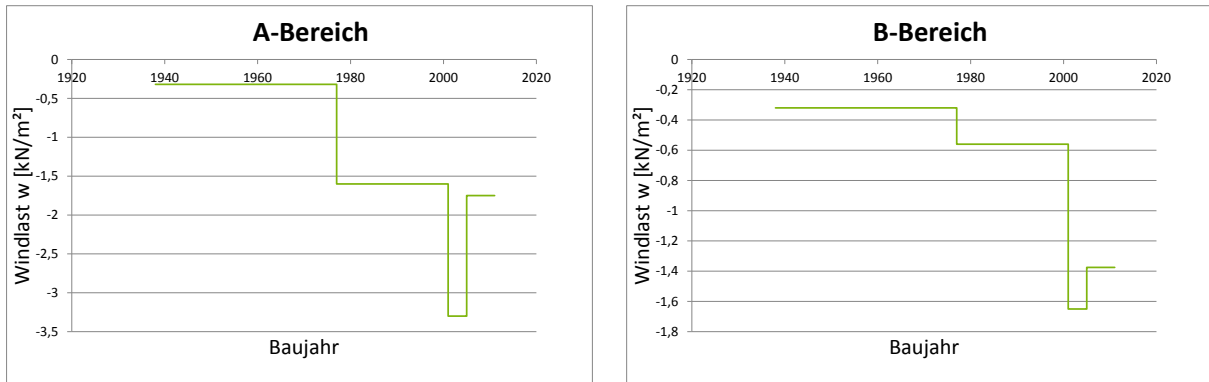


Abbildung 369: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

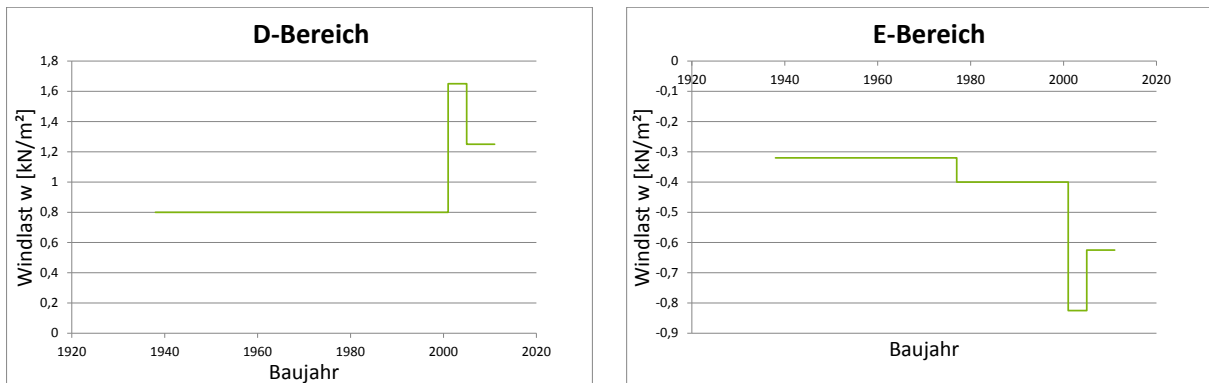


Abbildung 370: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

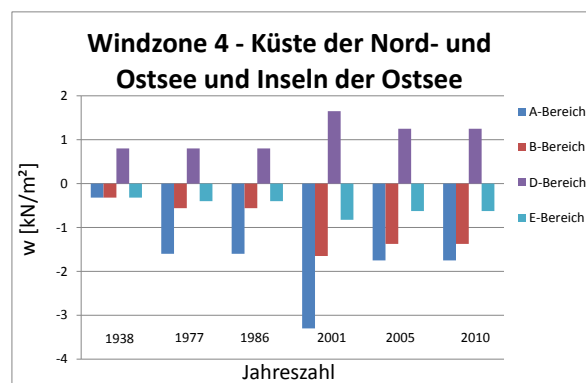


Abbildung 371: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.5.24 Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

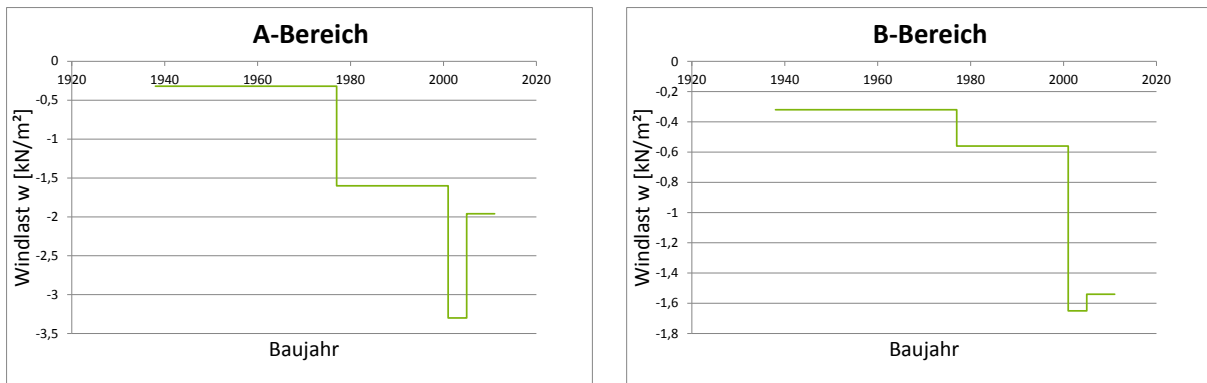


Abbildung 372: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

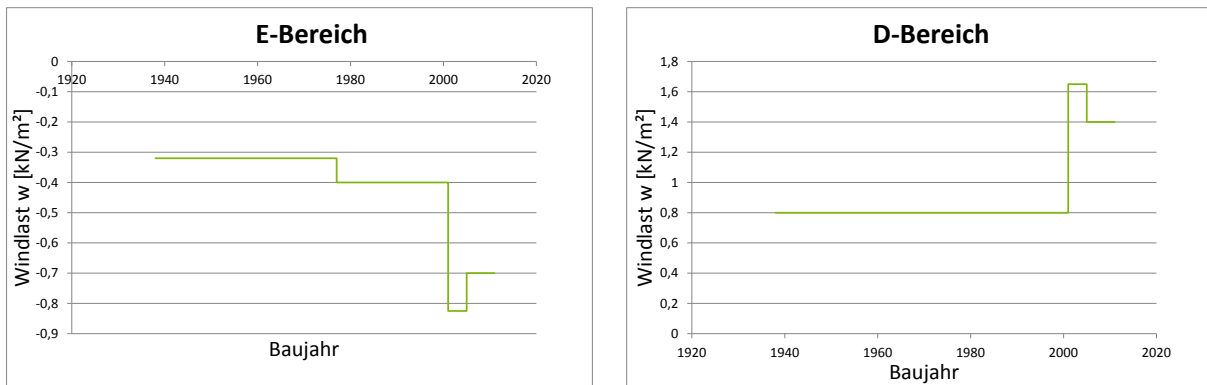


Abbildung 373: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

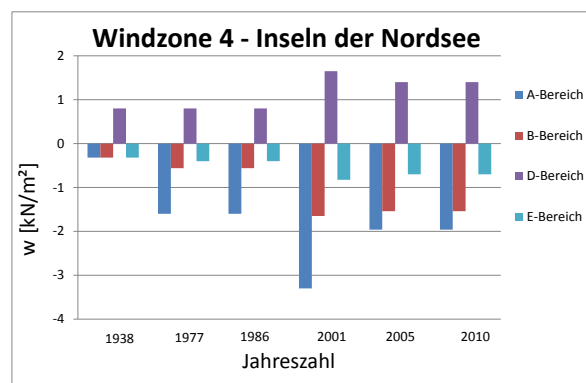


Abbildung 374: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6 Windlast auf Wände für die lokale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010

5.6.1 Halle A (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

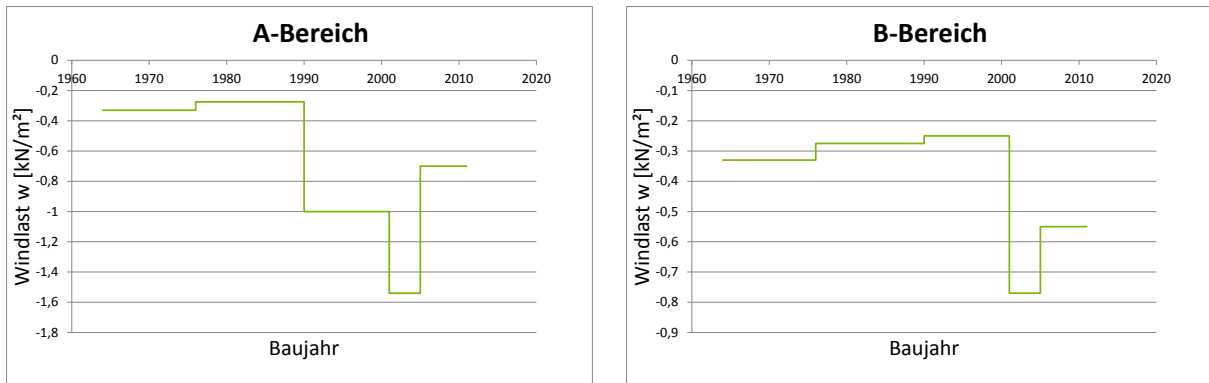


Abbildung 375: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

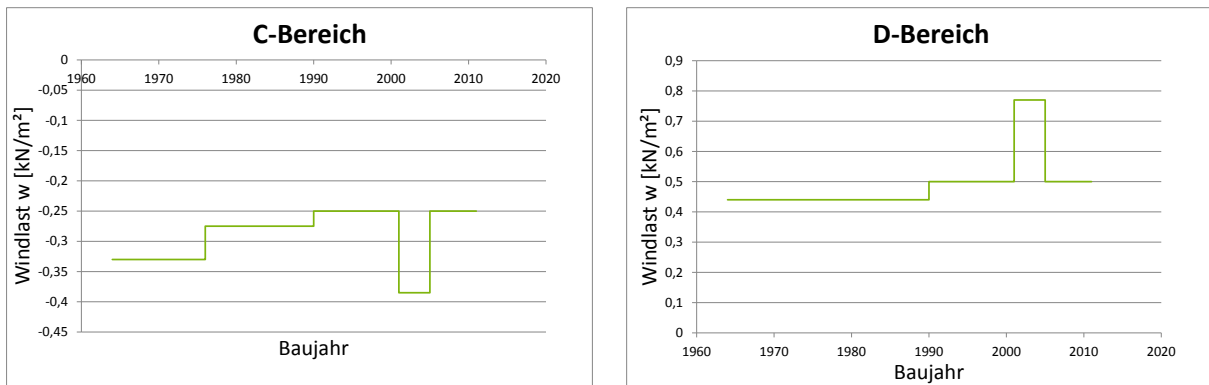


Abbildung 376: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

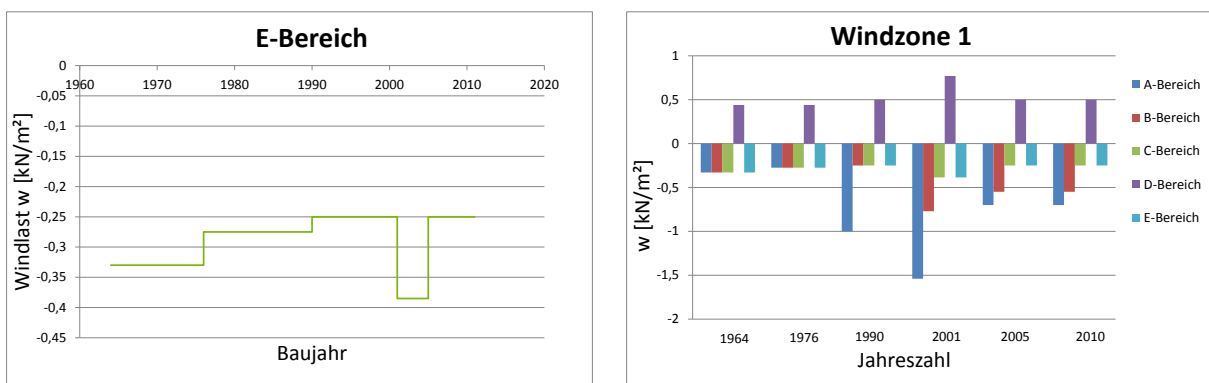


Abbildung 377: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.2 Halle A (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

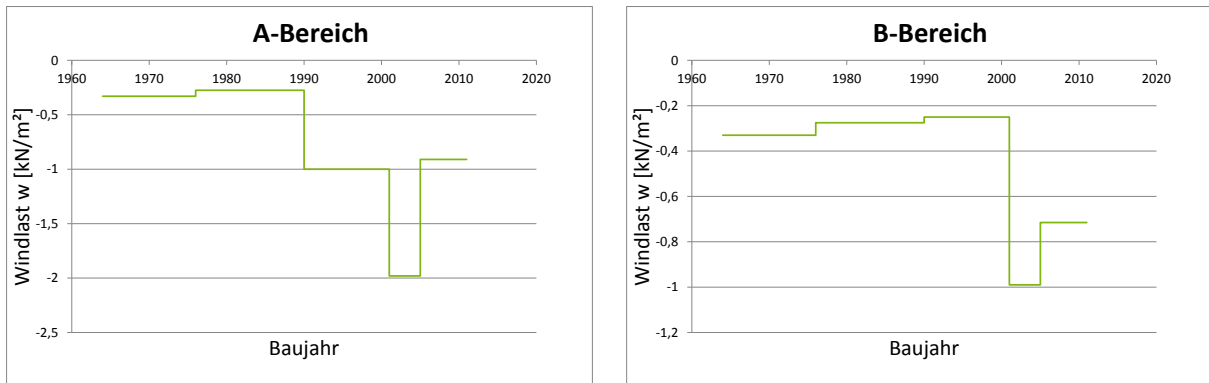


Abbildung 378: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

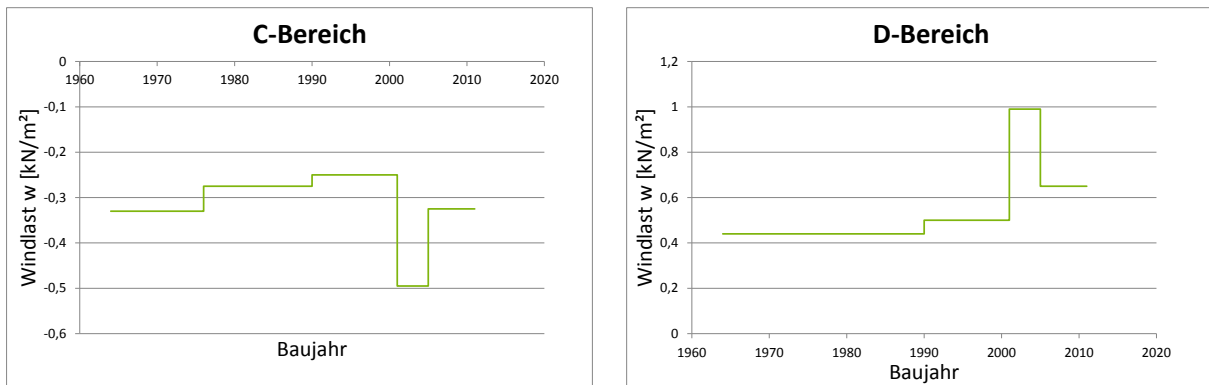


Abbildung 379: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

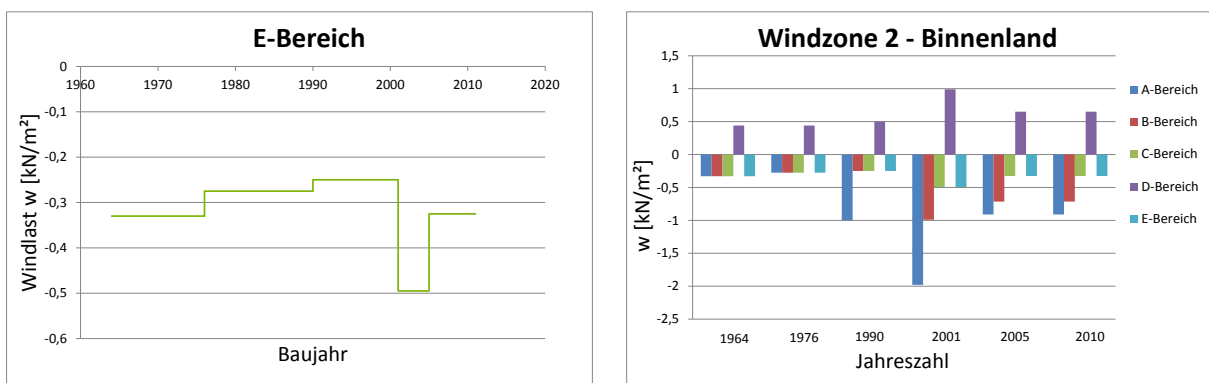


Abbildung 380: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.3 Halle A (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

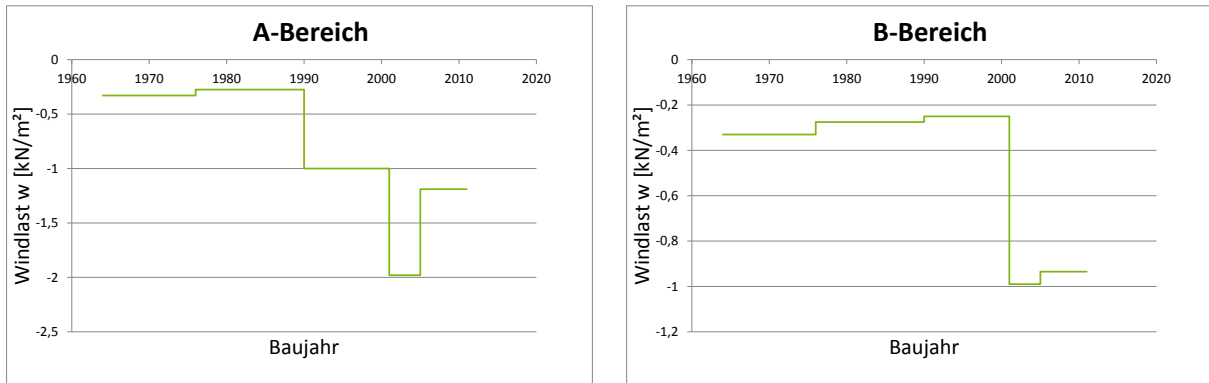


Abbildung 381: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

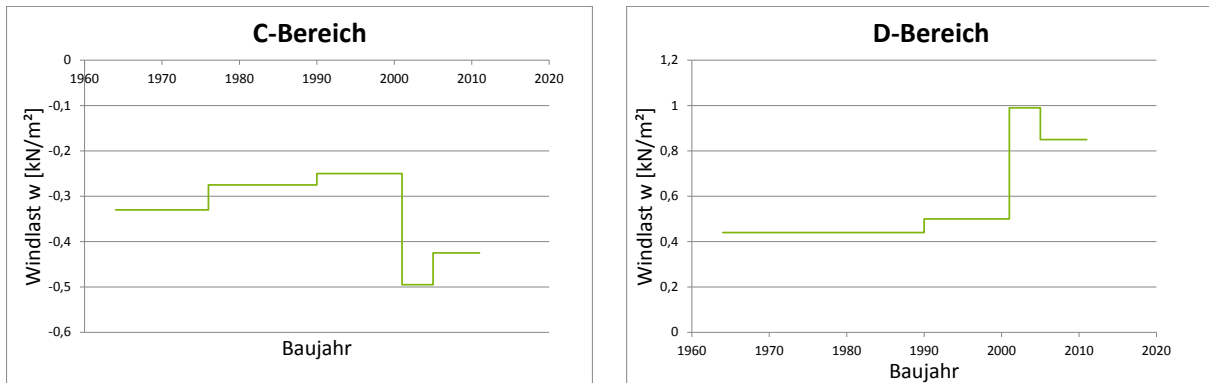


Abbildung 382: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

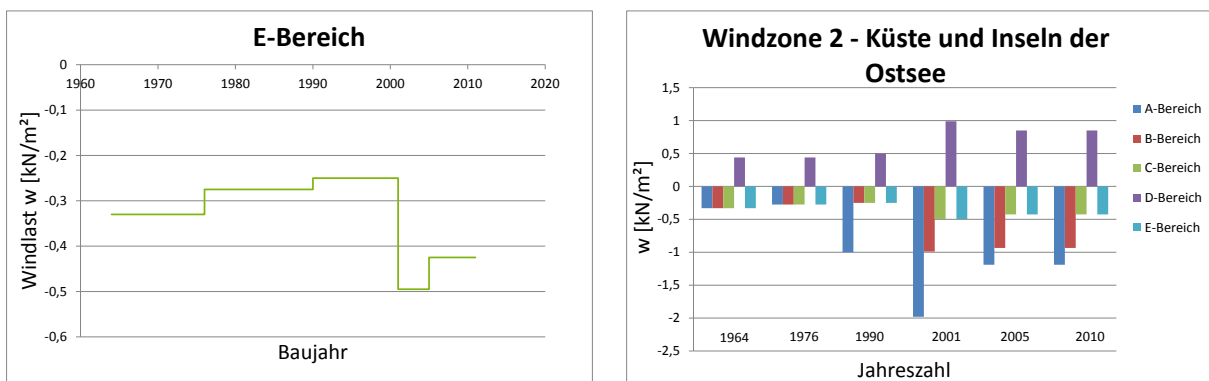


Abbildung 383: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.4 Halle A (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

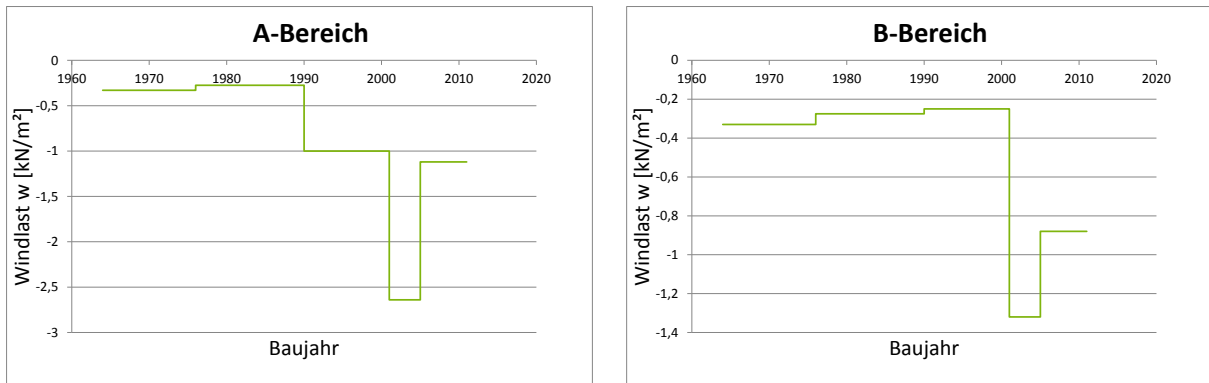


Abbildung 384: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

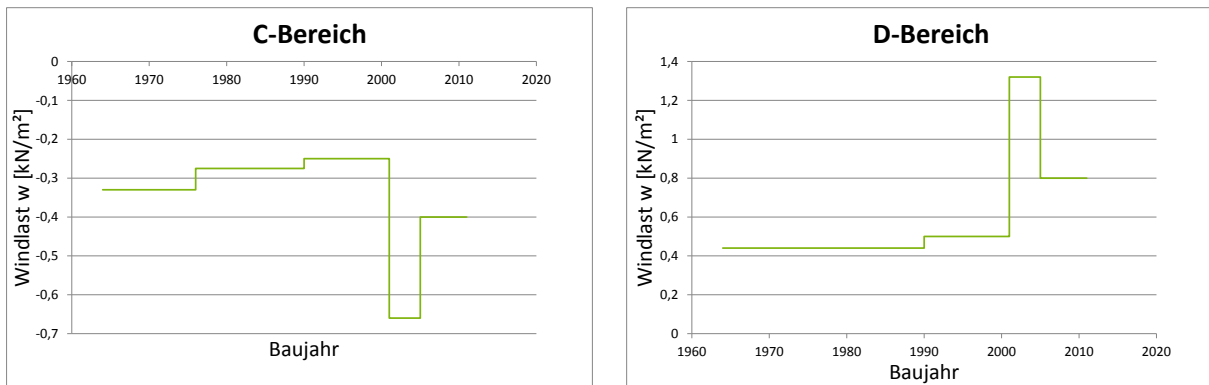


Abbildung 385: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

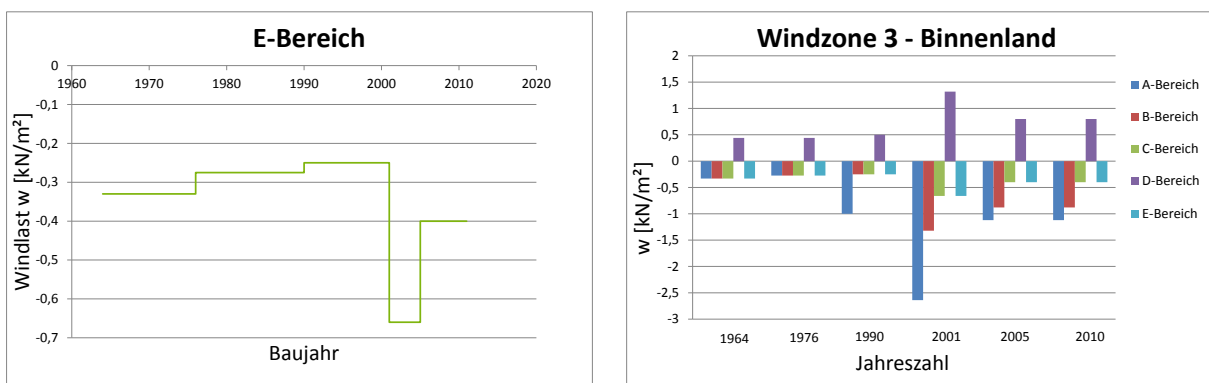


Abbildung 386: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.5 Halle A (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

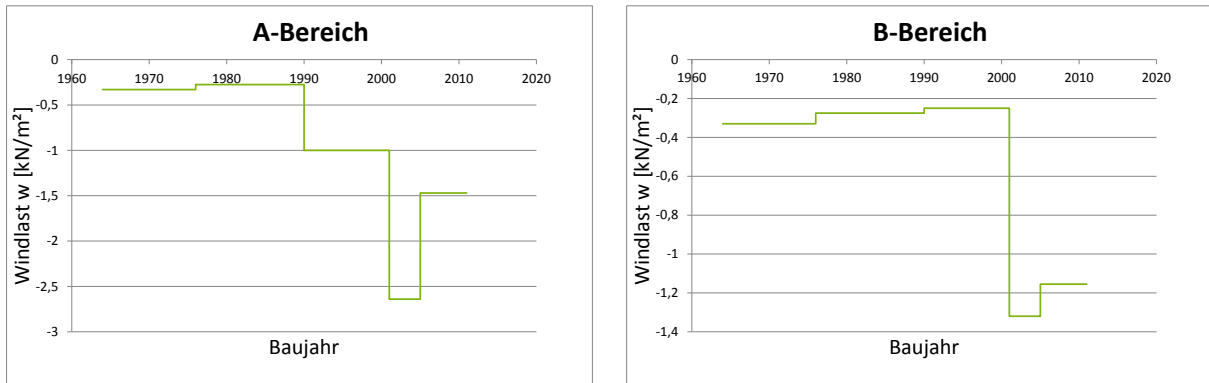


Abbildung 387: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

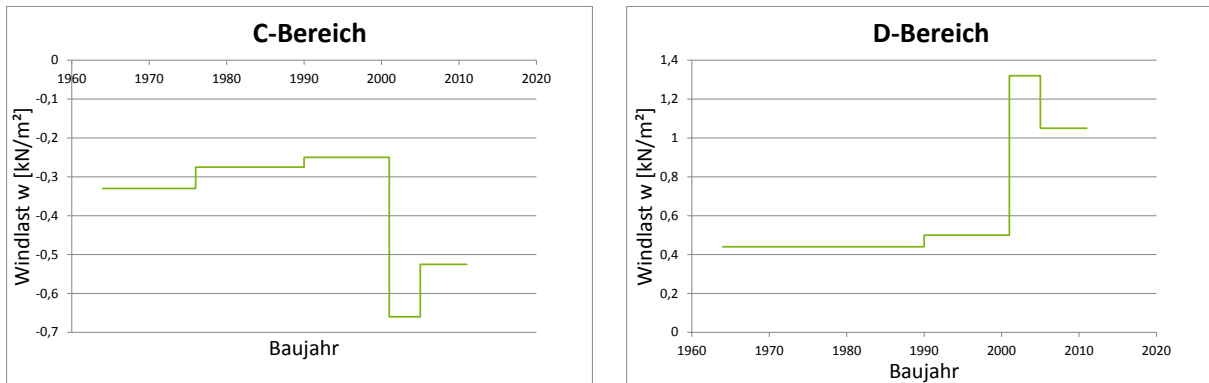


Abbildung 388: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

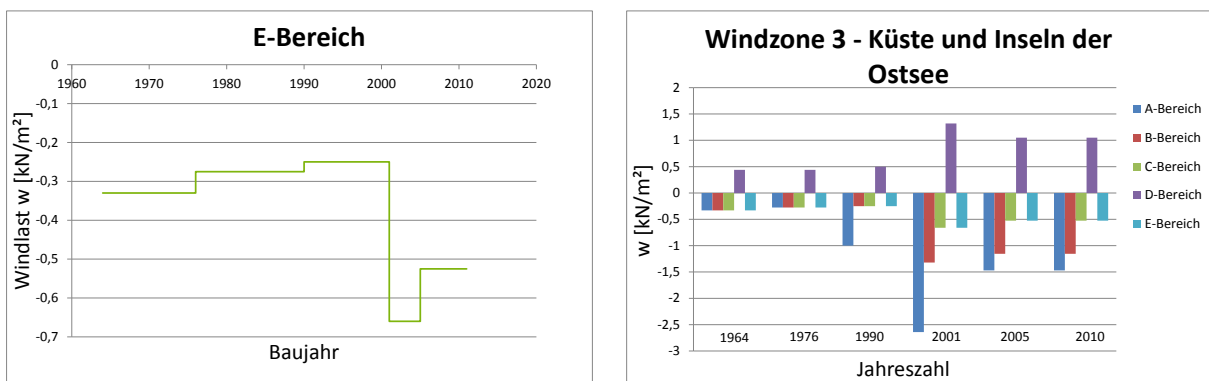


Abbildung 389: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.6 Halle A (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

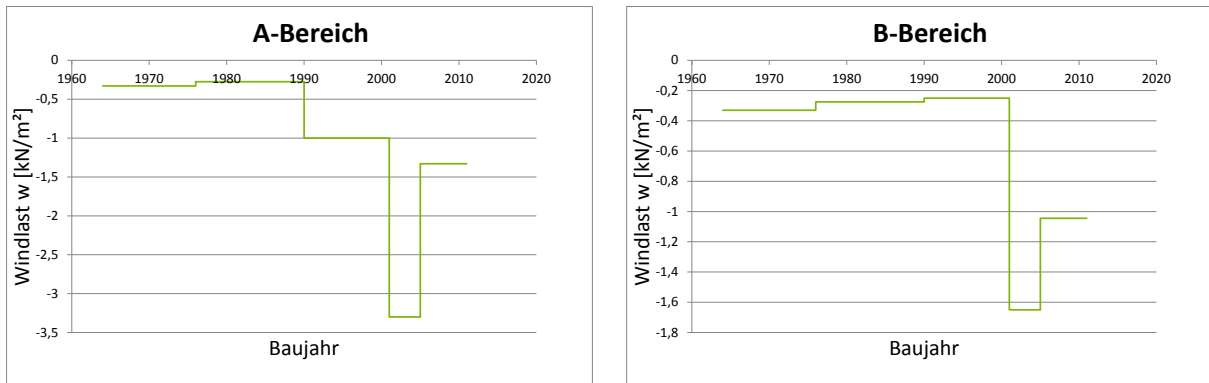


Abbildung 390: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

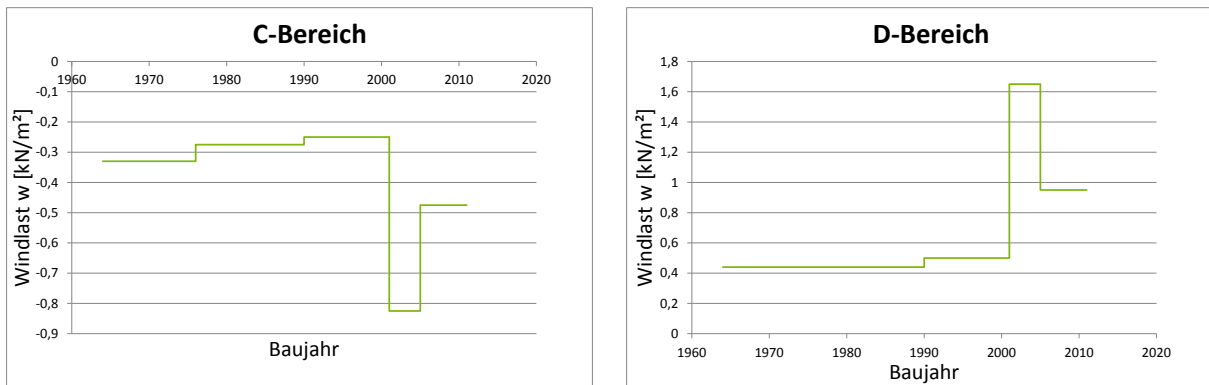


Abbildung 391: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

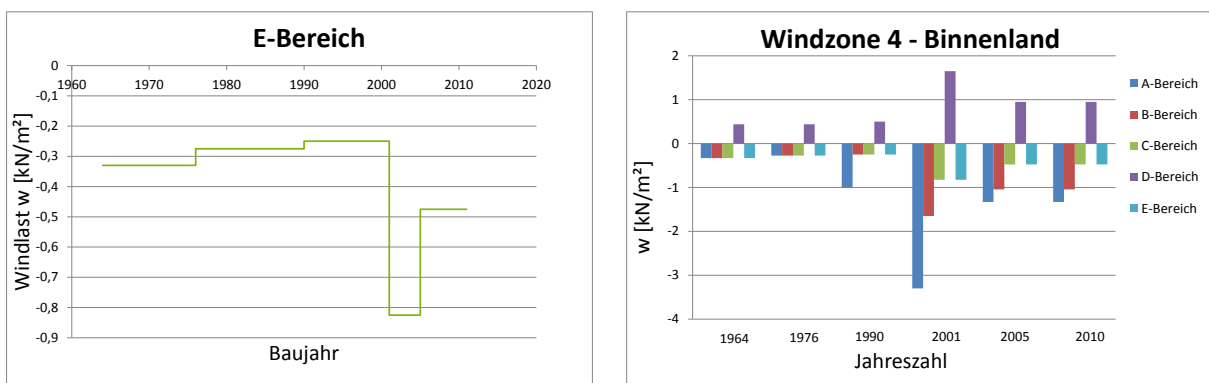


Abbildung 392: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.7 Halle A (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

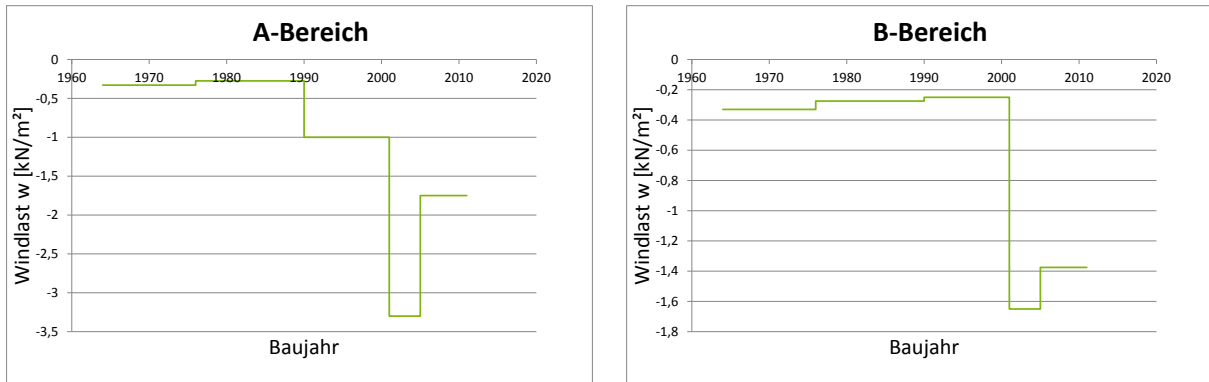


Abbildung 393: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

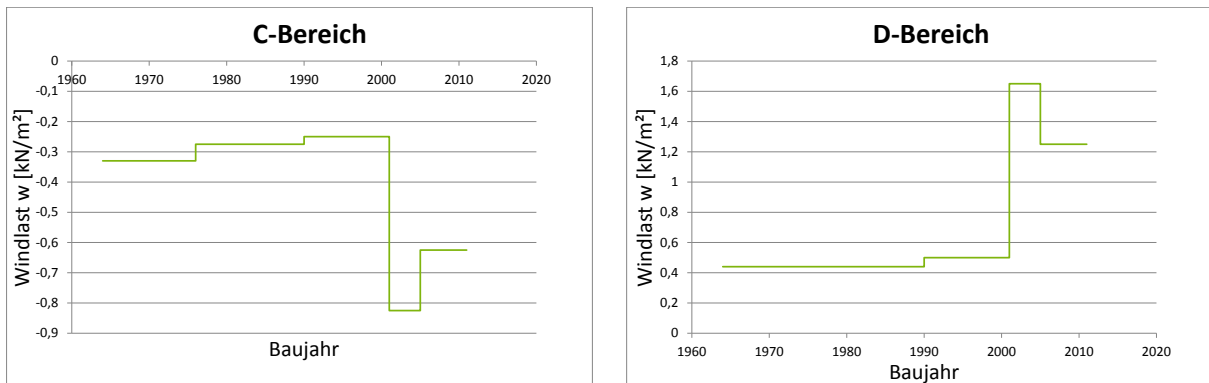


Abbildung 394: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

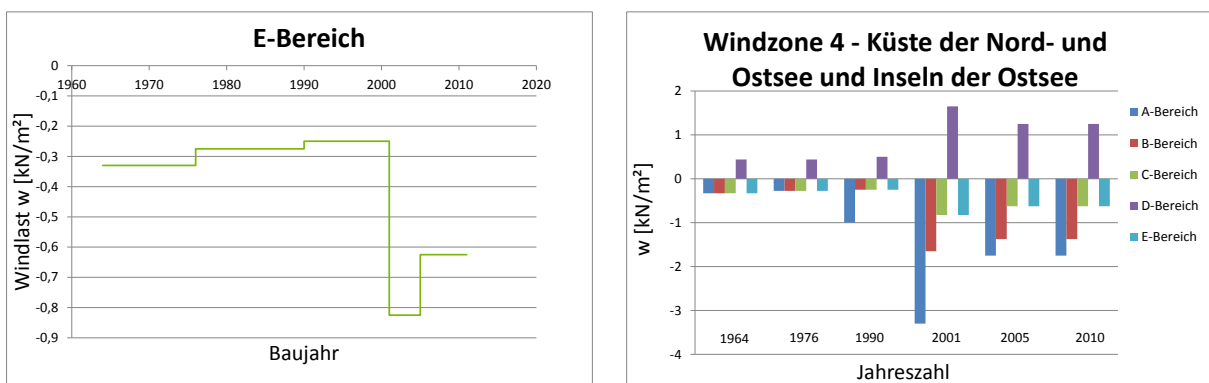


Abbildung 395: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.8 Halle A (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

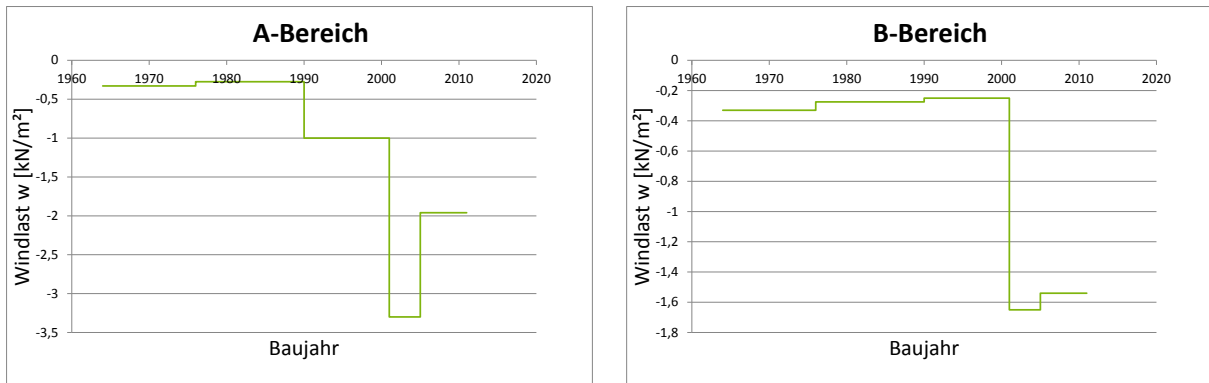


Abbildung 396: Halle A. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

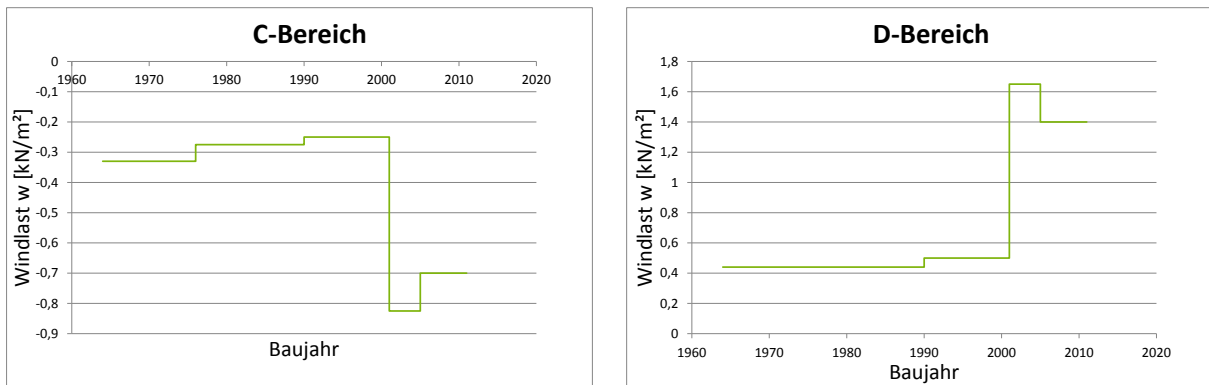


Abbildung 397: Halle A. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

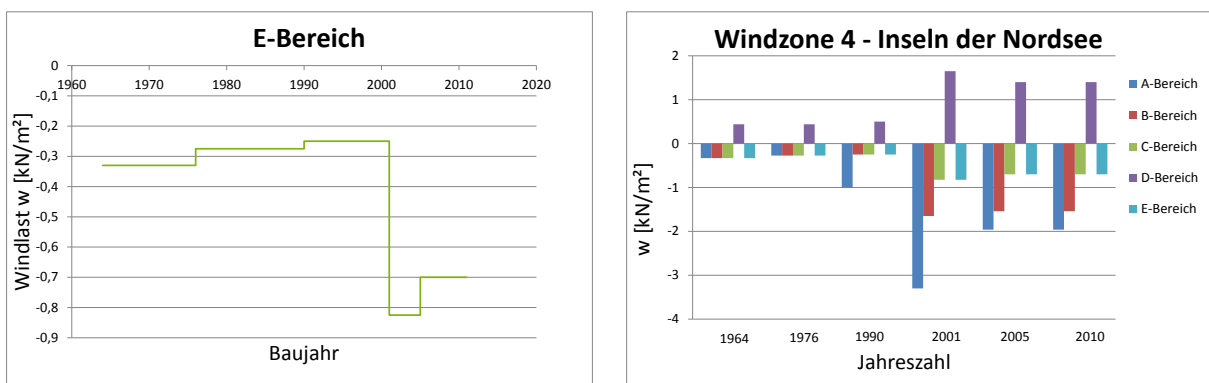


Abbildung 398: Halle A. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.9 Halle B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

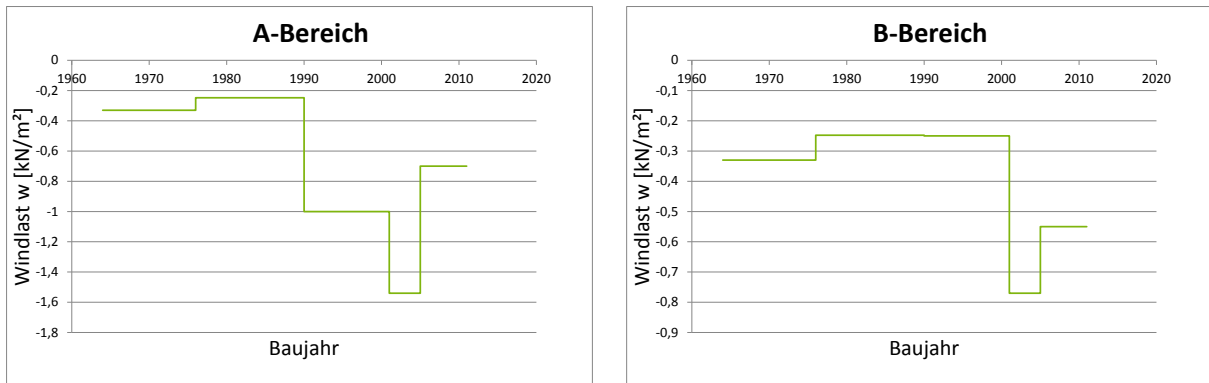


Abbildung 399: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

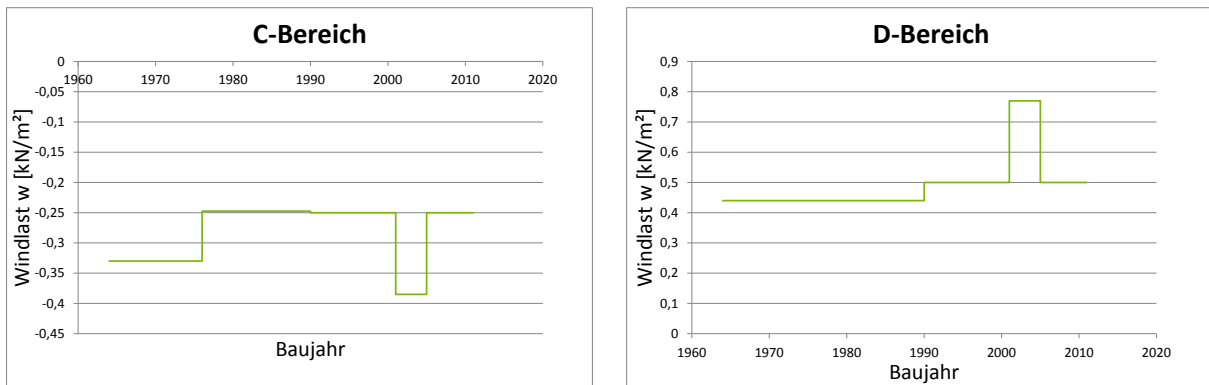


Abbildung 400: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

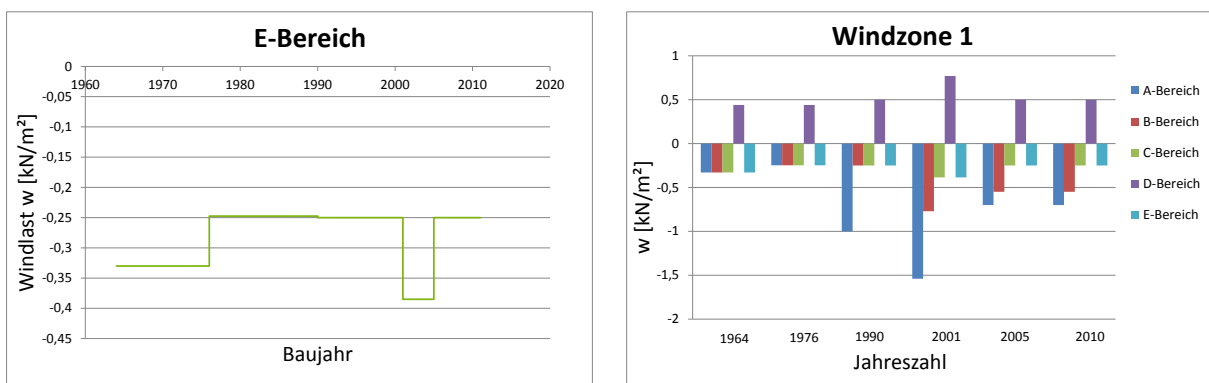


Abbildung 401: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.10 Halle B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

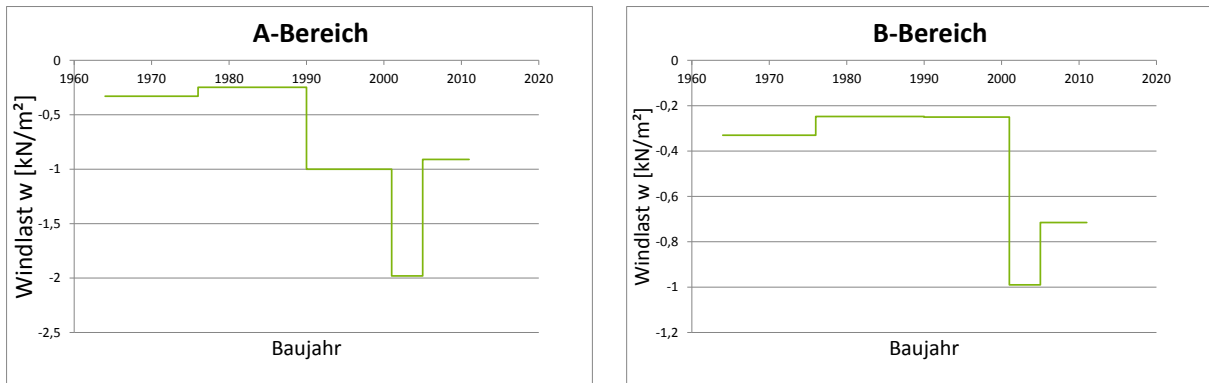


Abbildung 402: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

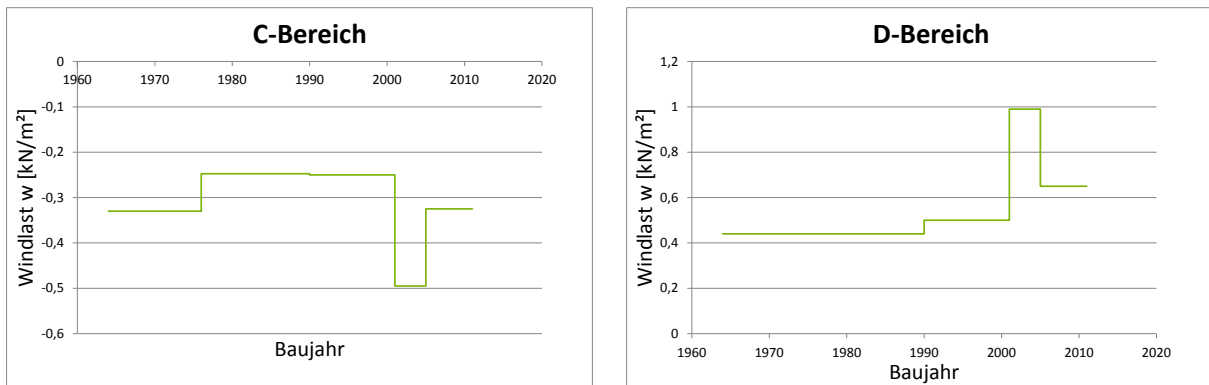


Abbildung 403: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

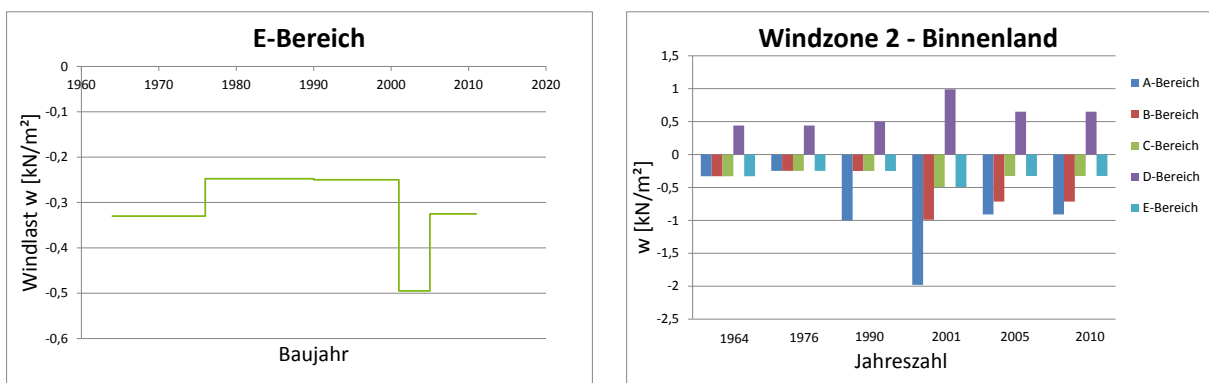


Abbildung 404: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.11 Halle B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

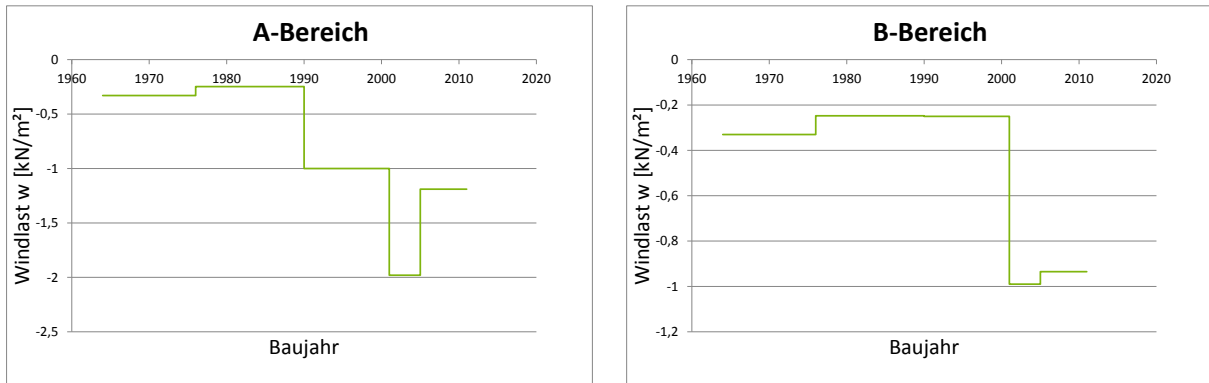


Abbildung 405: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

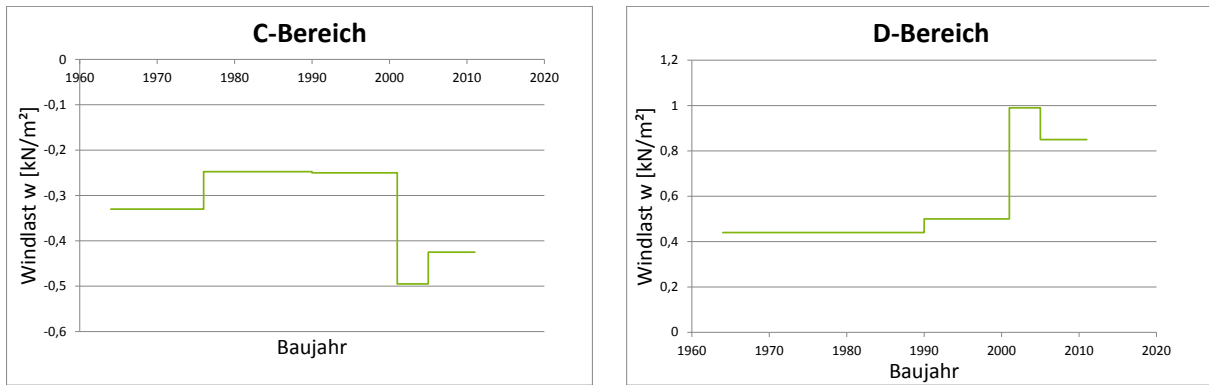


Abbildung 406: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

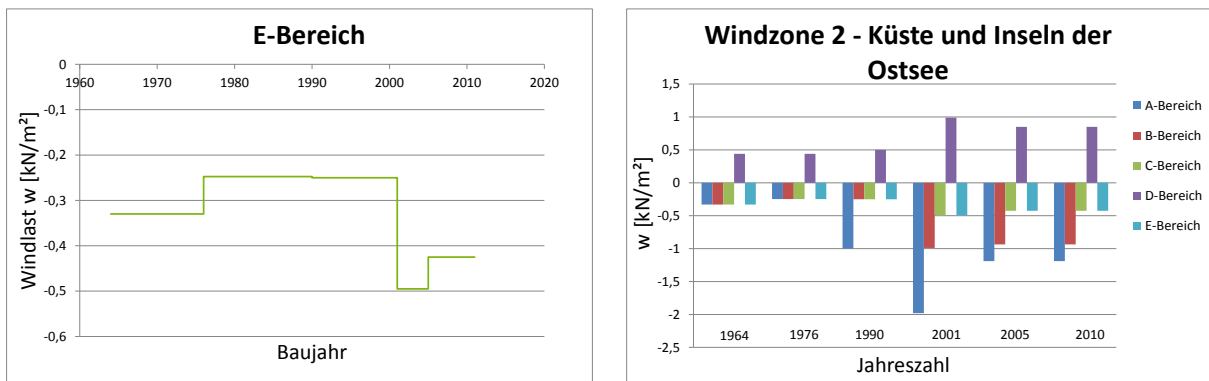


Abbildung 407: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.12 Halle B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

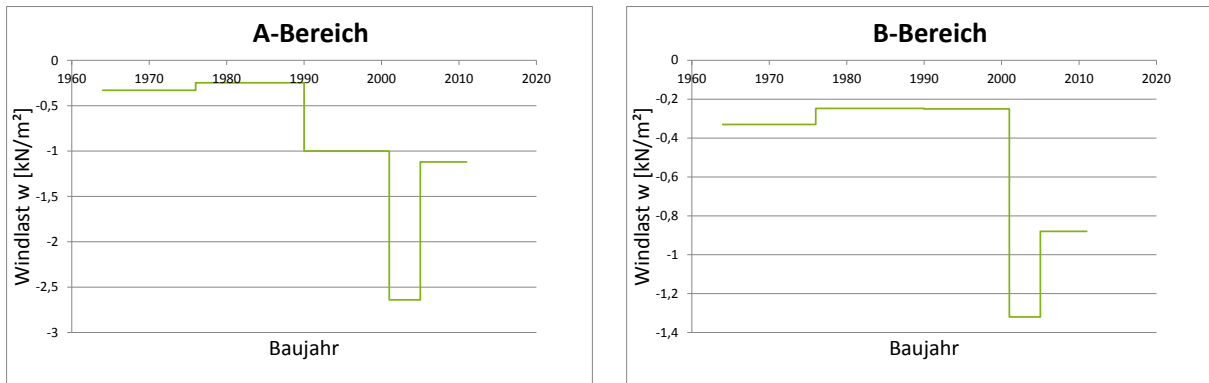


Abbildung 408: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

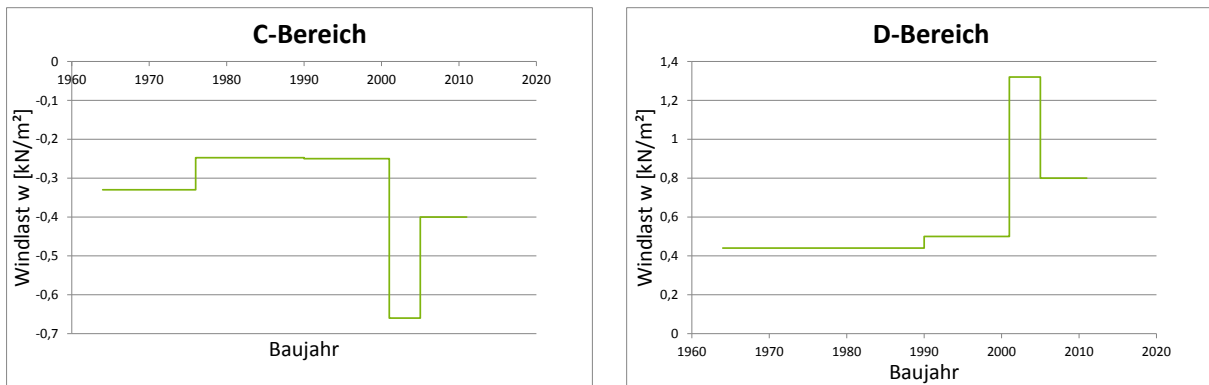


Abbildung 409: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

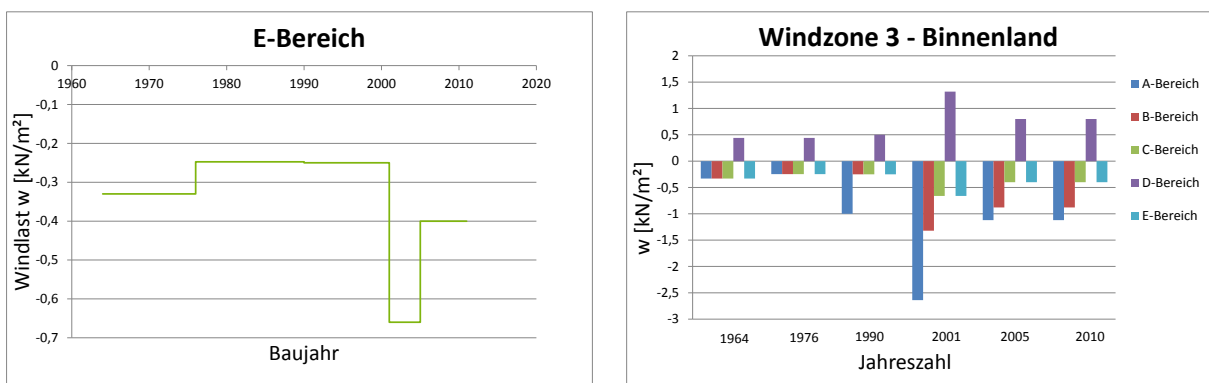


Abbildung 410: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.13 Halle B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

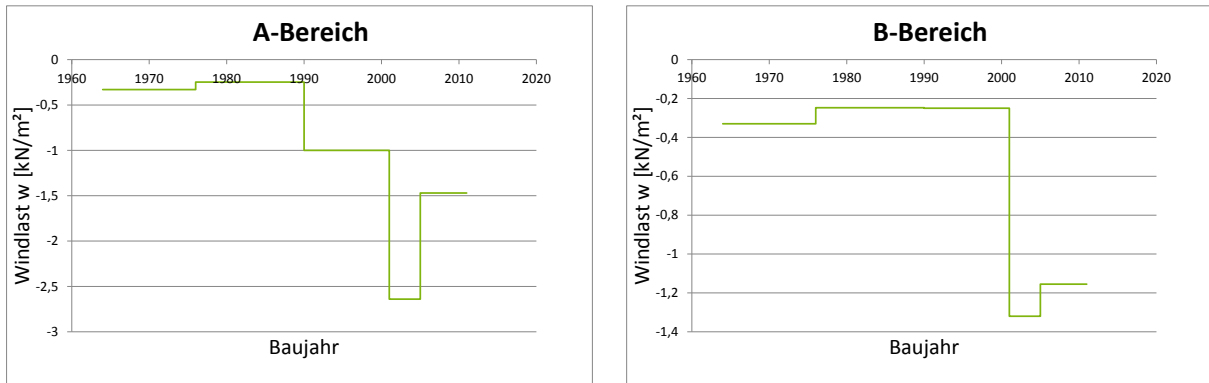


Abbildung 411: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

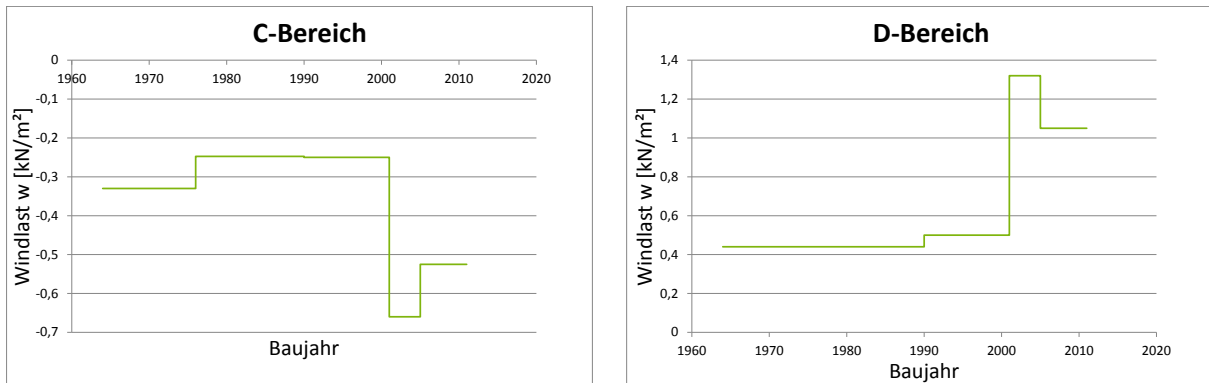


Abbildung 412: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

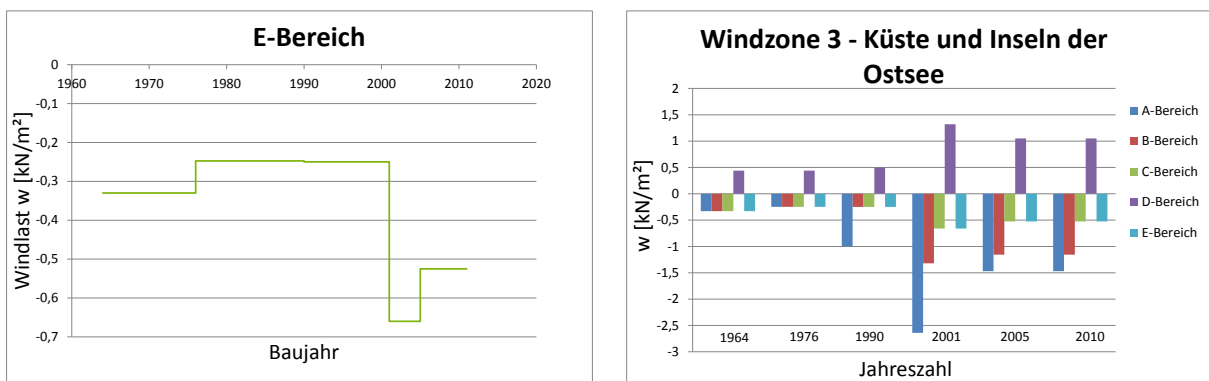


Abbildung 413: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.14 Halle B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

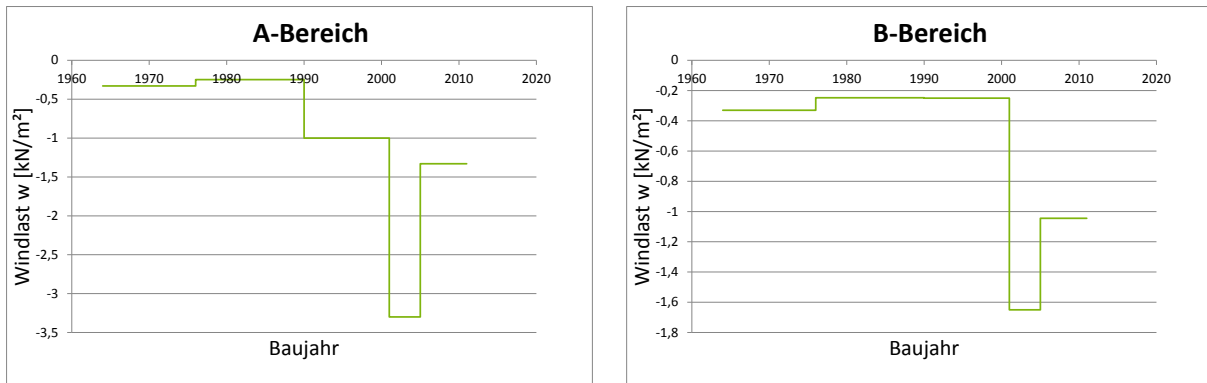


Abbildung 414: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

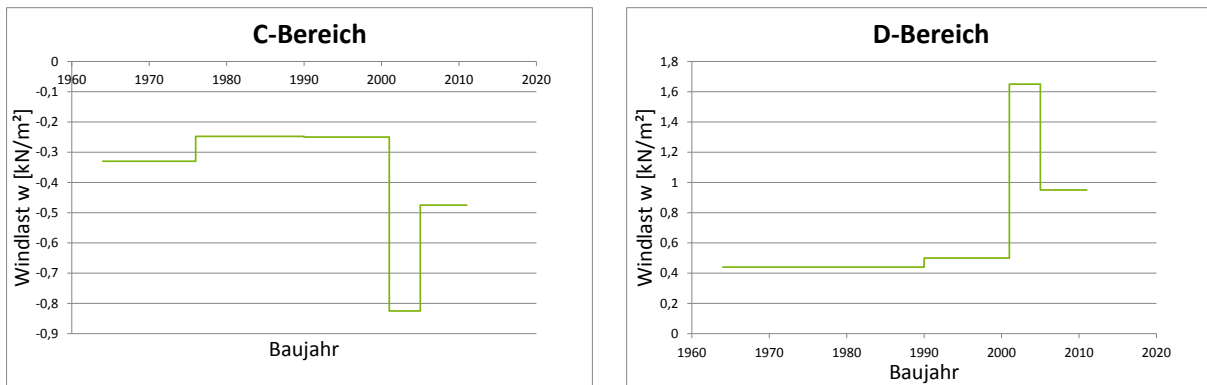


Abbildung 415: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

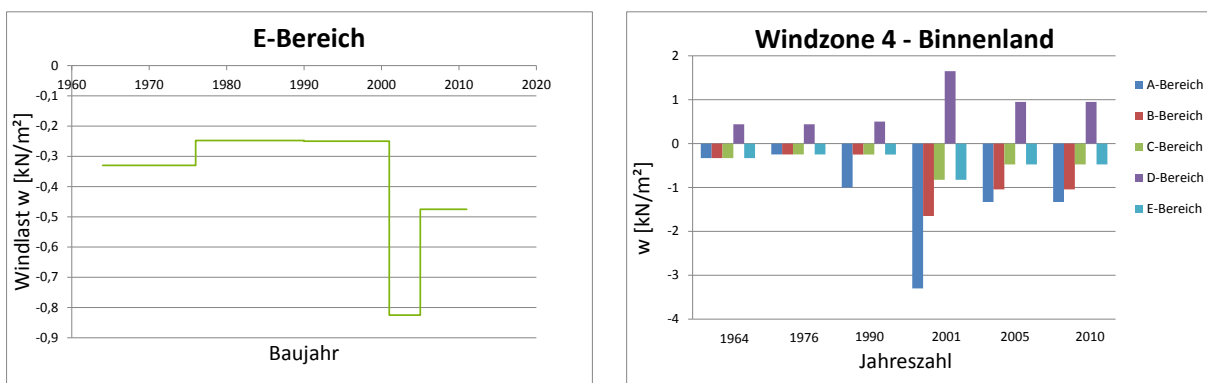


Abbildung 416: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.15 Halle B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

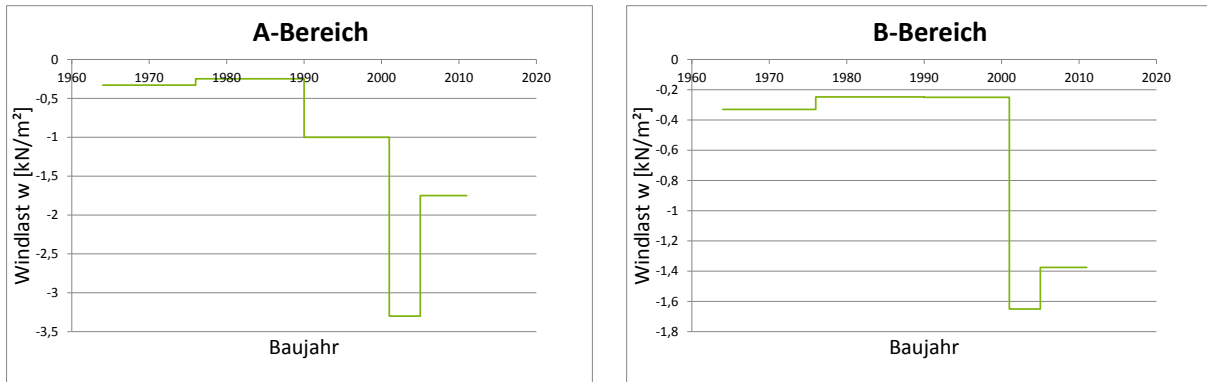


Abbildung 417: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

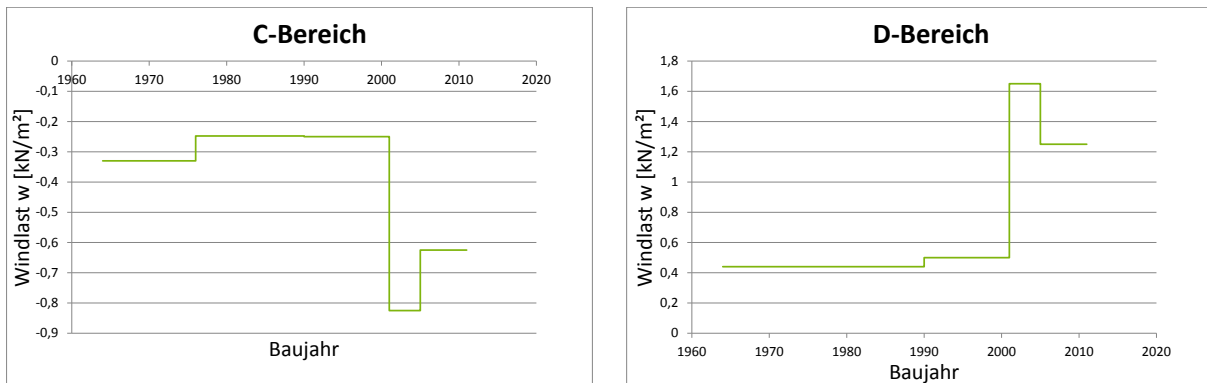


Abbildung 418: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

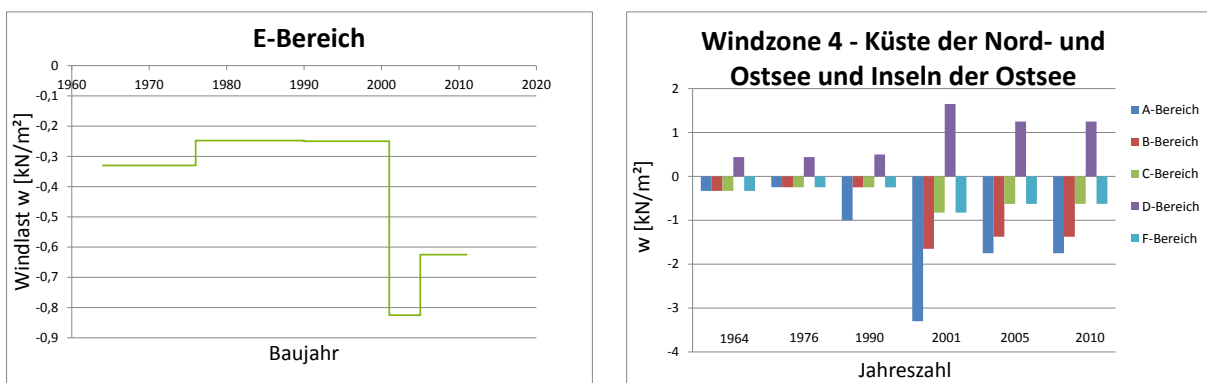


Abbildung 419: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.16 Halle B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

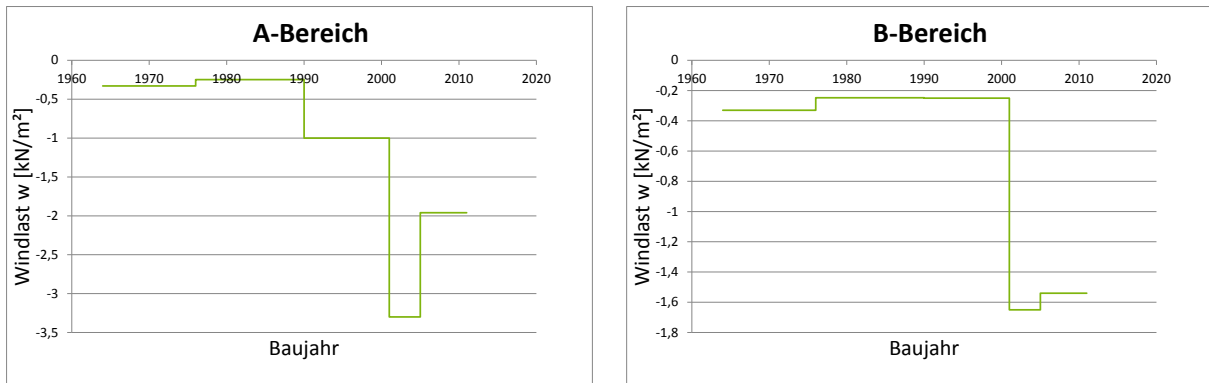


Abbildung 420: Halle B. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

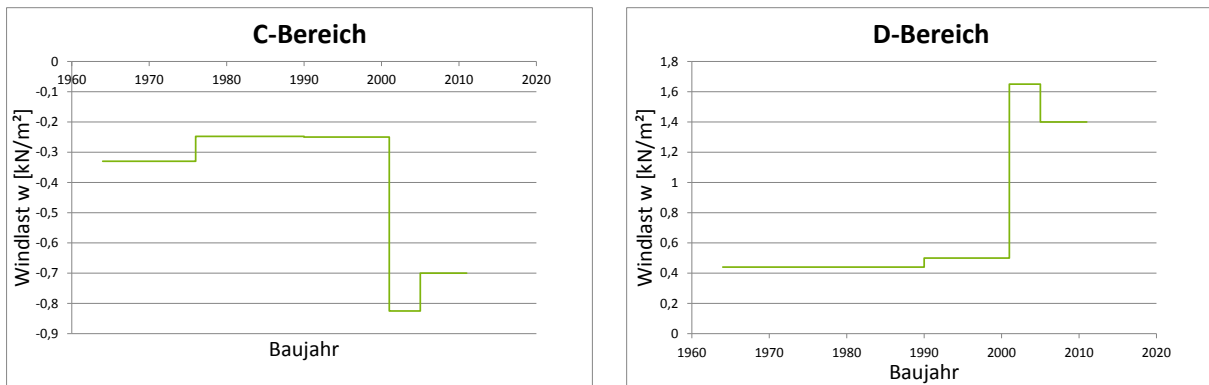


Abbildung 421: Halle B. Links: Bereich C. Rechts: Bereich D

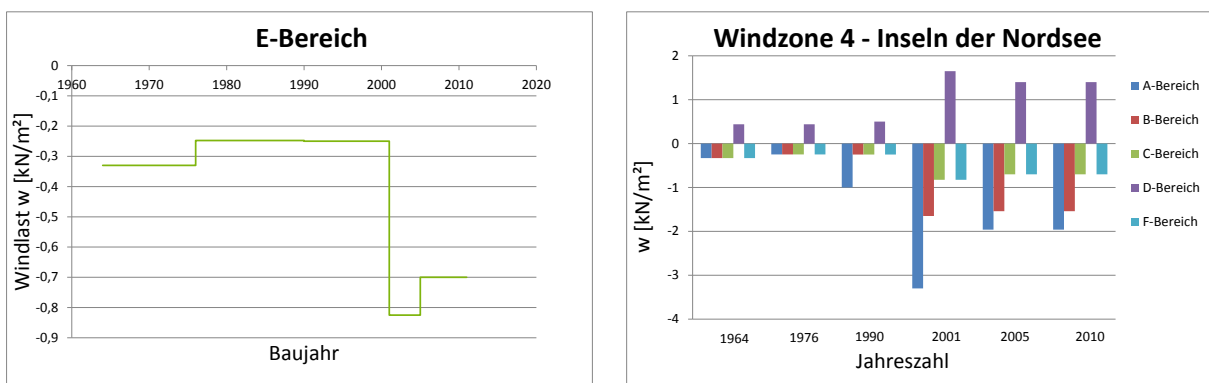


Abbildung 422: Halle B. Links: Bereich E. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.6.17 Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

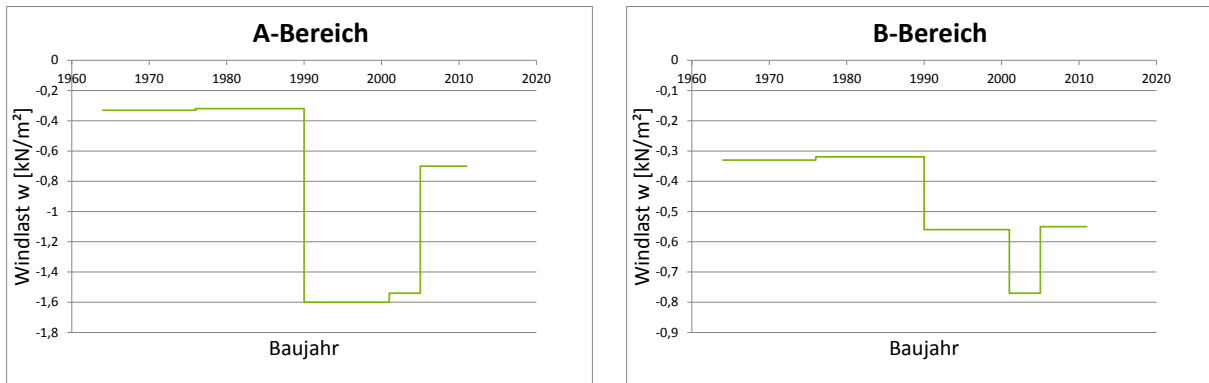


Abbildung 423: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

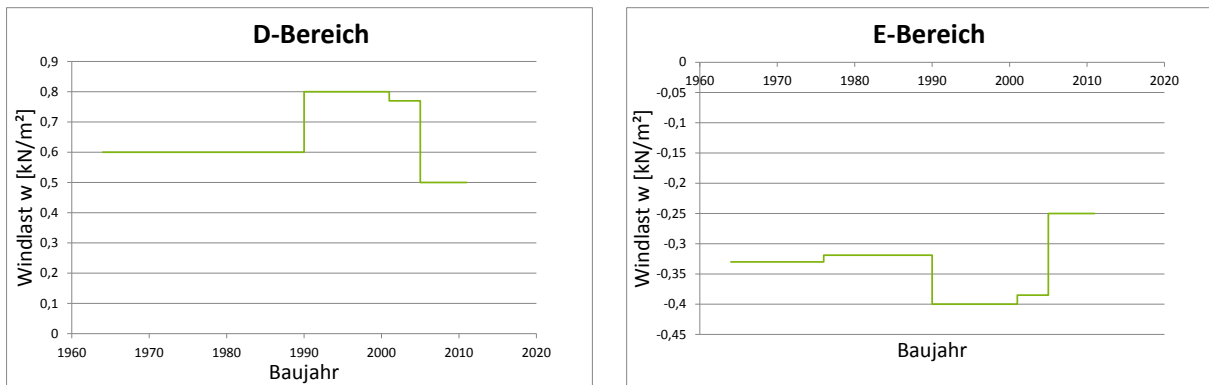


Abbildung 424: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

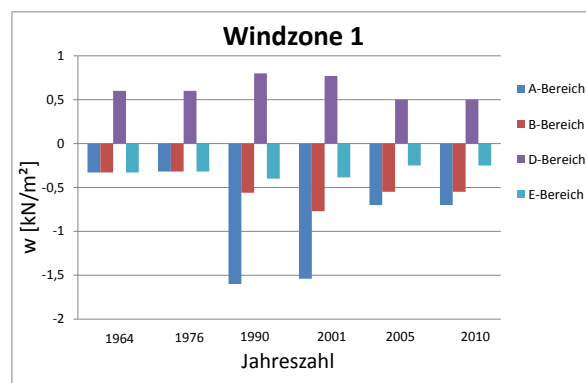


Abbildung 425: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.18 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

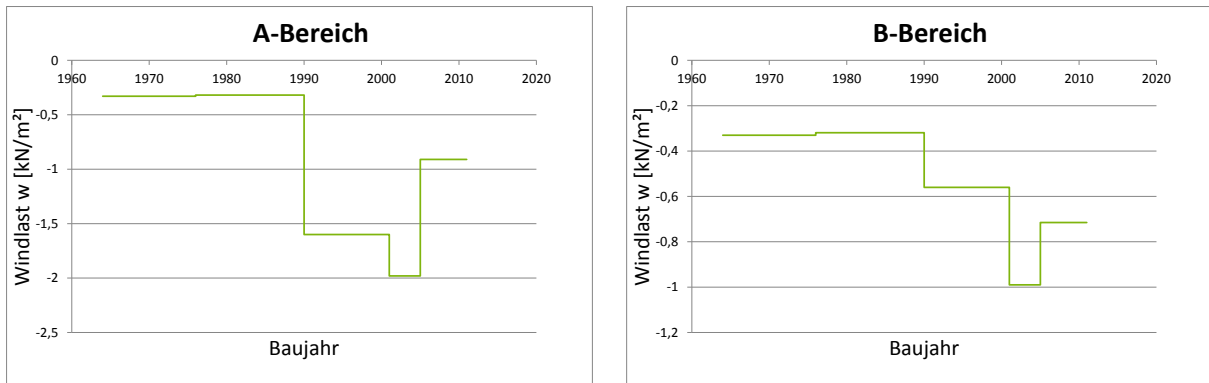


Abbildung 426: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

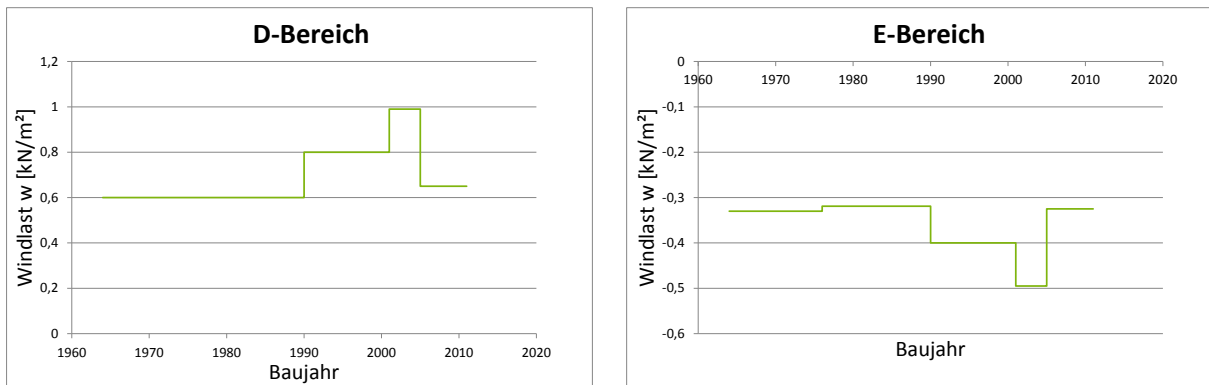


Abbildung 427: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

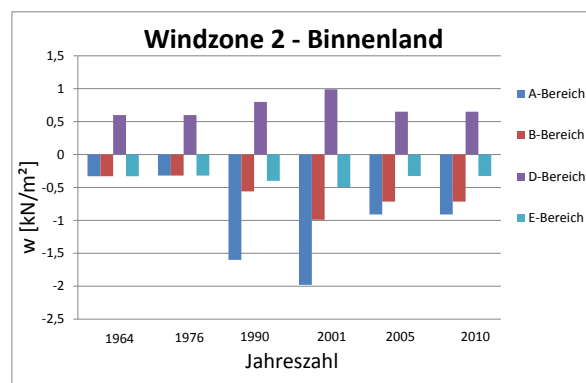


Abbildung 428: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.19 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

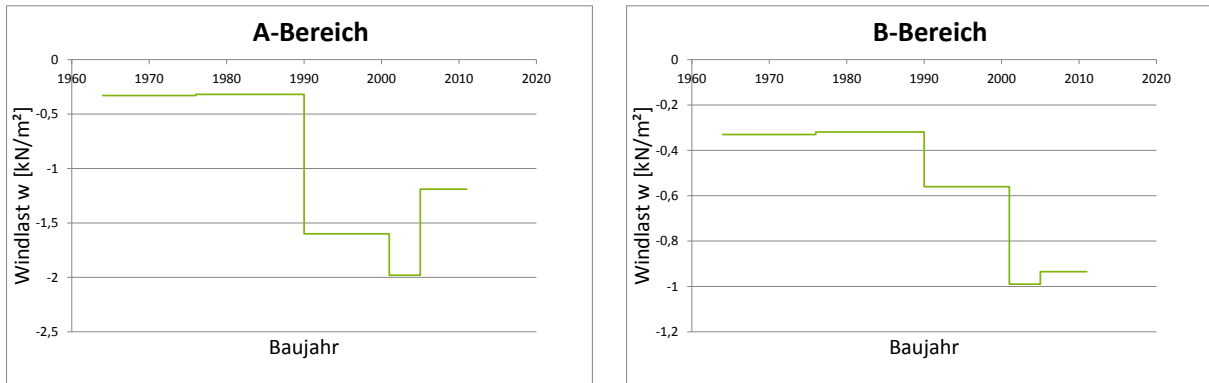


Abbildung 429: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

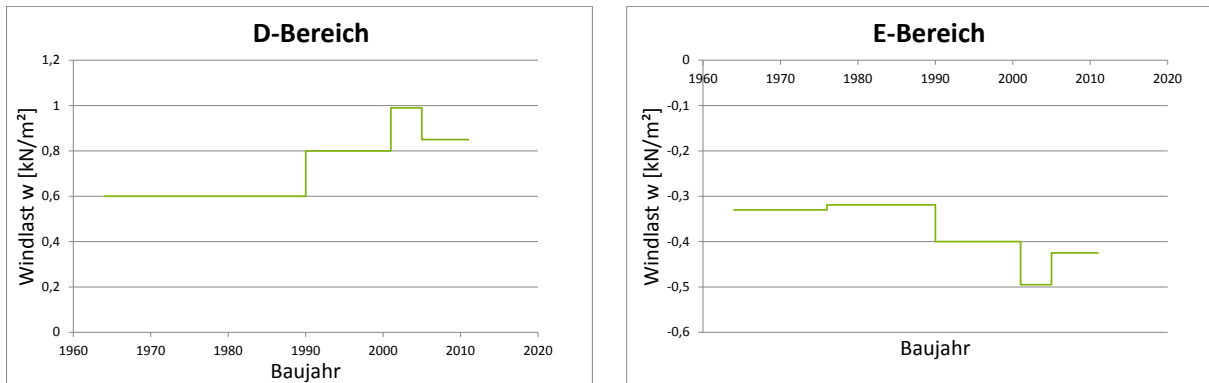


Abbildung 430: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

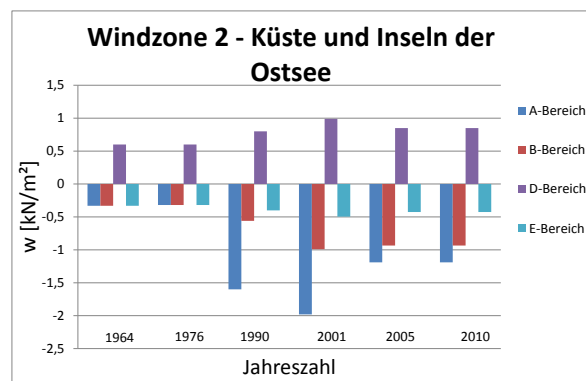


Abbildung 431: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.20 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

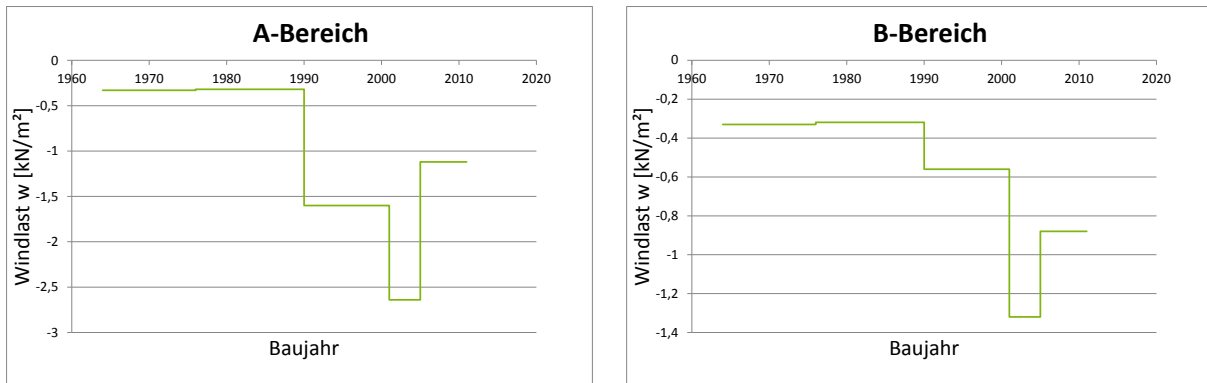


Abbildung 432: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

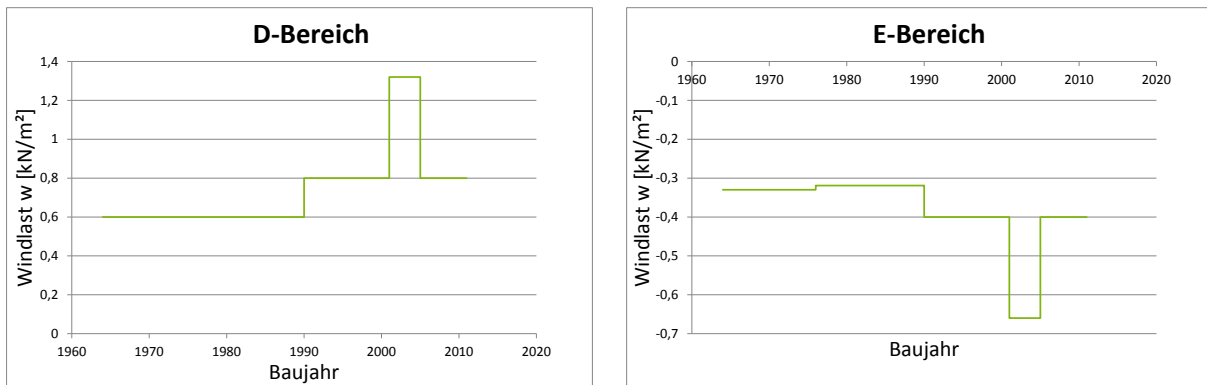


Abbildung 433: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

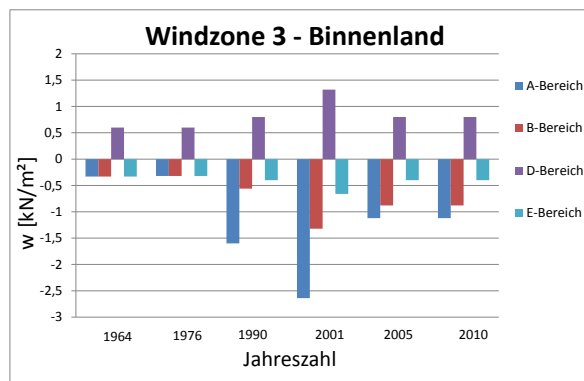


Abbildung 434: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.21 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

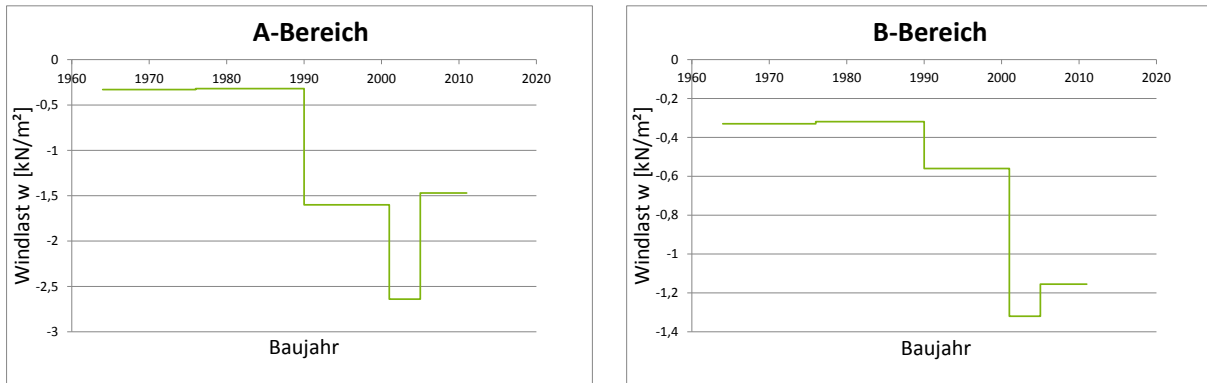


Abbildung 435: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

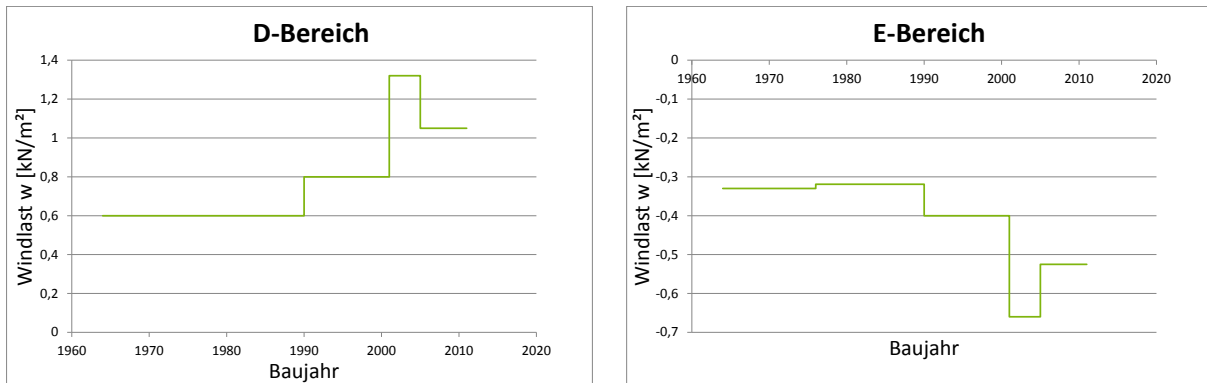


Abbildung 436: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

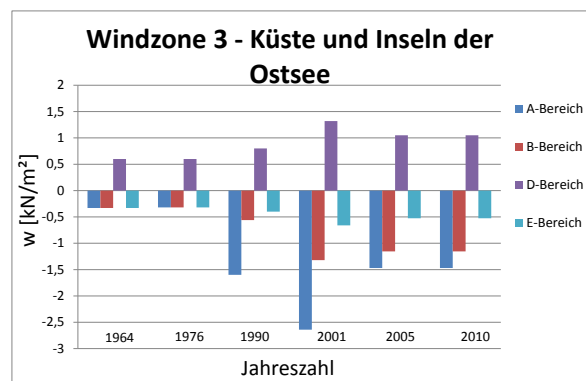


Abbildung 437: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.22 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

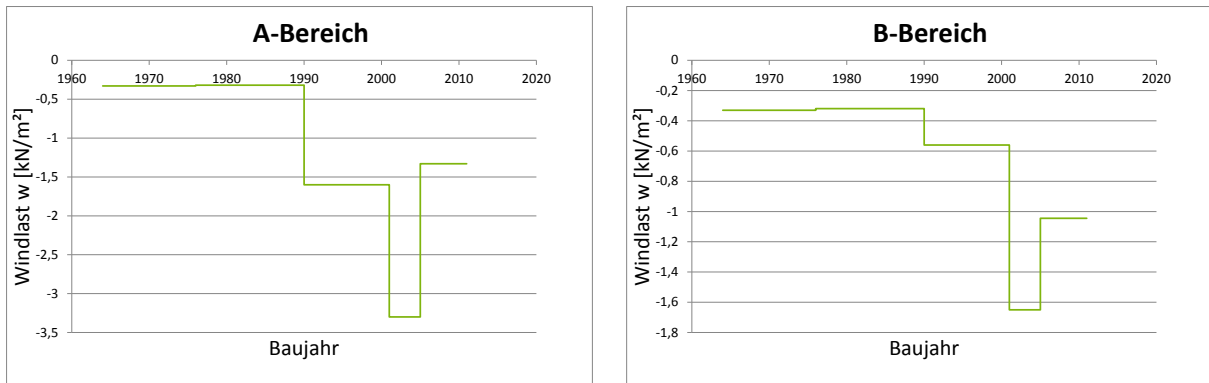


Abbildung 438: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

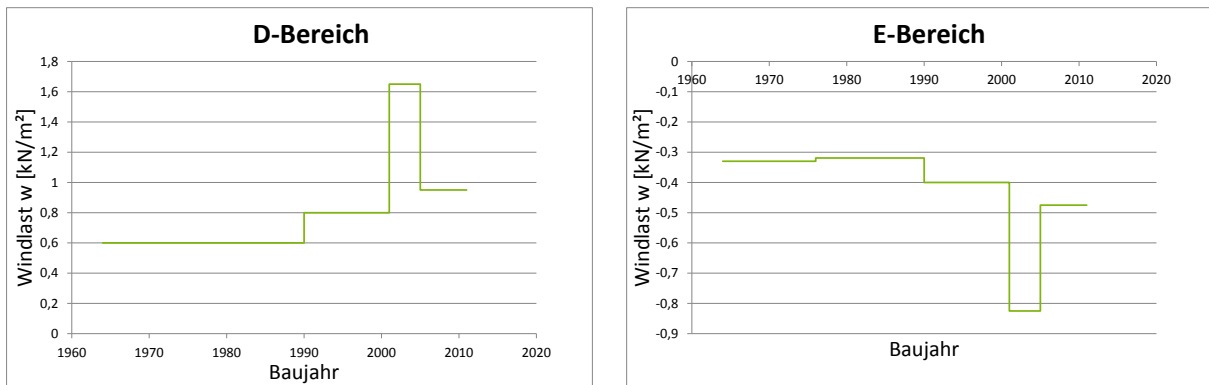


Abbildung 439: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

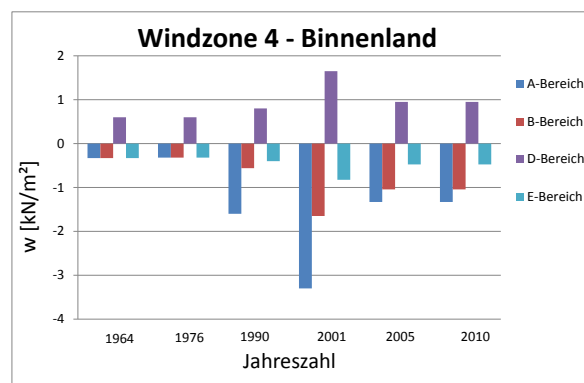


Abbildung 440: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.23 Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

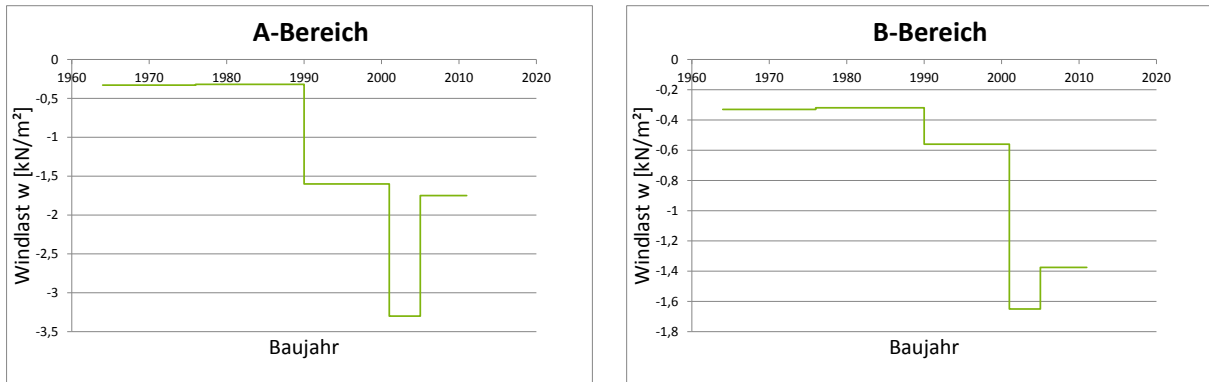


Abbildung 441: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

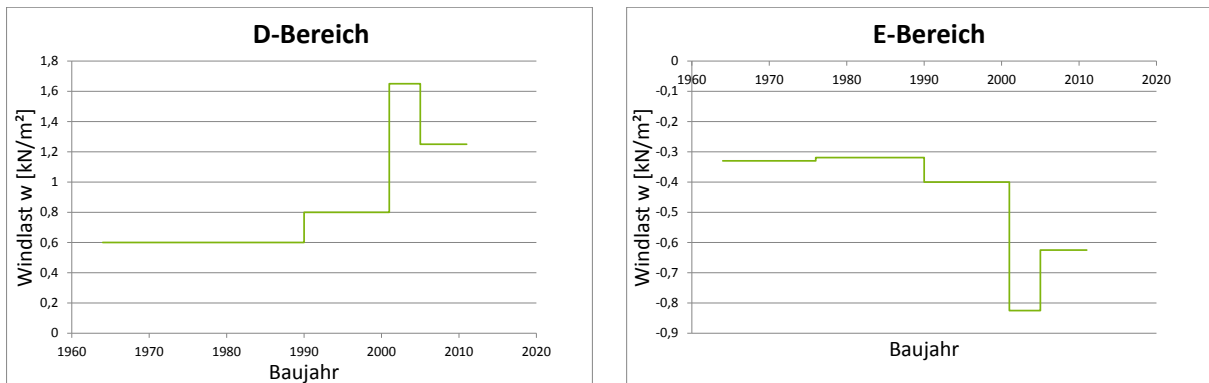


Abbildung 442: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

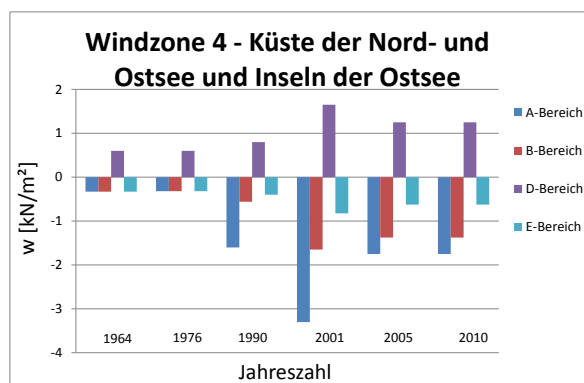


Abbildung 443: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.6.24 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

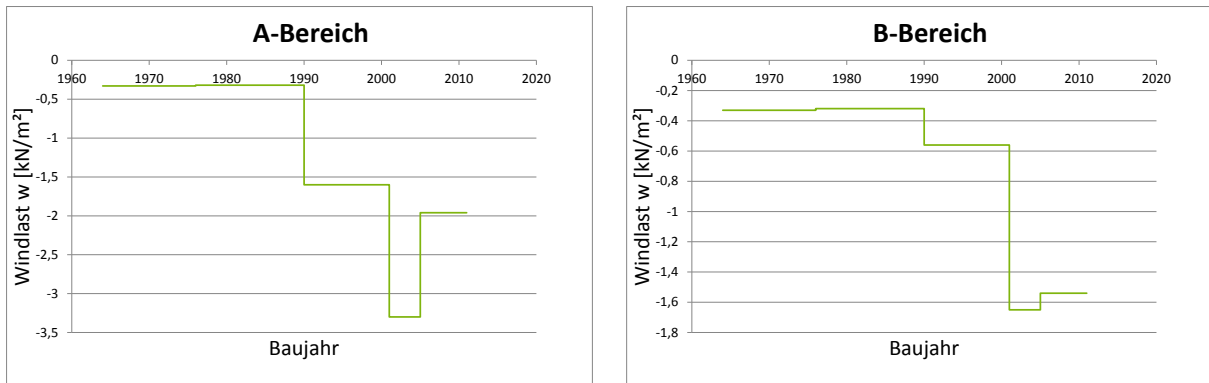


Abbildung 444: Halle C. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

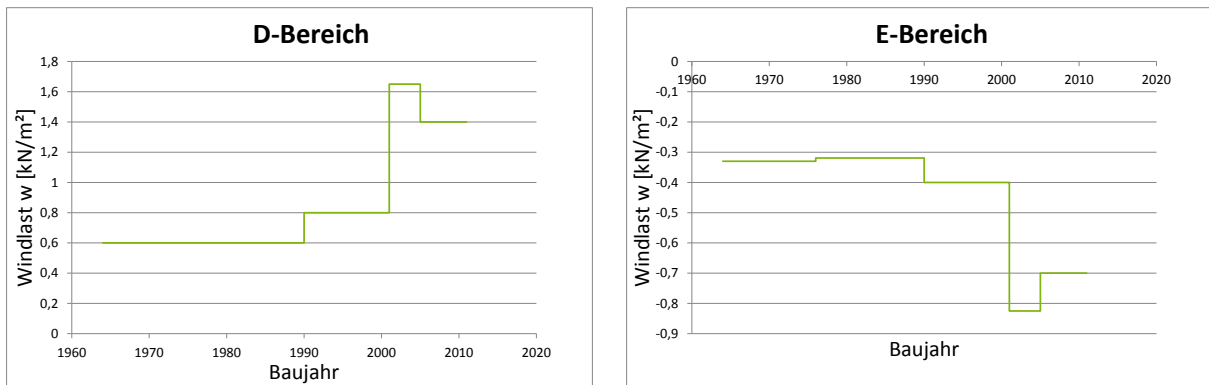


Abbildung 445: Halle C. Links: Bereich D. Rechts: Bereich E

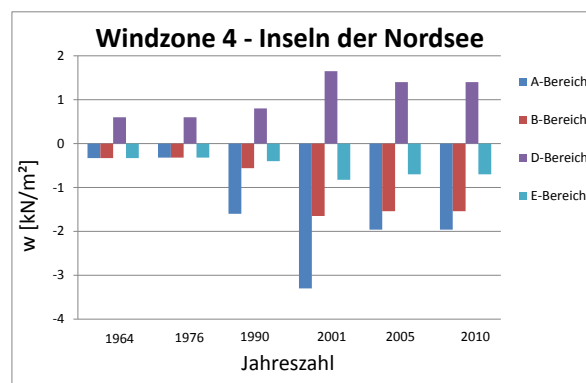


Abbildung 446: Halle C. Überblick über alle Bereiche

5.7 Windlast auf Dächern für die lokale Bemessung in der Bundesrepublik Deutschland von 1938 bis 2010

5.7.1 Halle A und B in der Windzone 1 Binnenland

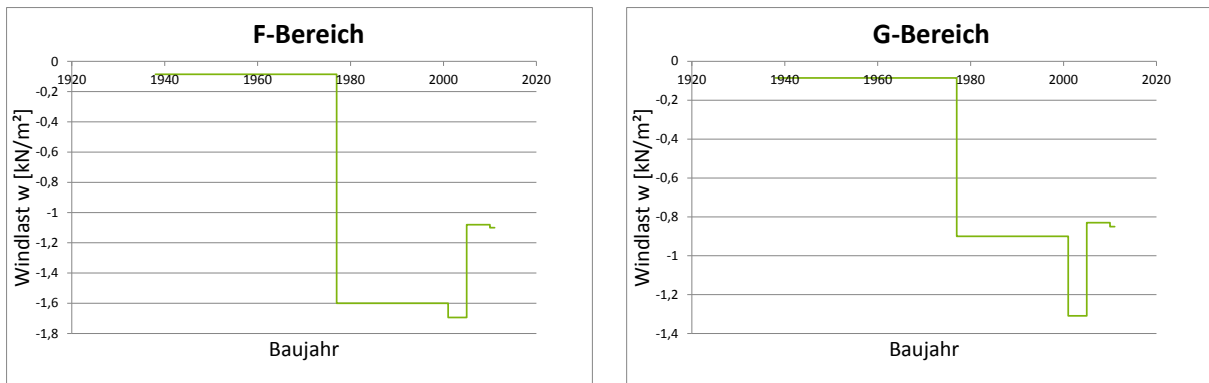


Abbildung 447: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

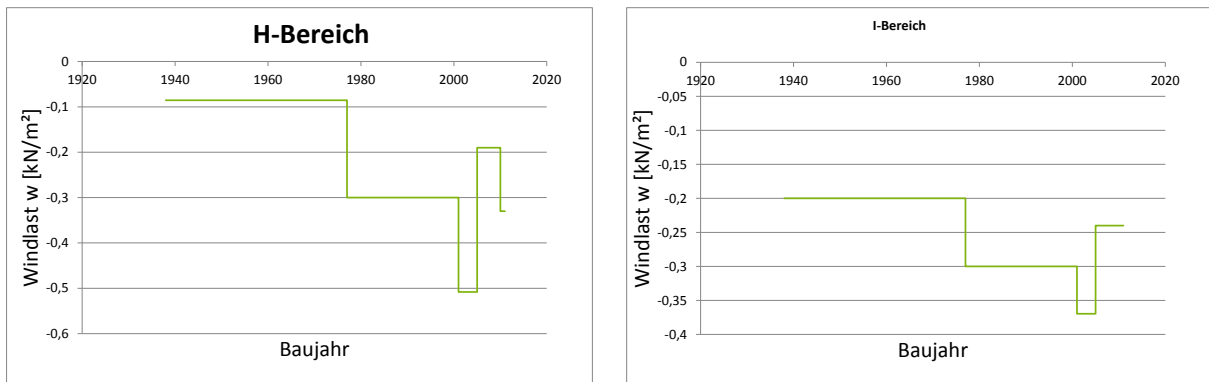


Abbildung 448: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

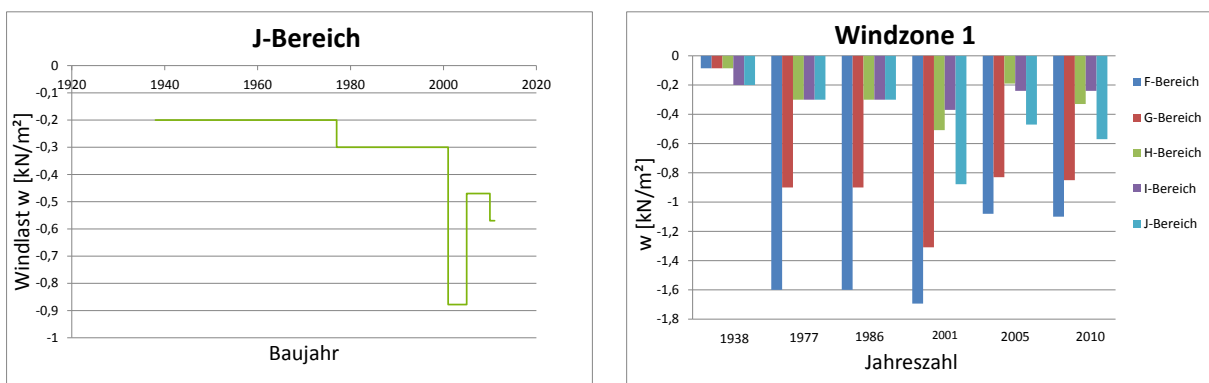


Abbildung 449: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.2 Halle A und B in der Windzone 2 Binnenland

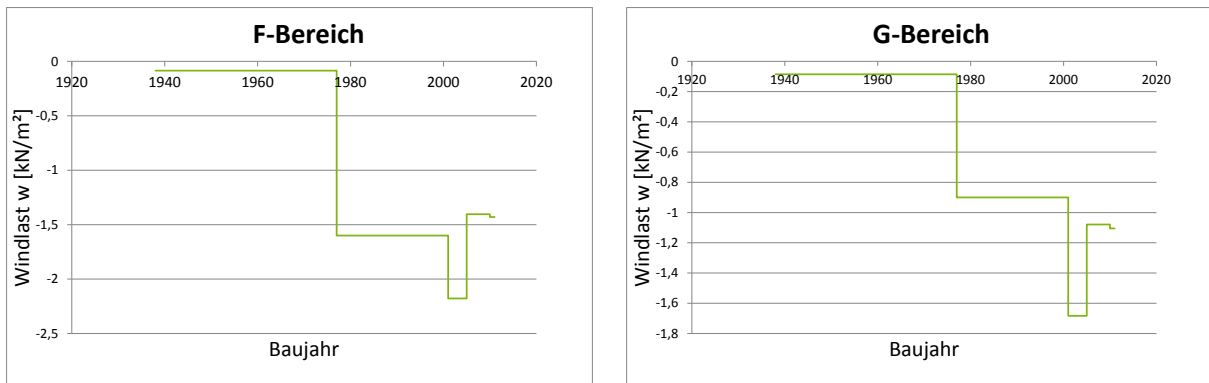


Abbildung 450: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

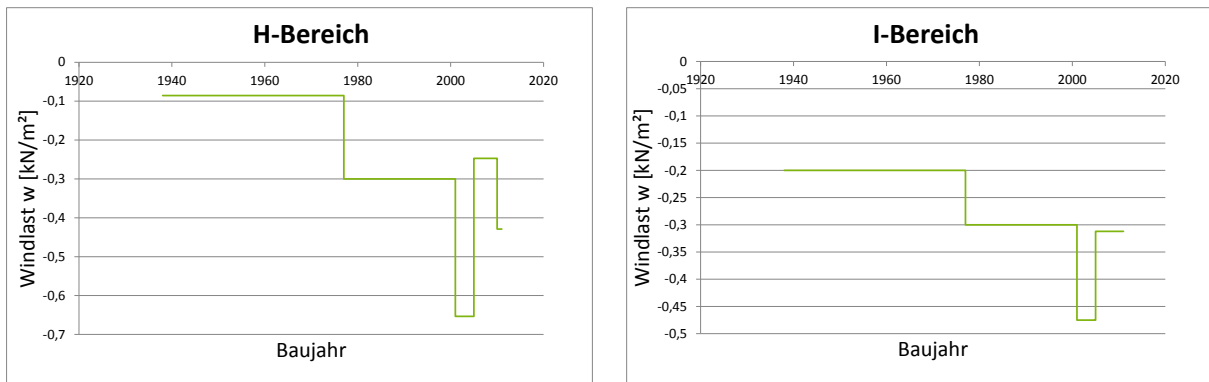


Abbildung 451: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

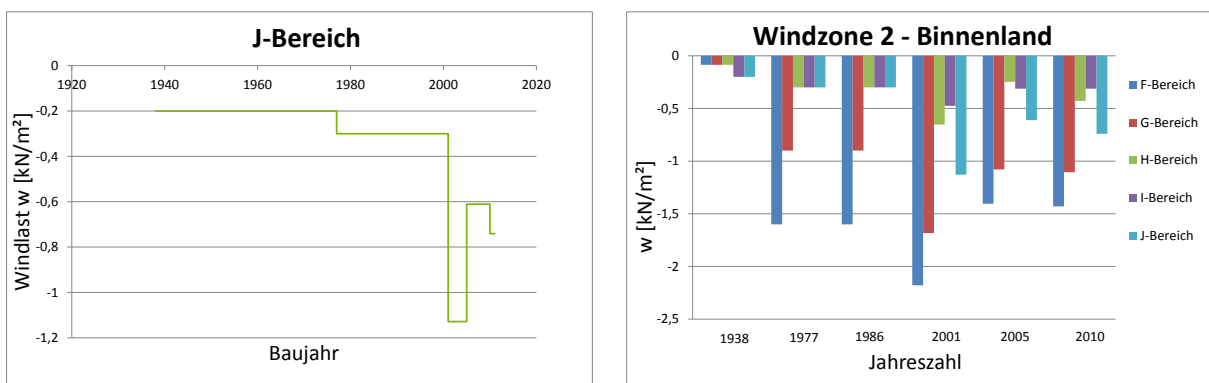


Abbildung 452: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.3 Halle A und B in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

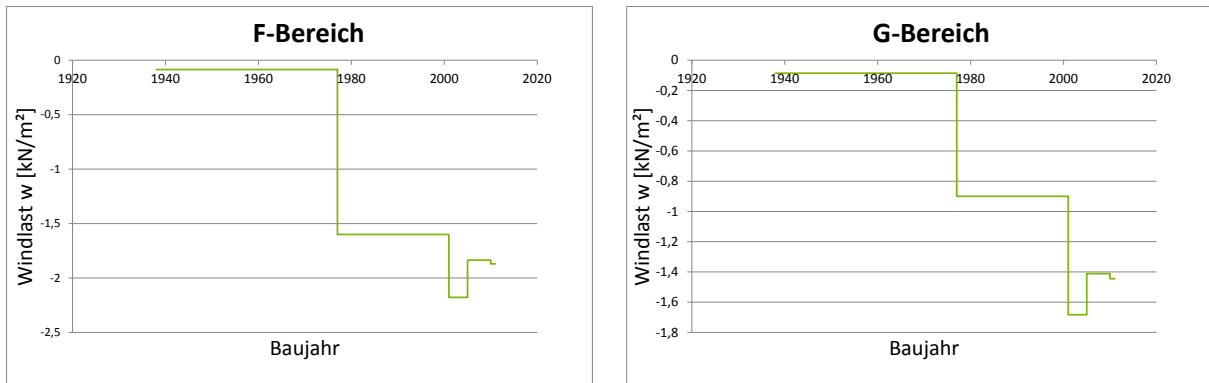


Abbildung 453: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

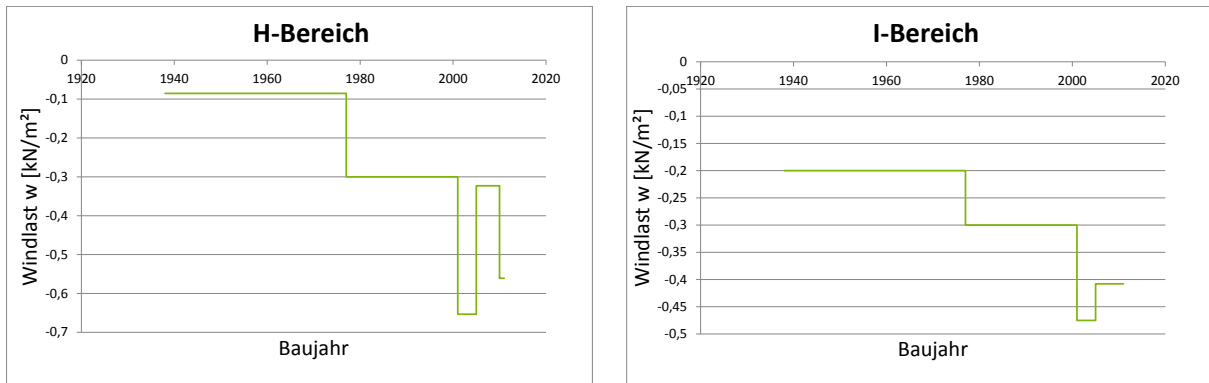


Abbildung 454: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich D

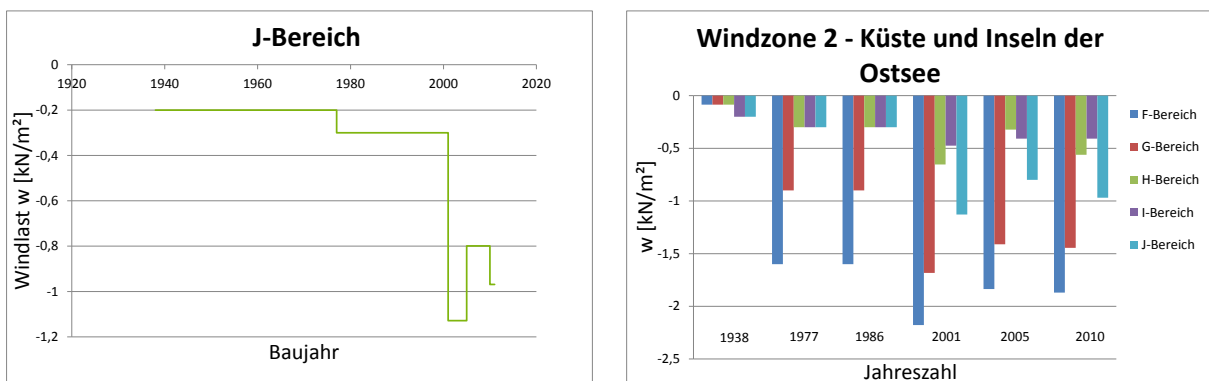


Abbildung 455: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.4 Halle A und B in der Windzone 3 Binnenland

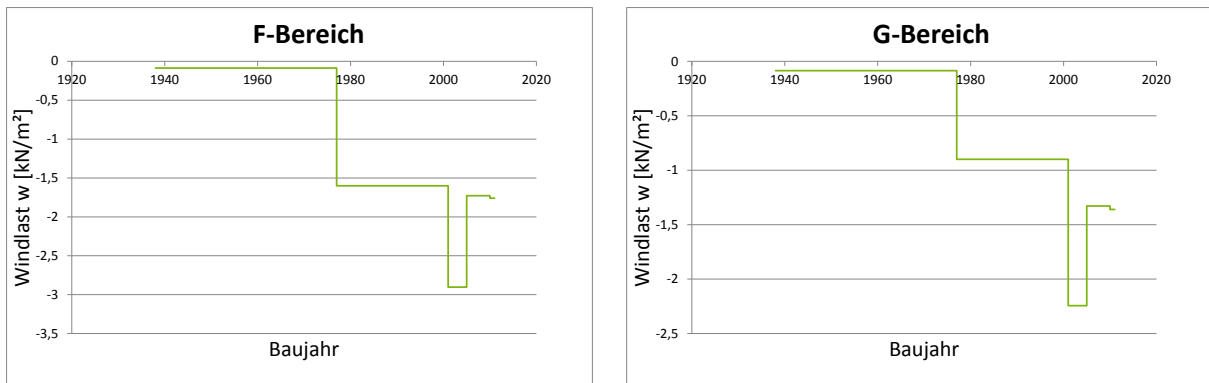


Abbildung 456: Halle F und G. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

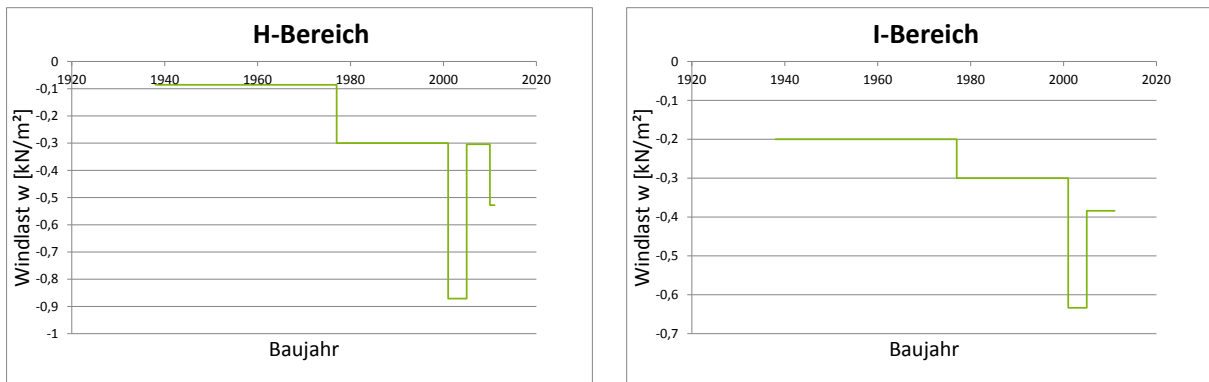


Abbildung 457: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

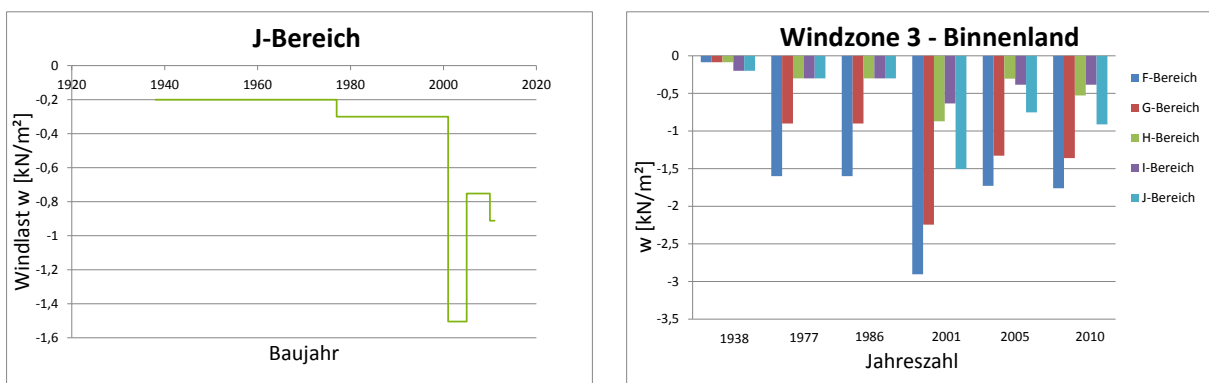


Abbildung 458: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.5 Halle A und B in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

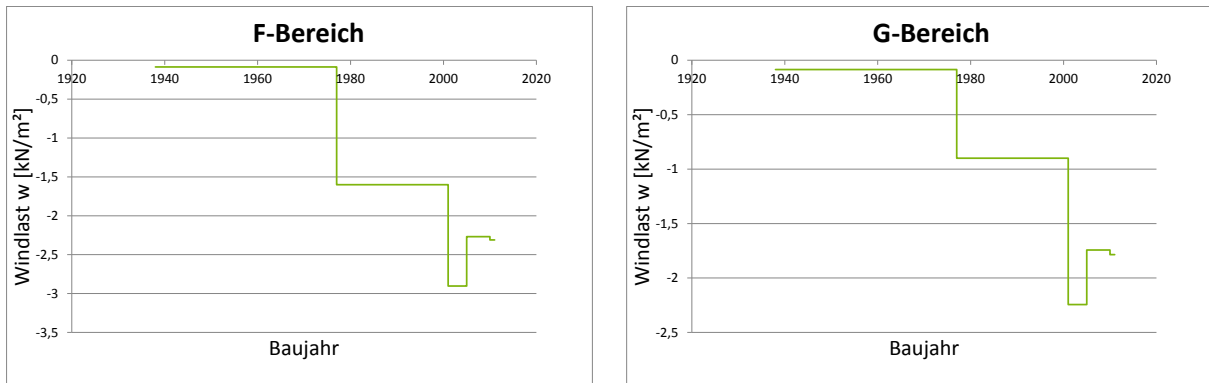


Abbildung 459: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

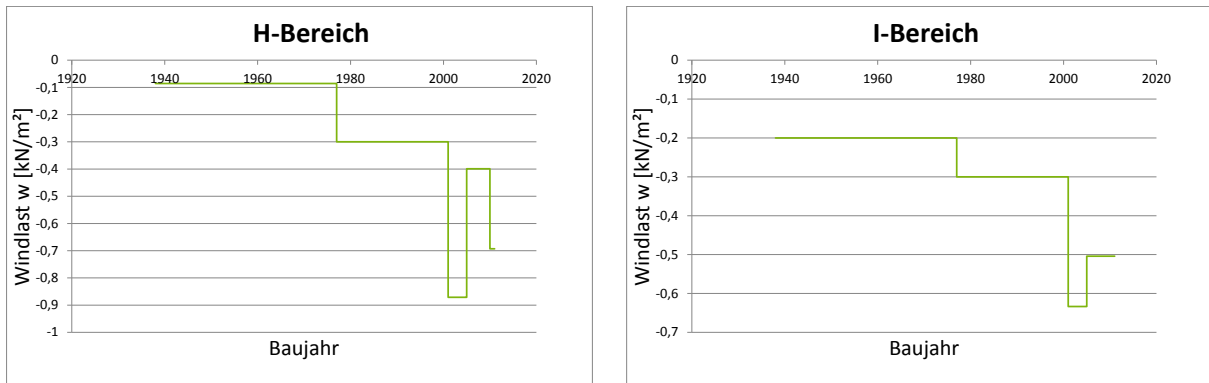


Abbildung 460: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

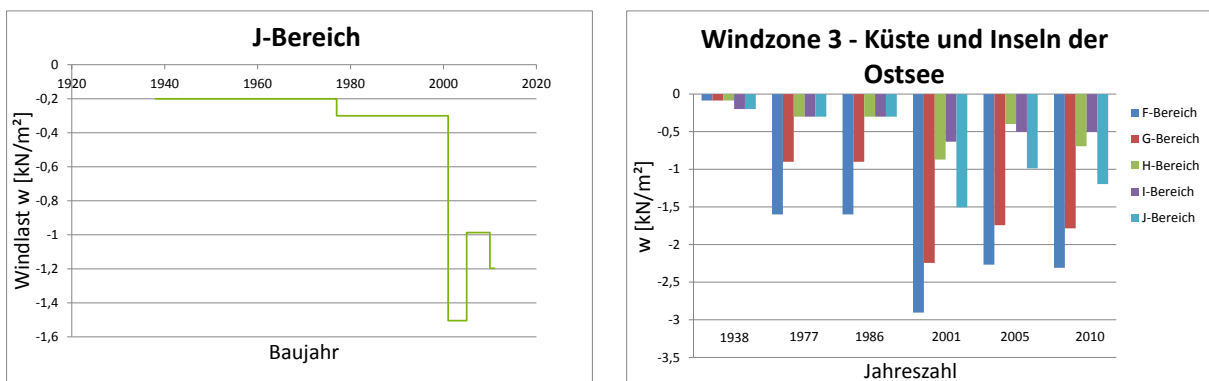


Abbildung 461: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.6 Halle A und B in der Windzone 4 Binnenland

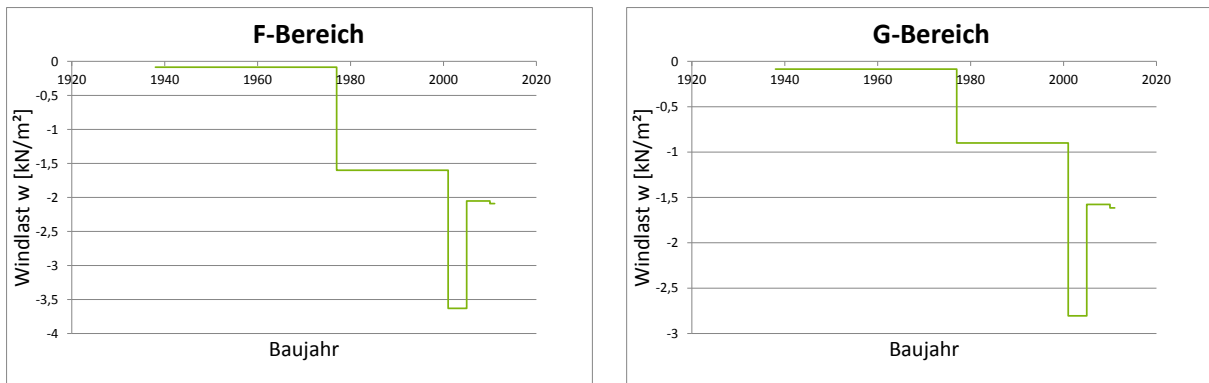


Abbildung 462: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

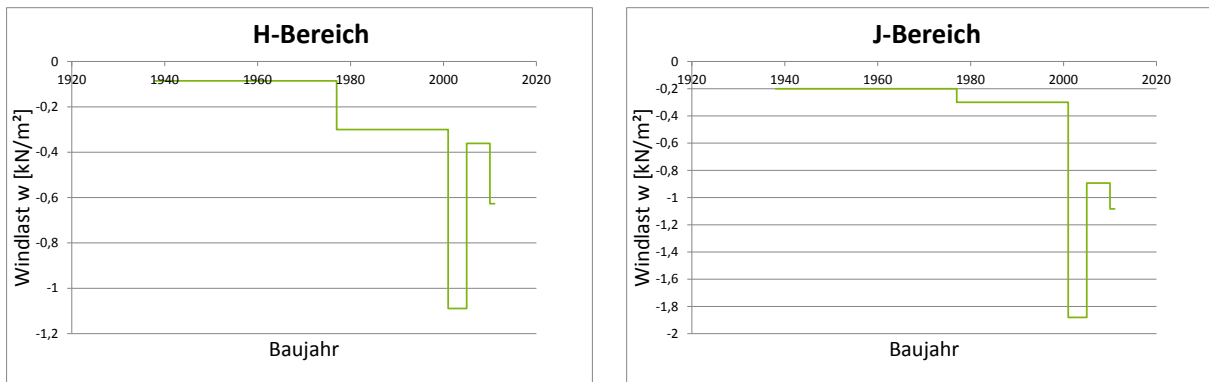


Abbildung 463: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

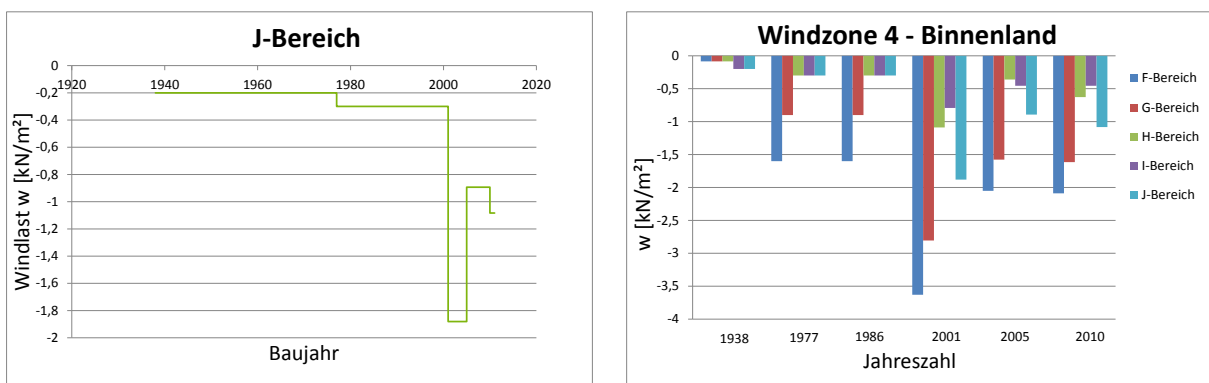


Abbildung 464: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.7 Halle A und B in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

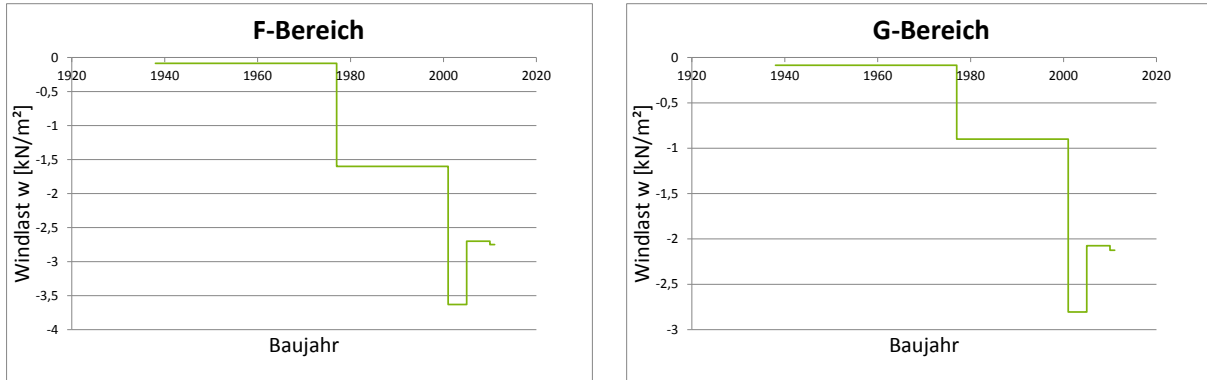


Abbildung 465: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

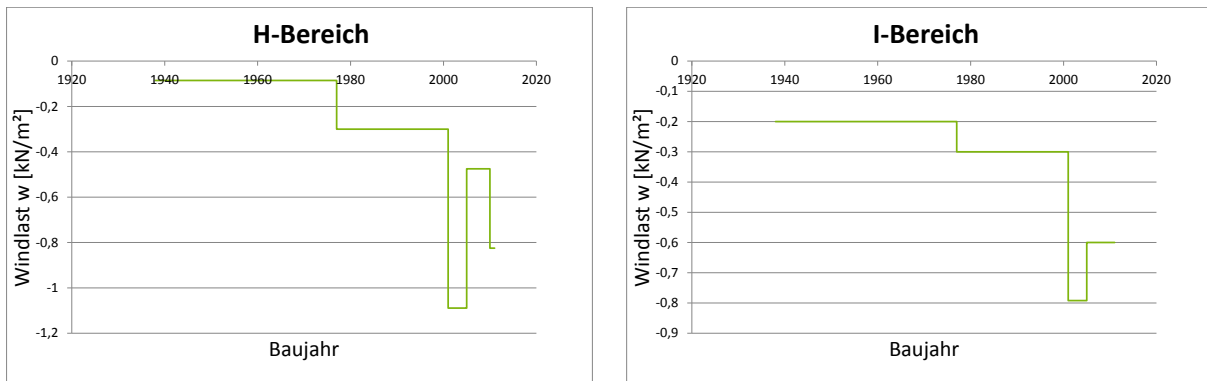


Abbildung 466: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

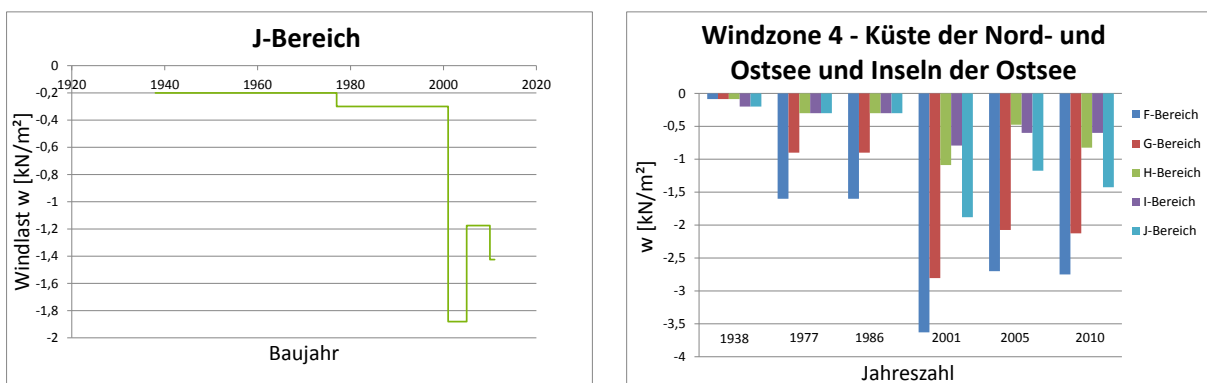


Abbildung 467: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.8 Halle A und B in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

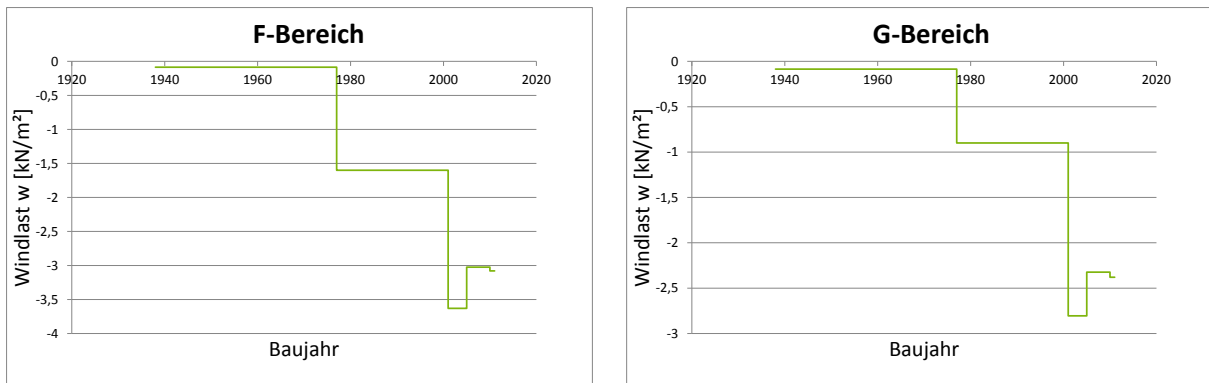


Abbildung 468: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

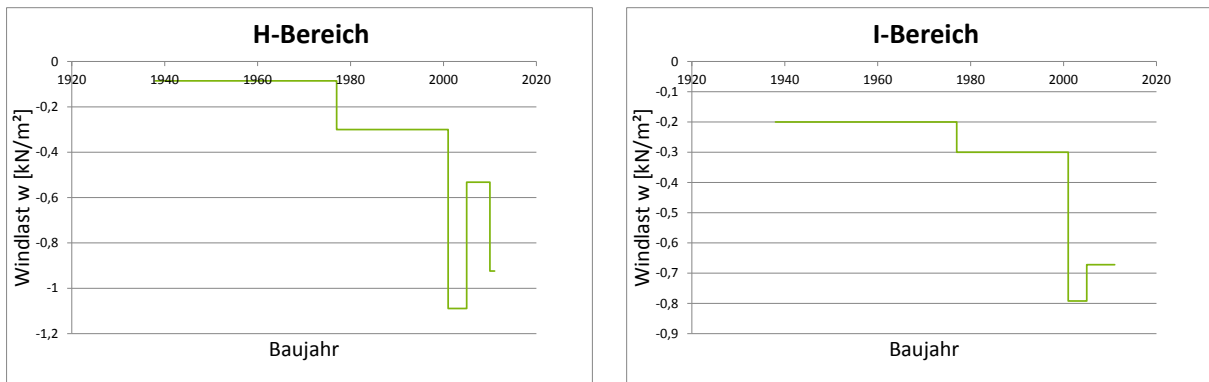


Abbildung 469: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

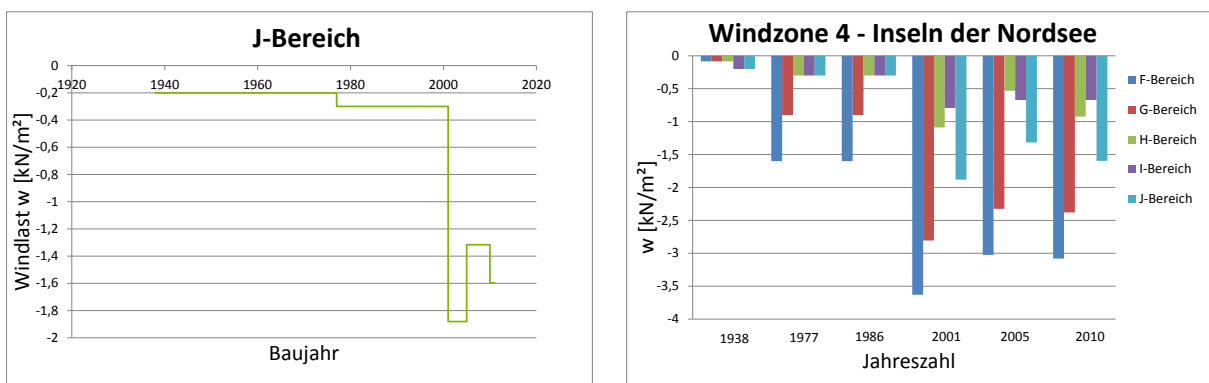


Abbildung 470: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.9 Halle C in der Windzone 1 Binnenland

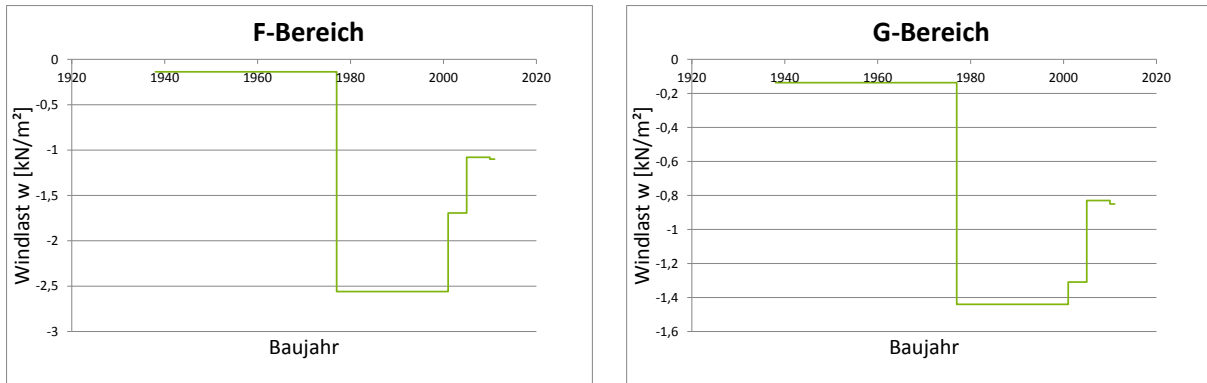


Abbildung 471: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

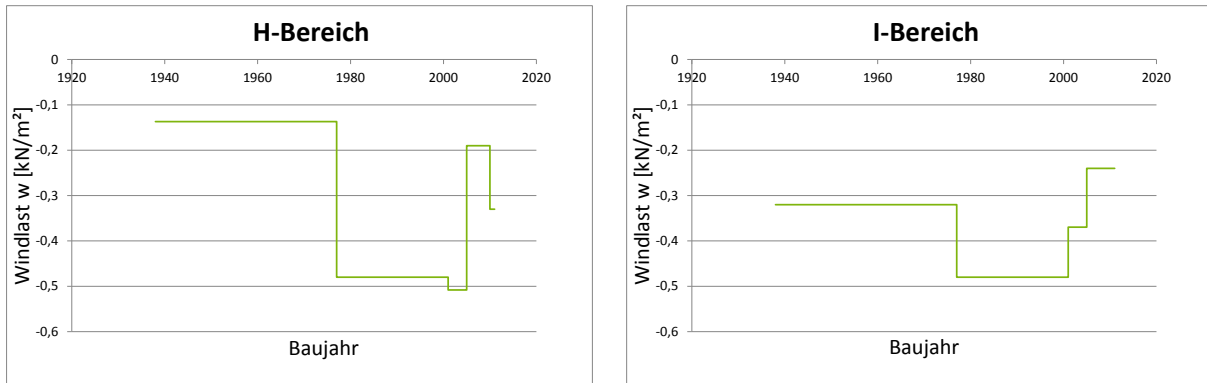


Abbildung 472: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

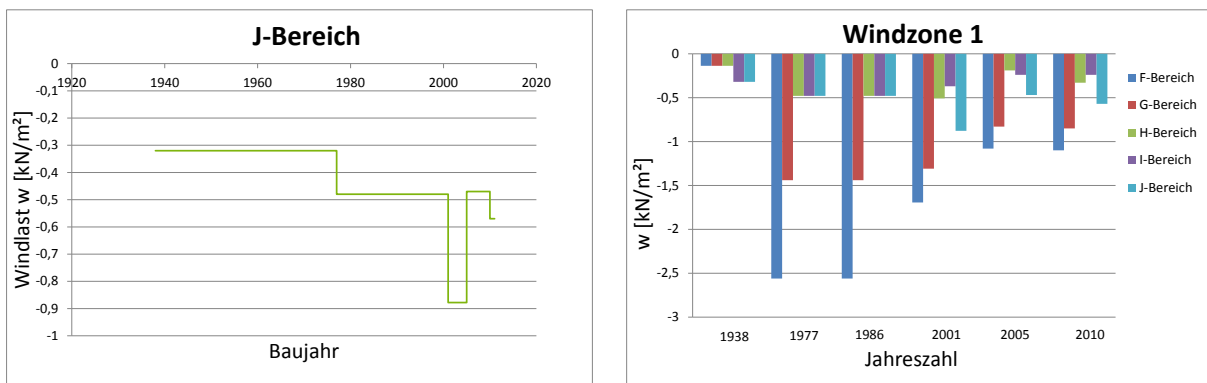


Abbildung 473: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.10 Halle C in der Windzone 2 Binnenland

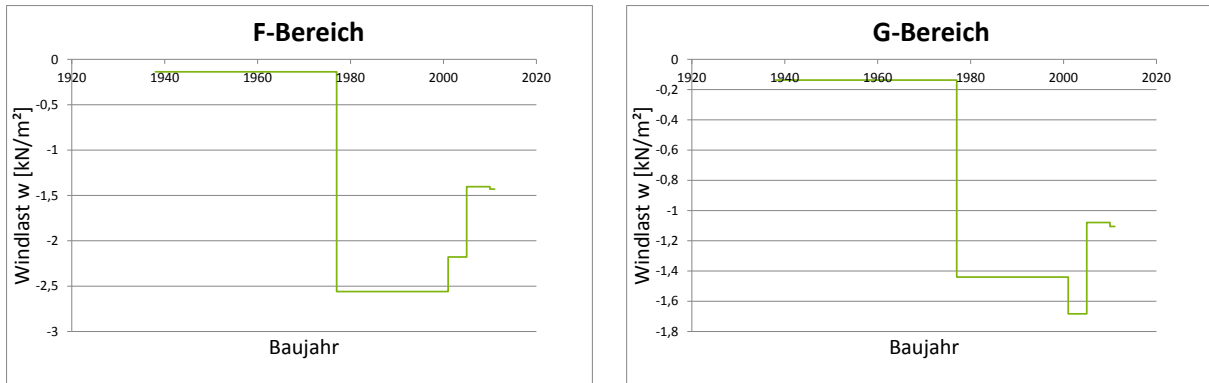


Abbildung 474: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

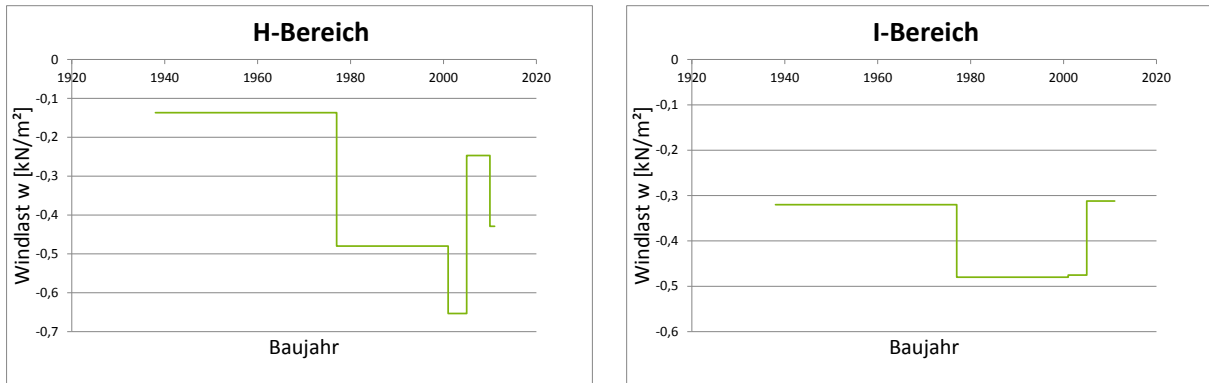


Abbildung 475: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

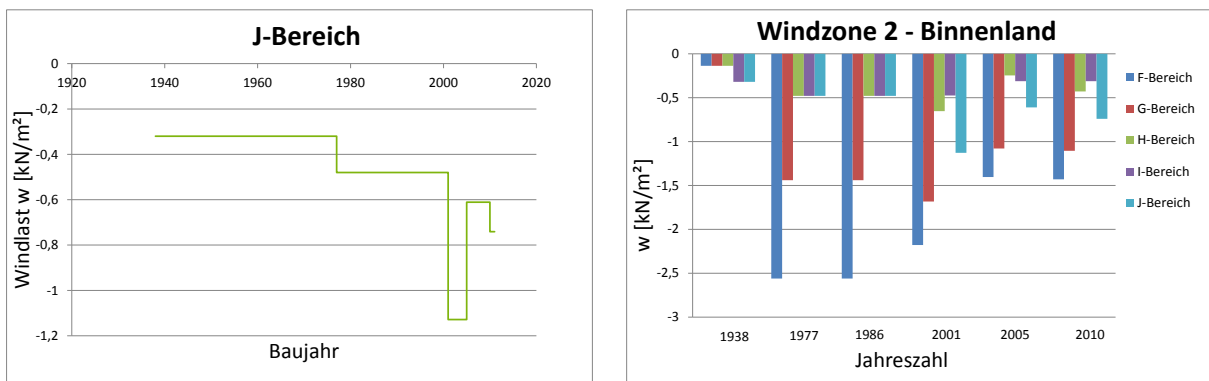


Abbildung 476: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.11 Halle C in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

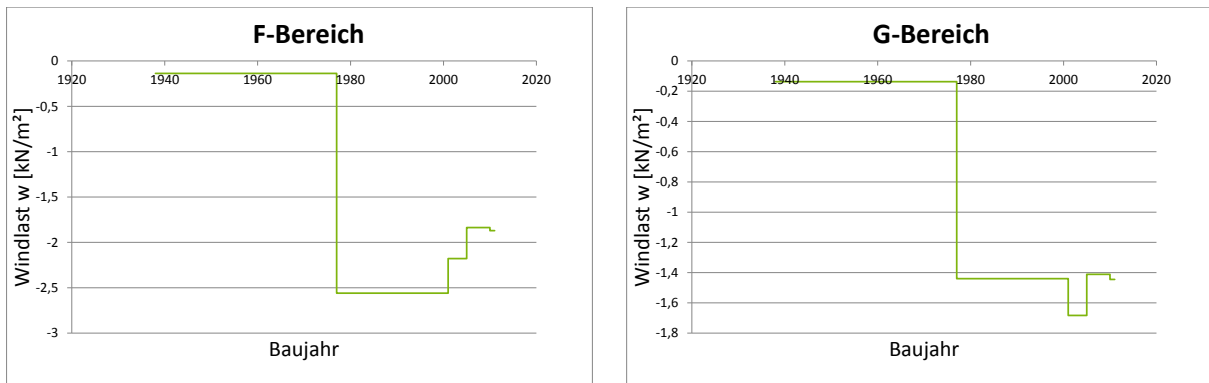


Abbildung 477: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

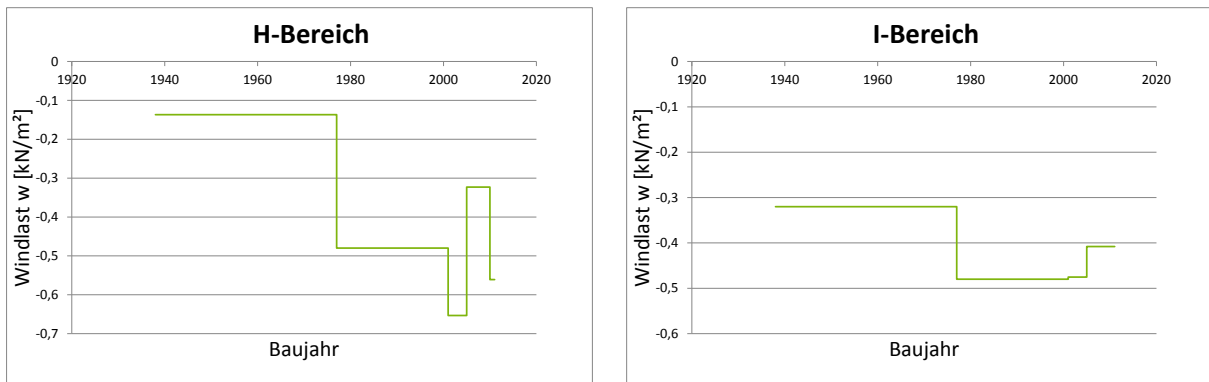


Abbildung 478: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

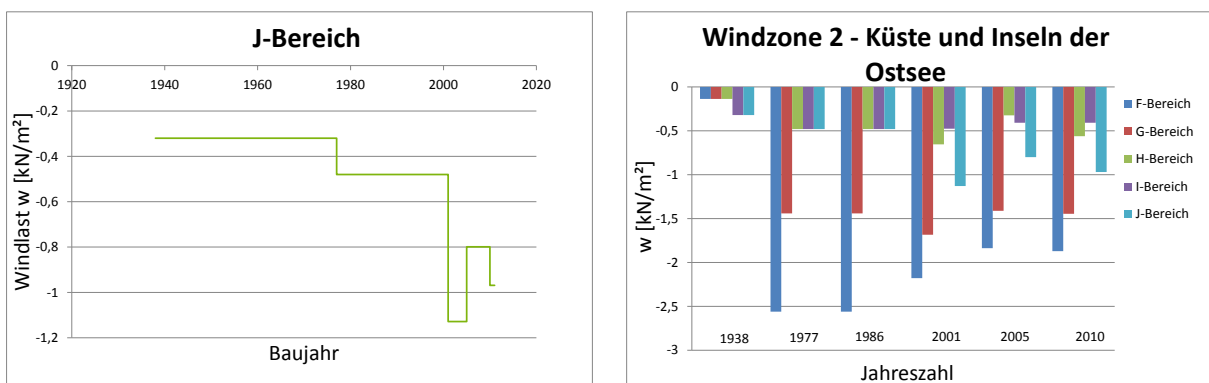


Abbildung 479: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.12 Halle C in der Windzone 3 Binnenland

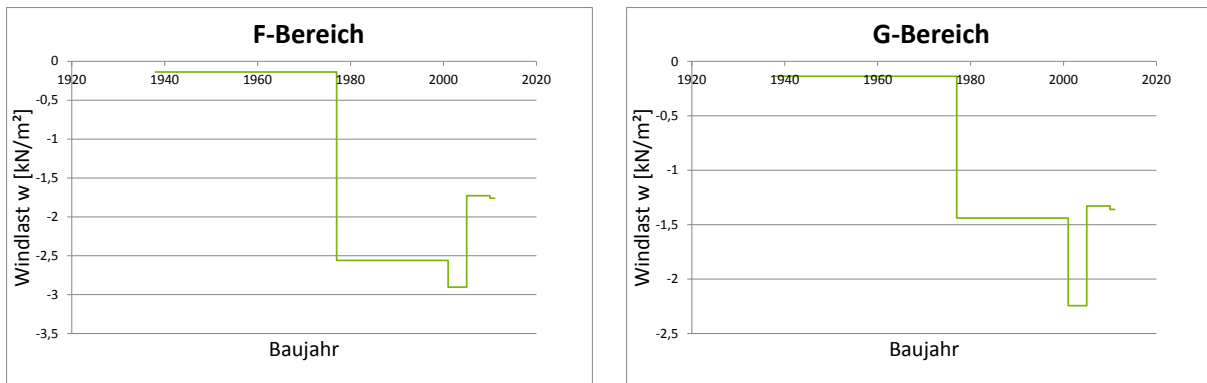


Abbildung 480: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

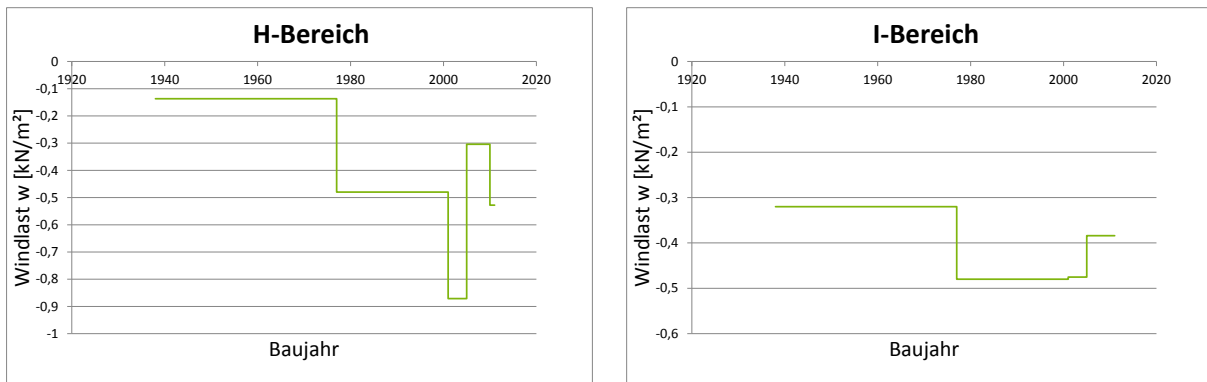


Abbildung 481: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

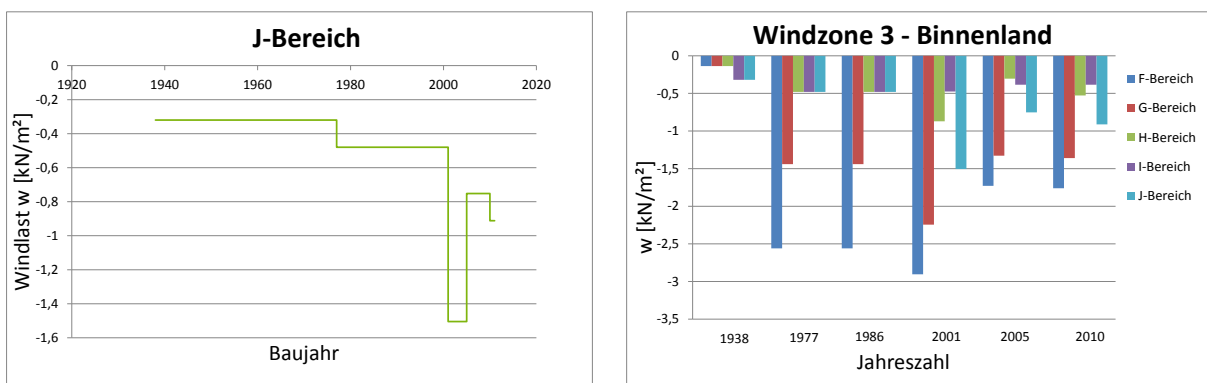


Abbildung 482: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.13 Halle C in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

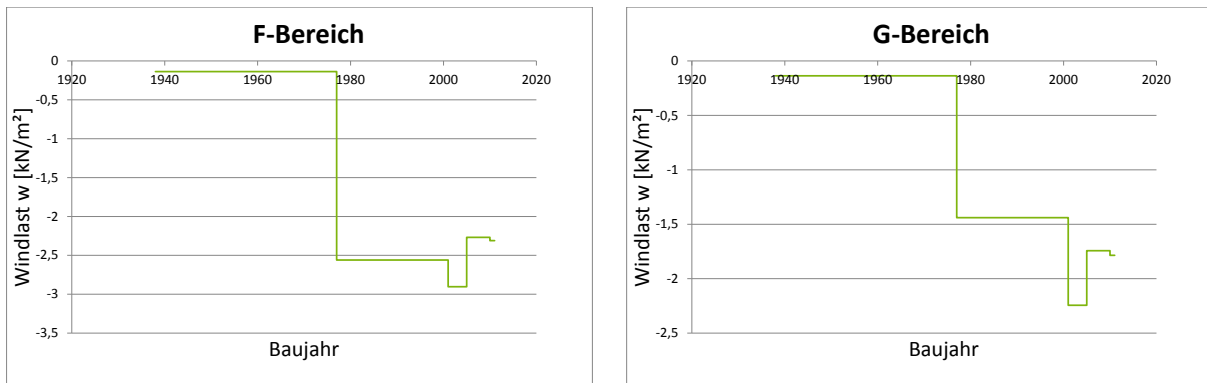


Abbildung 483: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

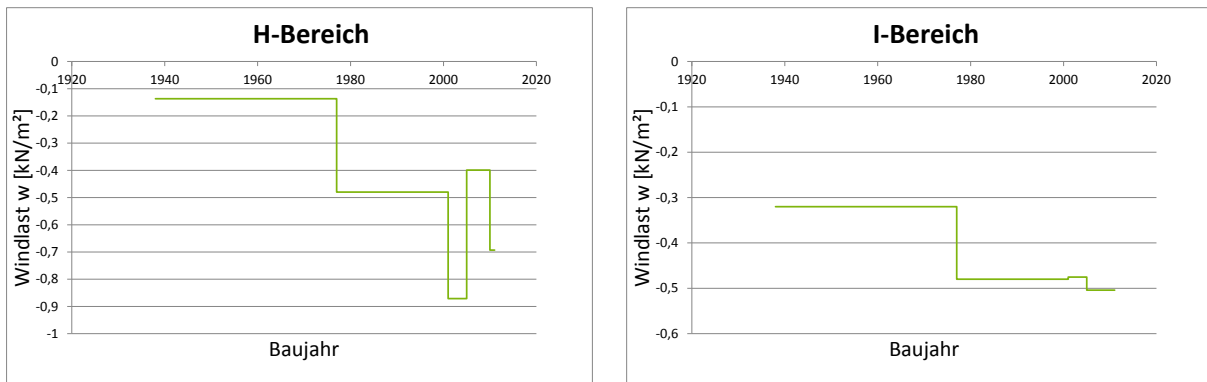


Abbildung 484: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

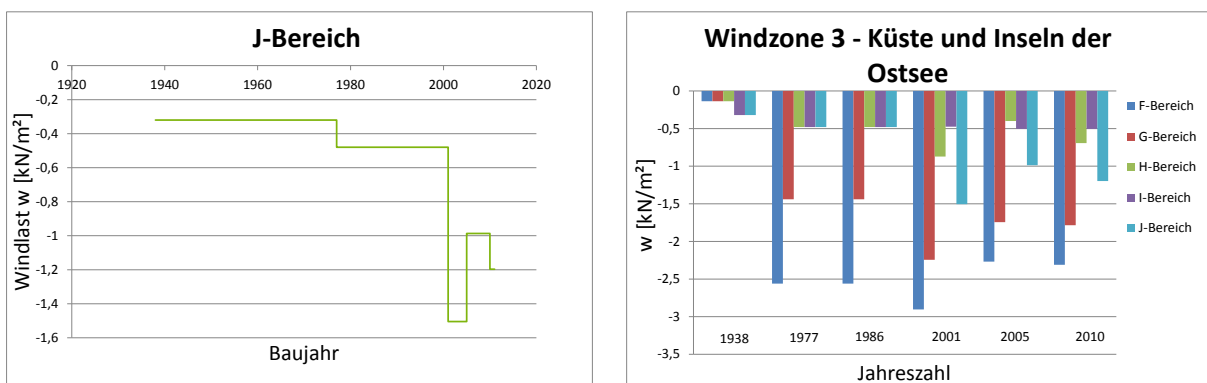


Abbildung 485: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.14 Halle C in der Windzone 4 Binnenland

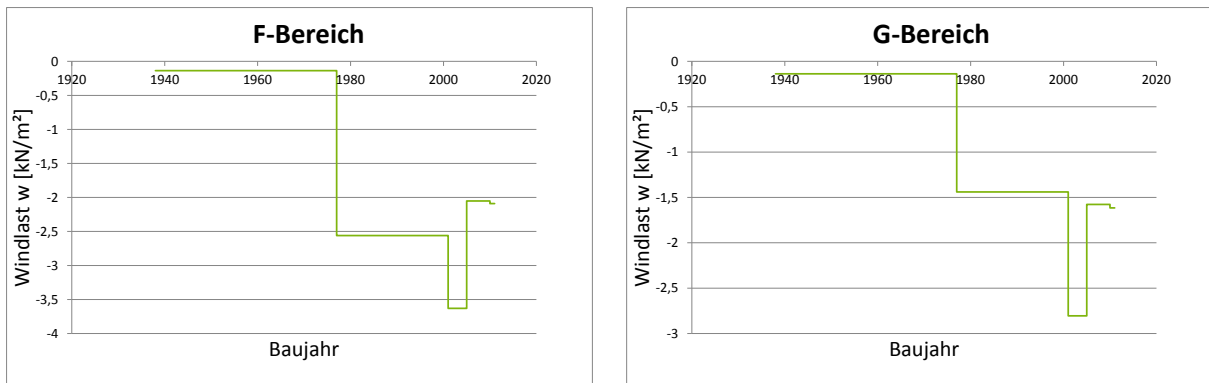


Abbildung 486: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

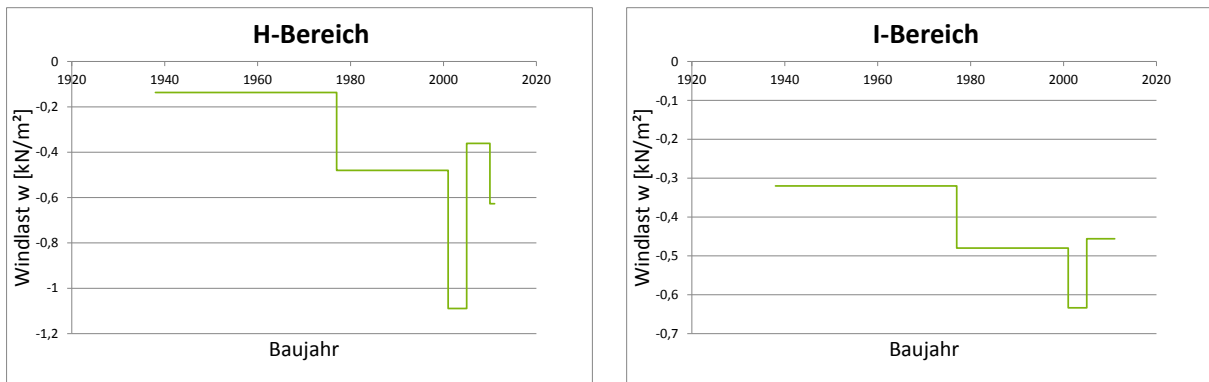


Abbildung 487: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

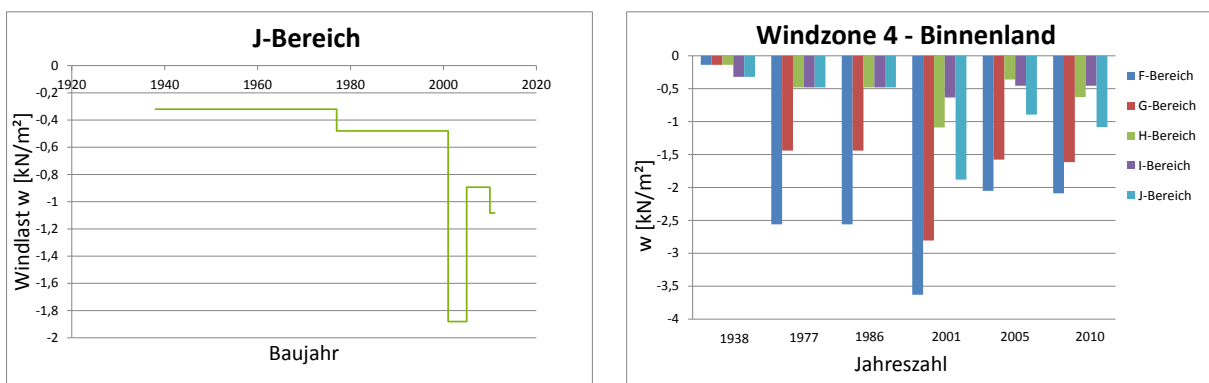


Abbildung 488: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.15 Halle C in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

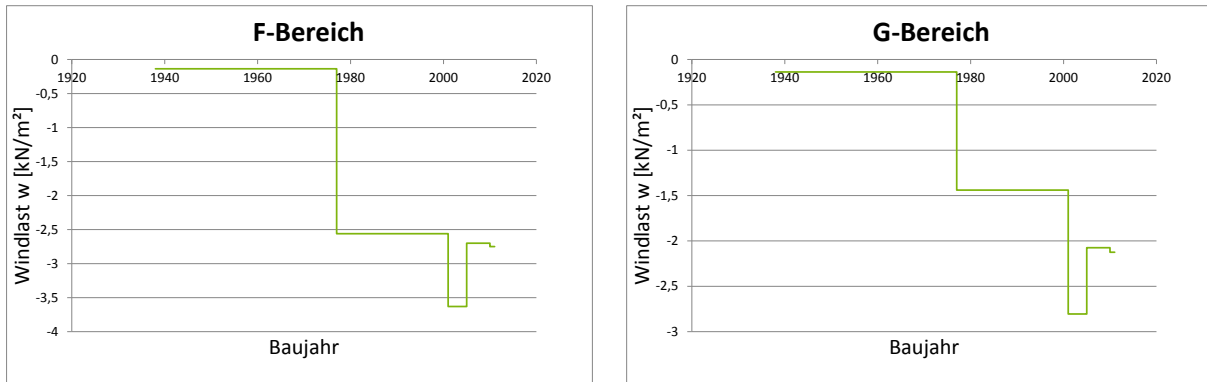


Abbildung 489: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

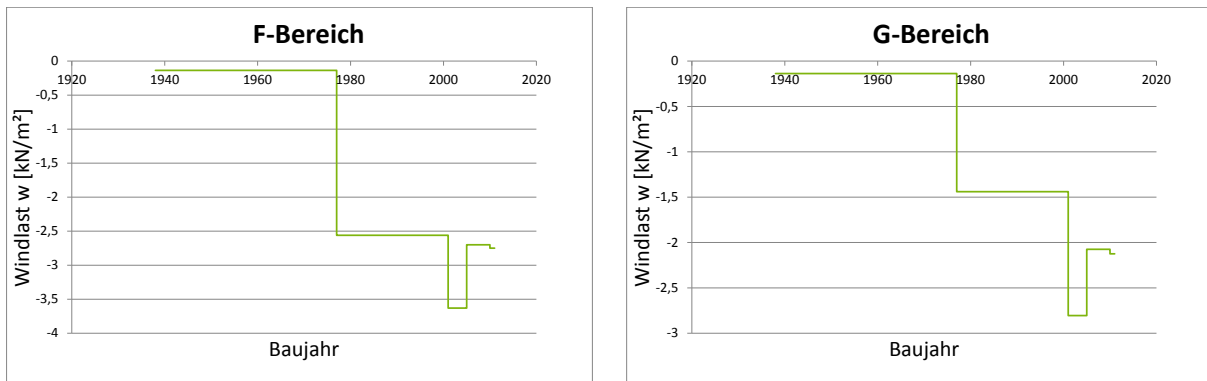


Abbildung 490: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

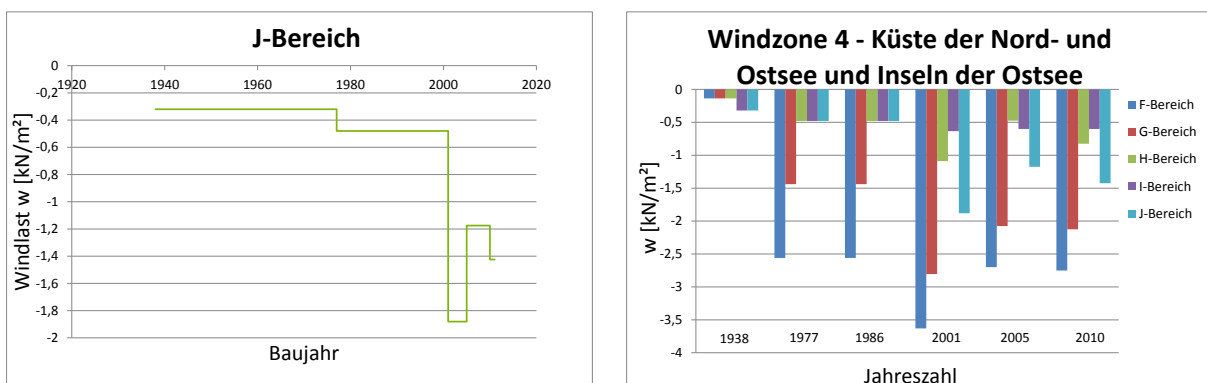


Abbildung 491: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.7.16 Halle C in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

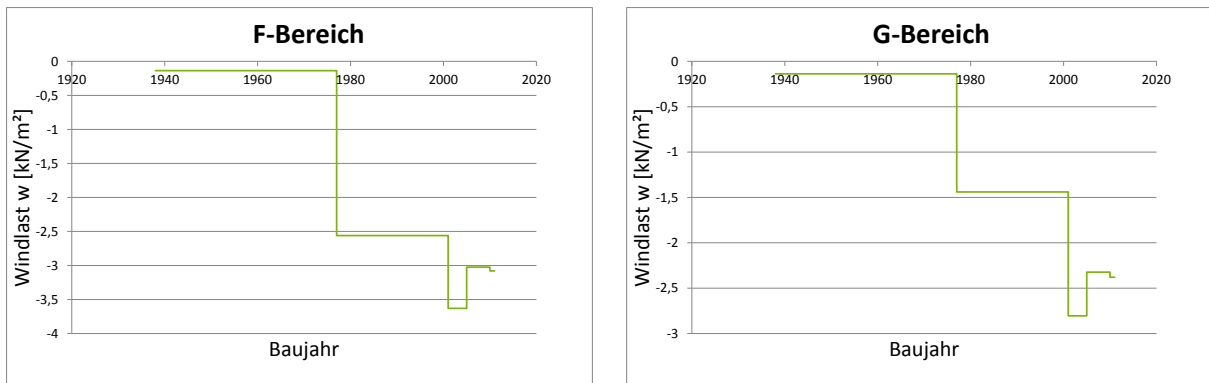


Abbildung 492: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

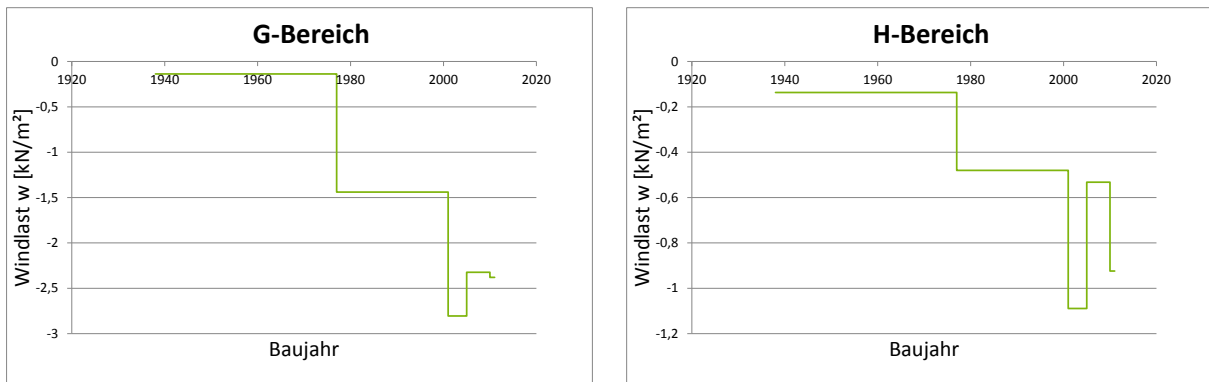


Abbildung 493: Halle C. Links: Bereich G. Rechts: Bereich H

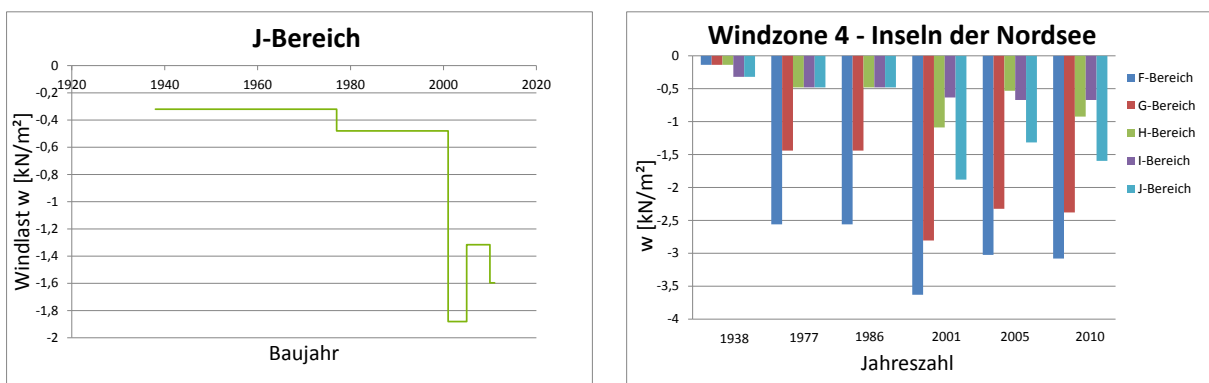


Abbildung 494: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8 Windlast auf Dächern für die lokale Bemessung in Ostdeutschland von 1964 bis 2010

5.8.1 Halle A und B (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

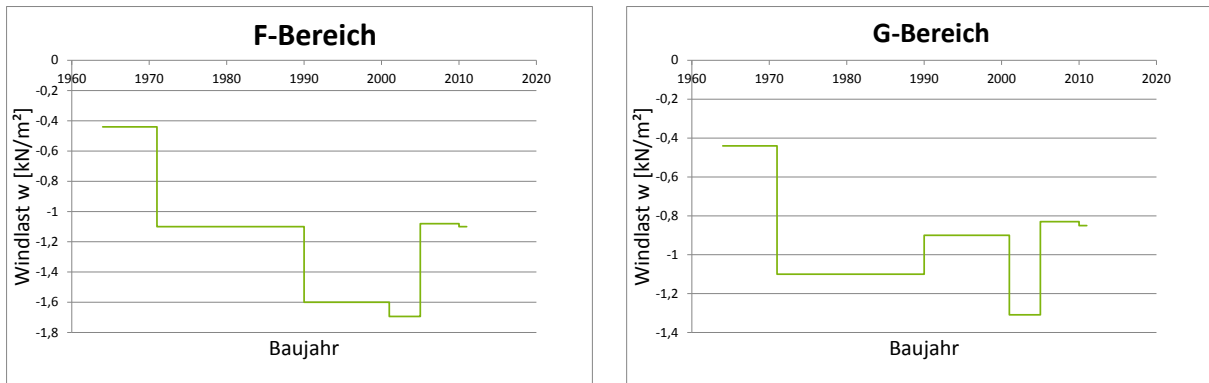


Abbildung 495: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

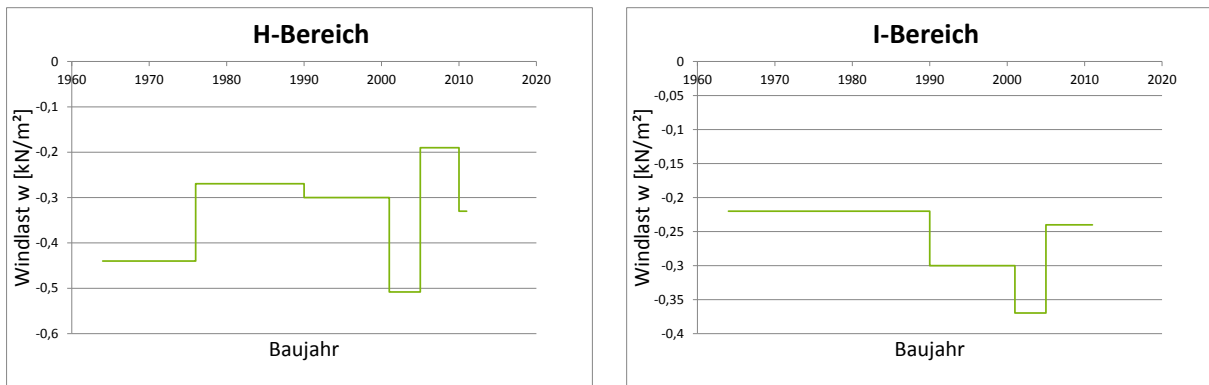


Abbildung 496: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

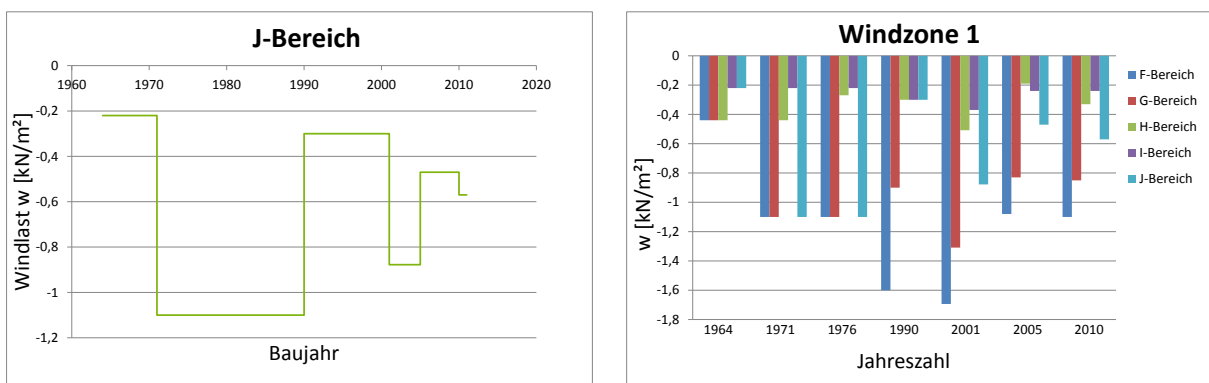


Abbildung 497: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.2 Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

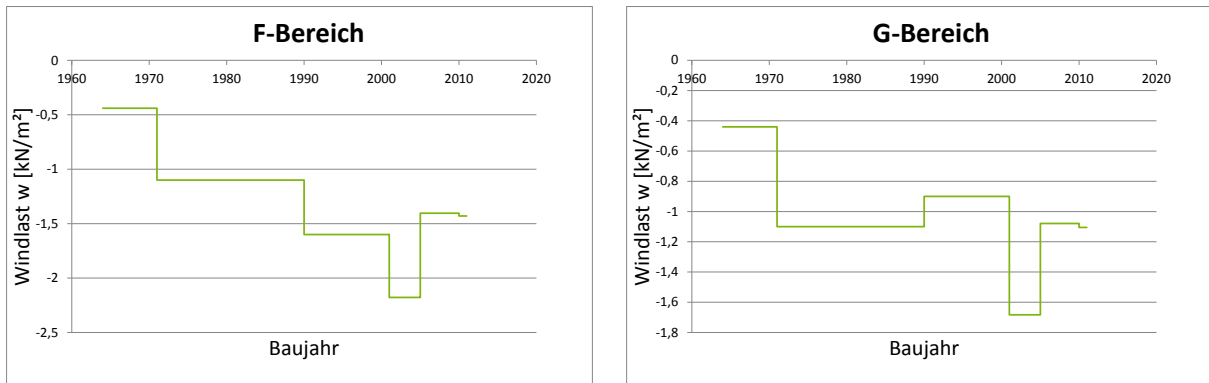


Abbildung 498: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

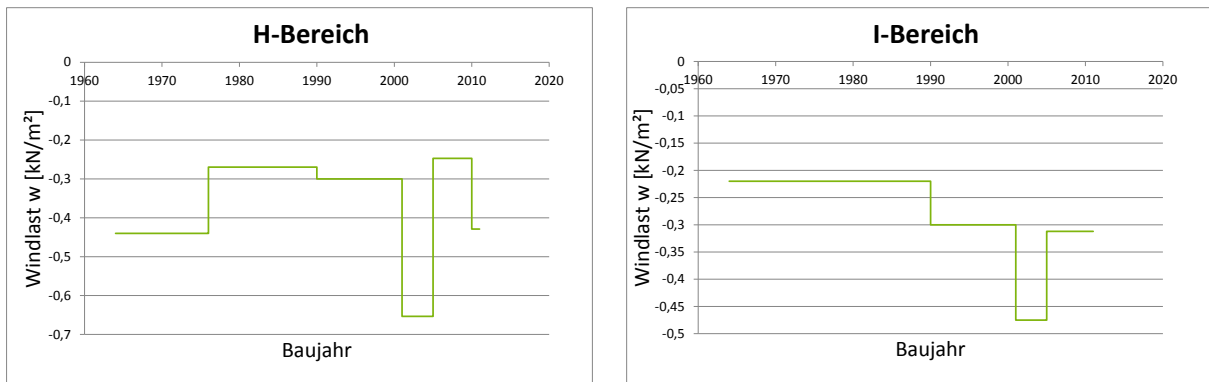


Abbildung 499: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

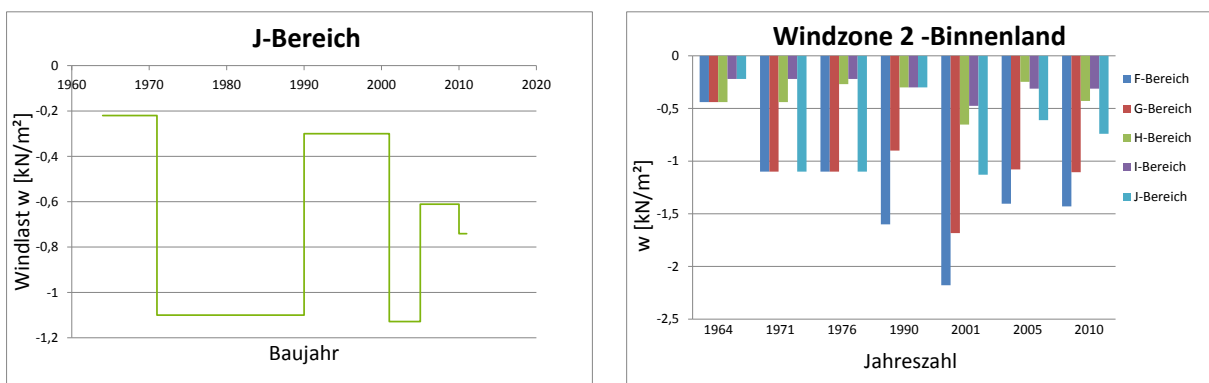


Abbildung 500: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.3 Halle A und B (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

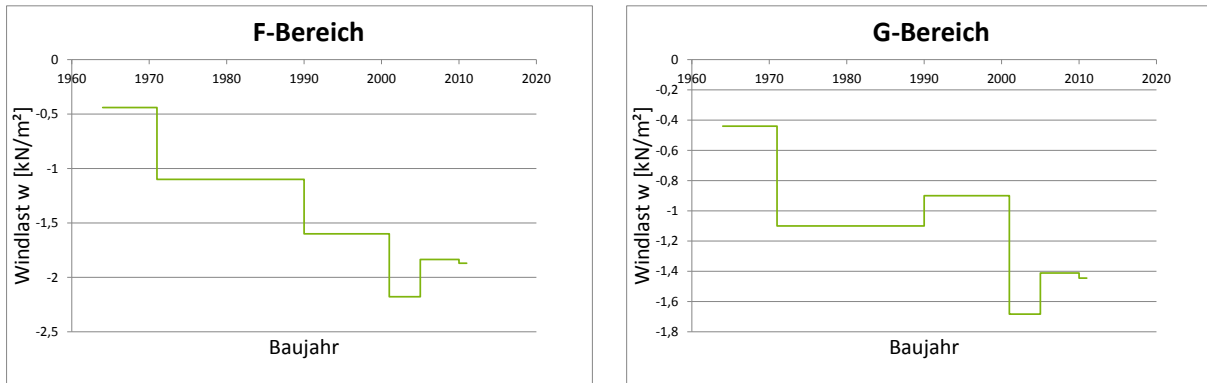


Abbildung 501: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

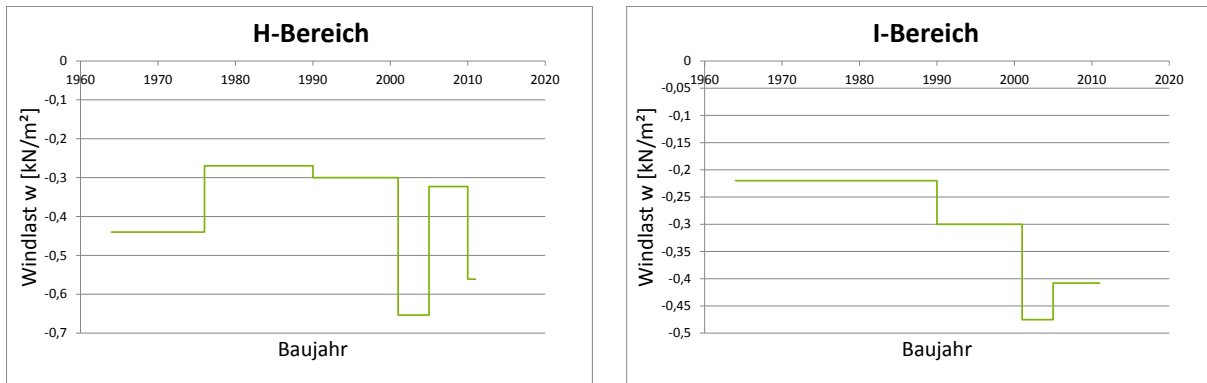


Abbildung 502: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich D

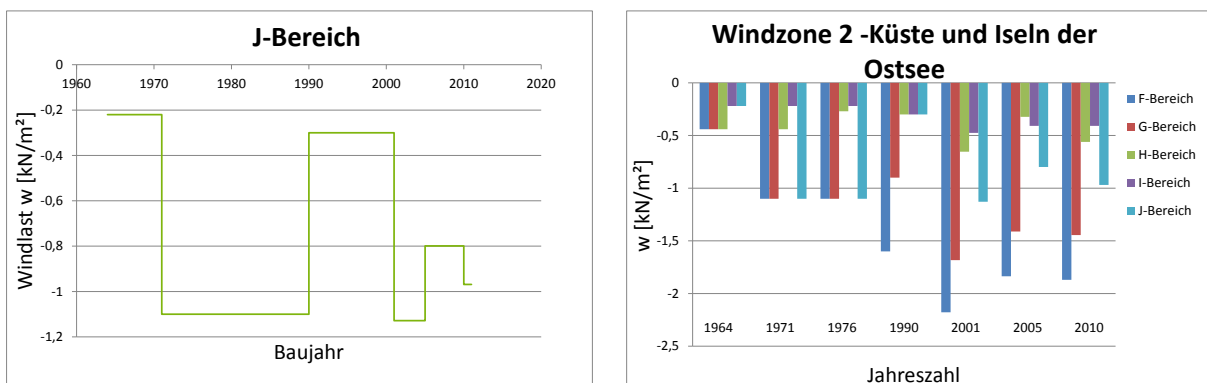


Abbildung 503: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.4 Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

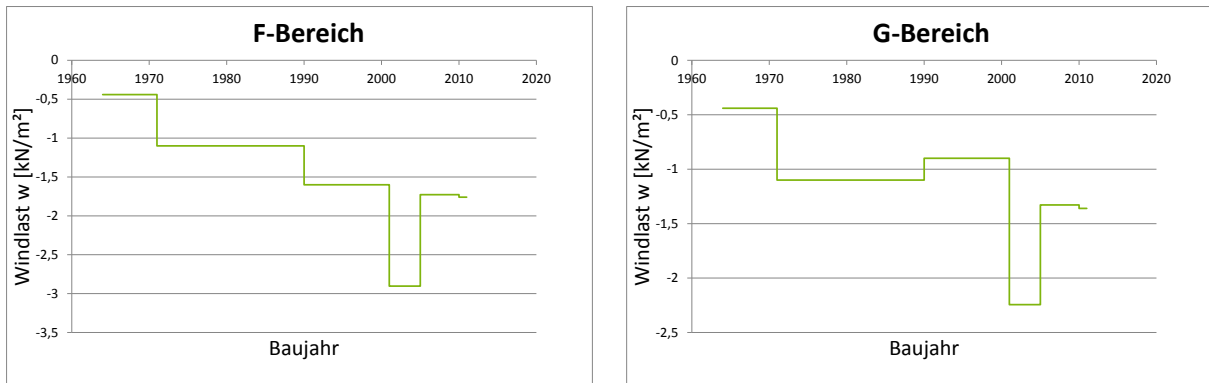


Abbildung 504: Halle F und G. Links: Bereich A. Rechts: Bereich B

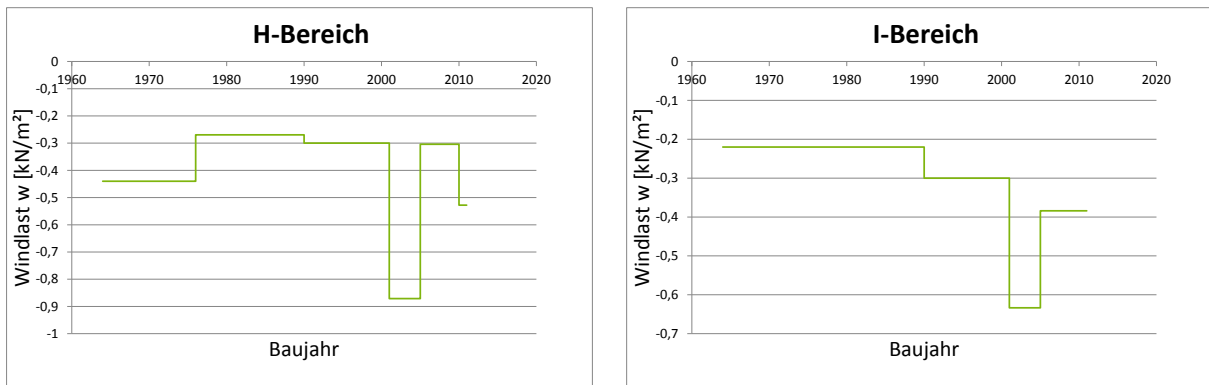


Abbildung 505: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

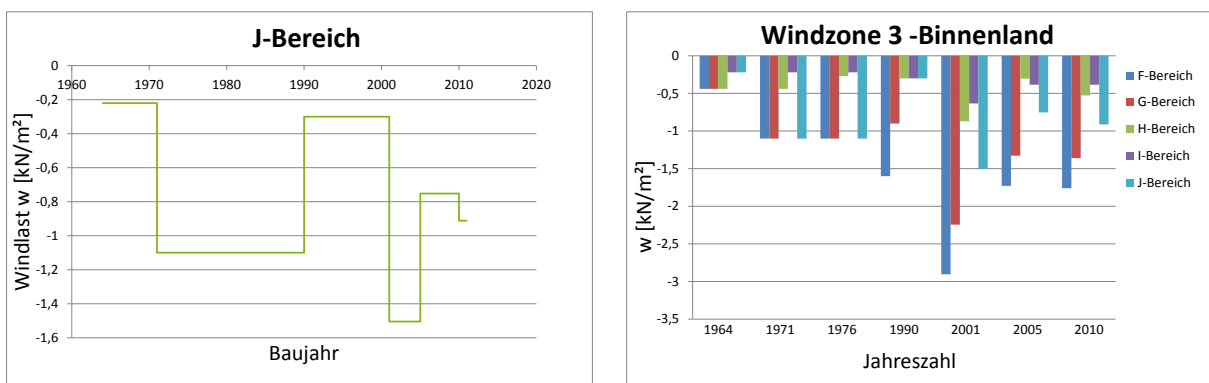


Abbildung 506: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.5 Halle A und B (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

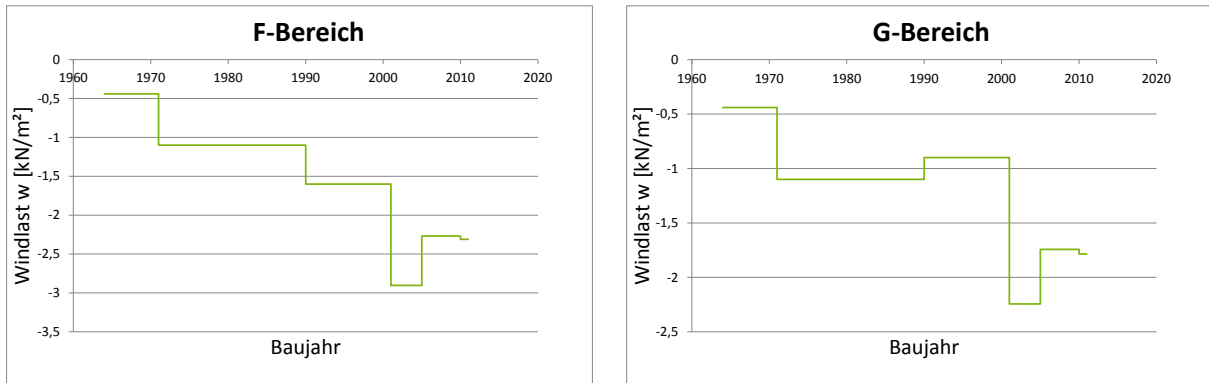


Abbildung 507: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

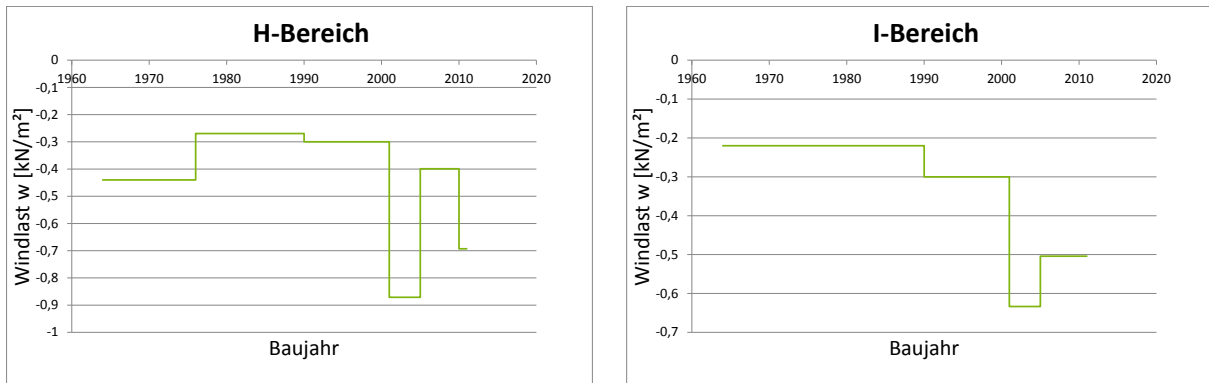


Abbildung 508: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

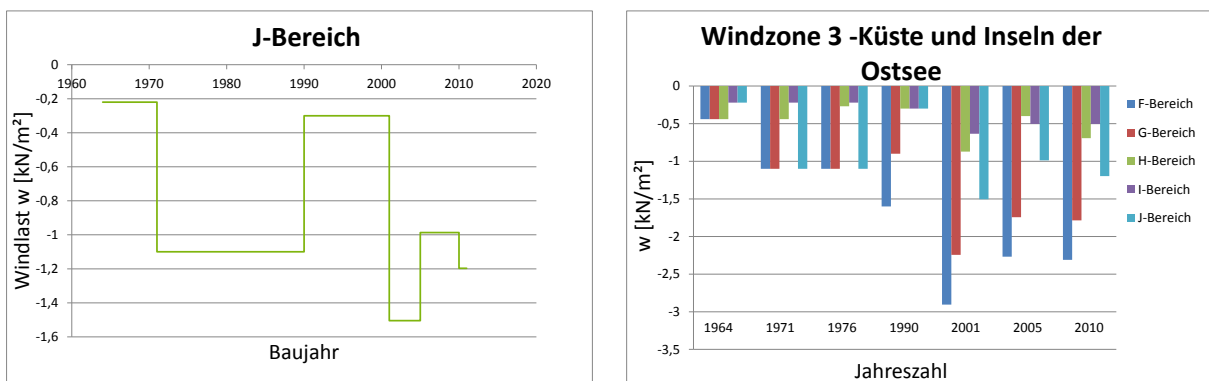


Abbildung 509: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.6 Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

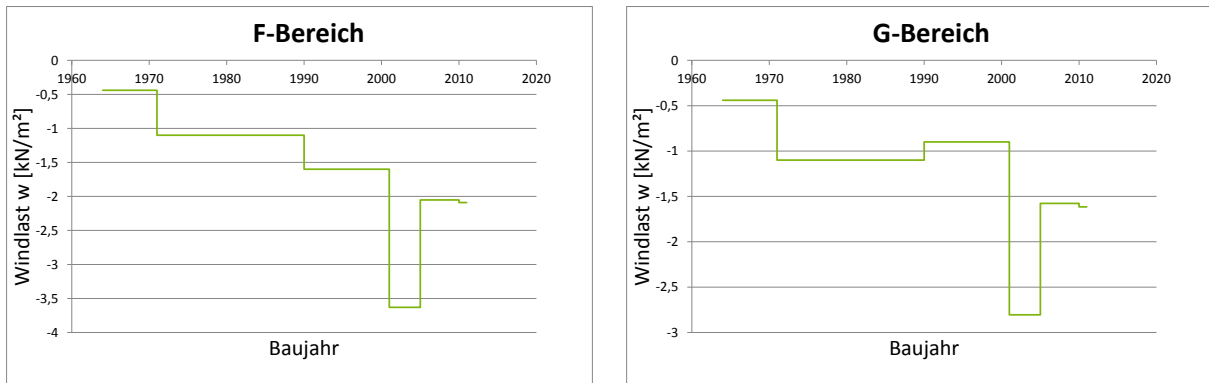


Abbildung 510: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

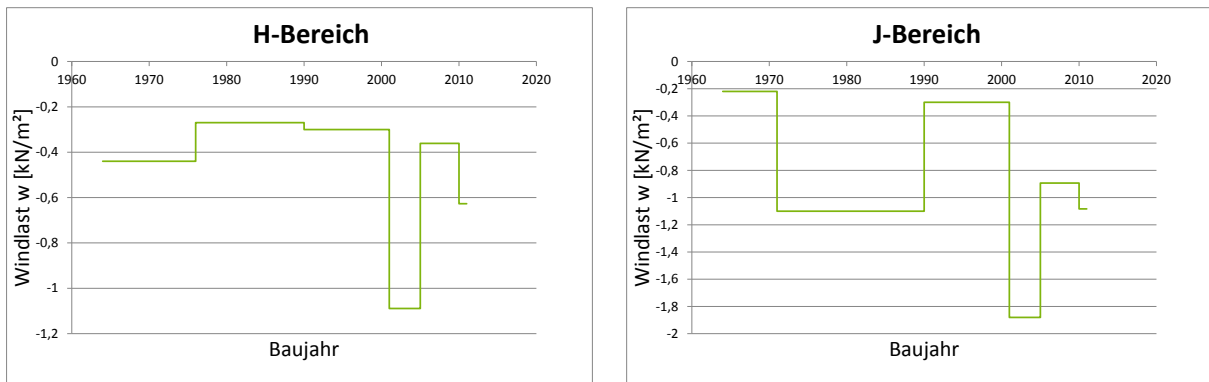


Abbildung 511: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

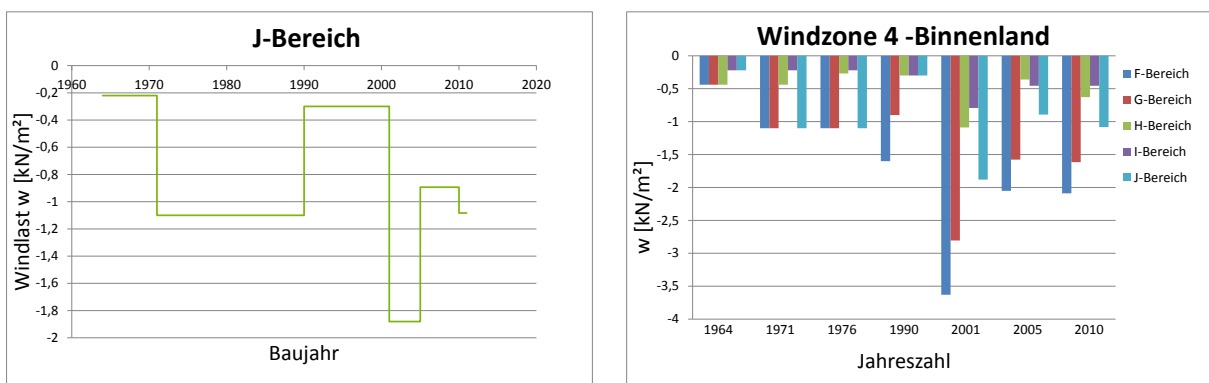


Abbildung 512: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.7 Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

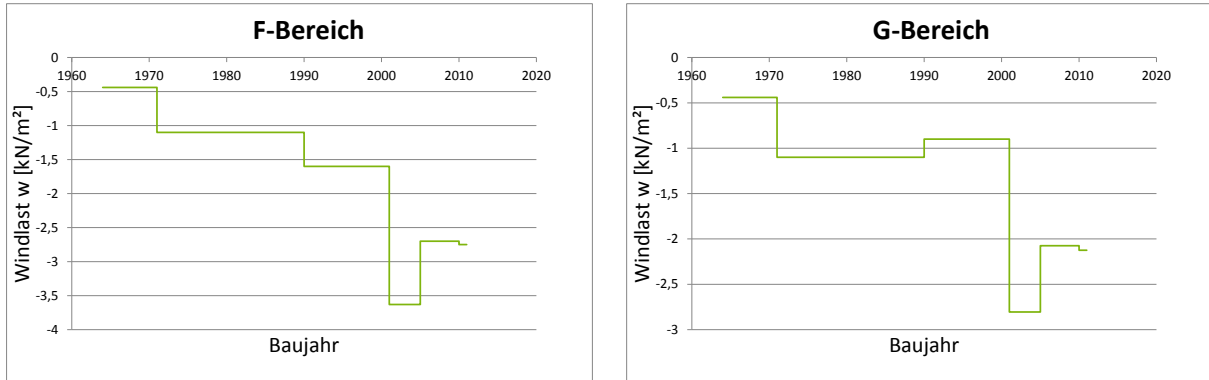


Abbildung 513: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

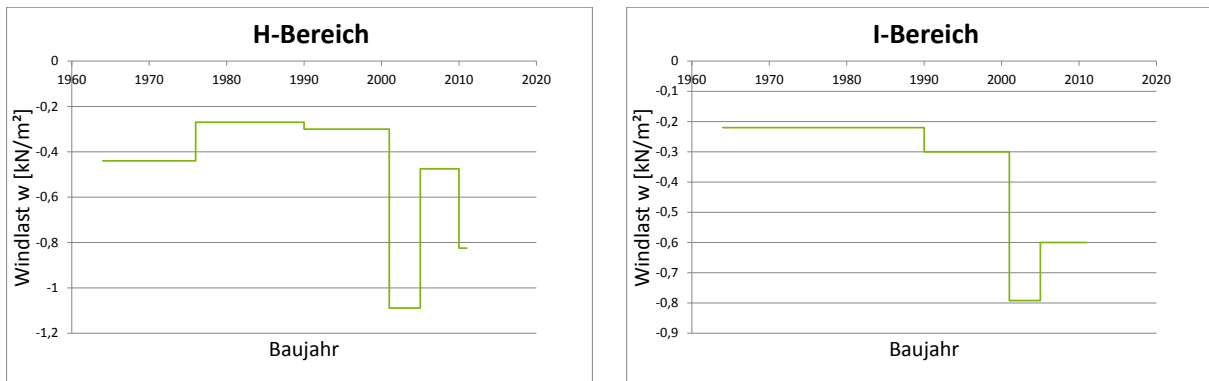


Abbildung 514: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

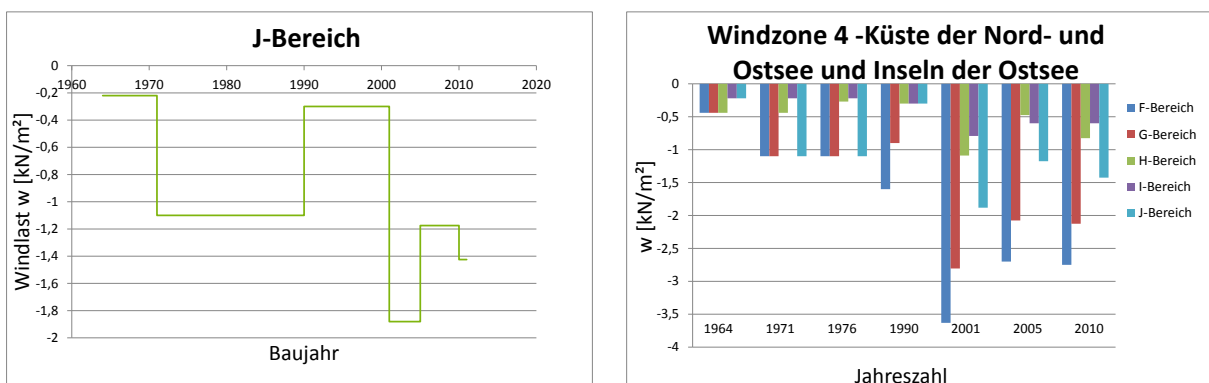


Abbildung 515: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.8 Halle A und B (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

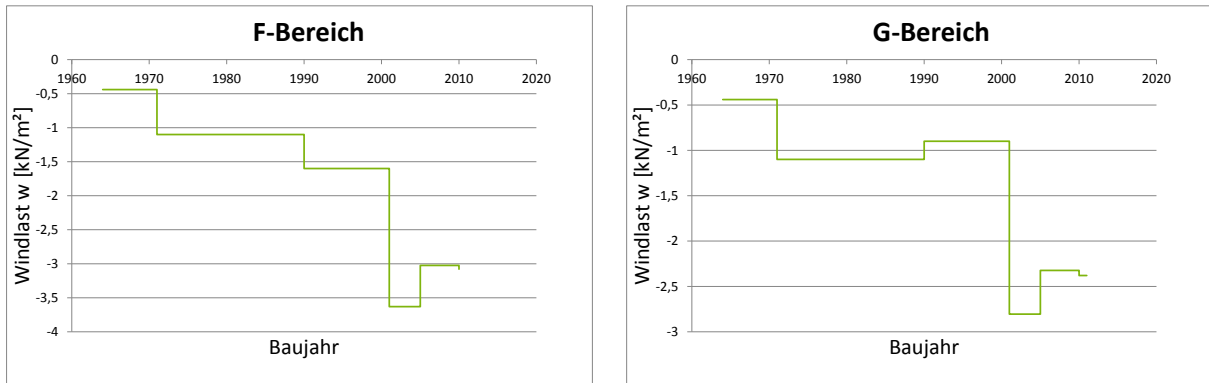


Abbildung 516: Halle A und B. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

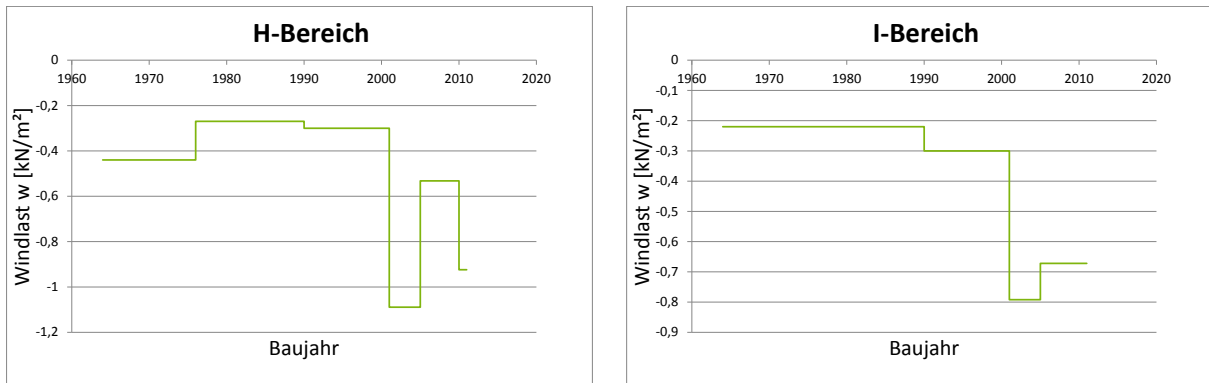


Abbildung 517: Halle A und B. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

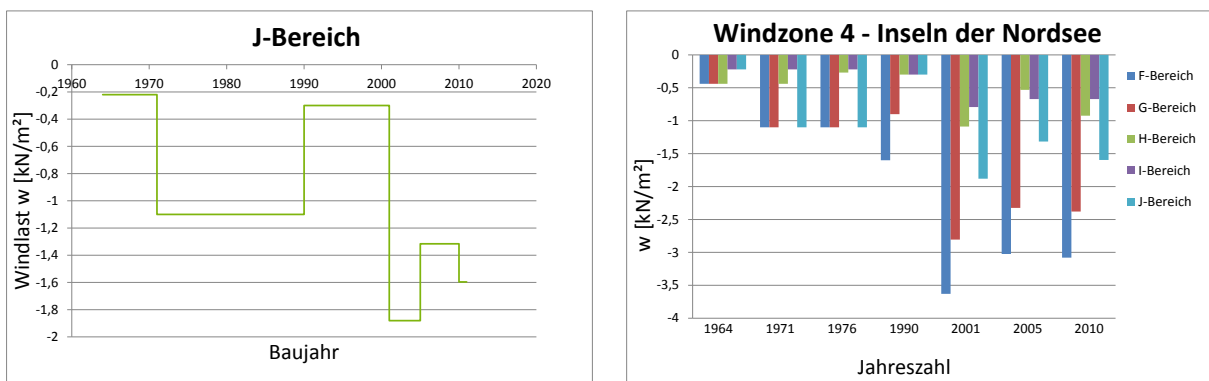


Abbildung 518: Halle A und B. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.9 Halle C (DDR) in der Windzone 1 Binnenland

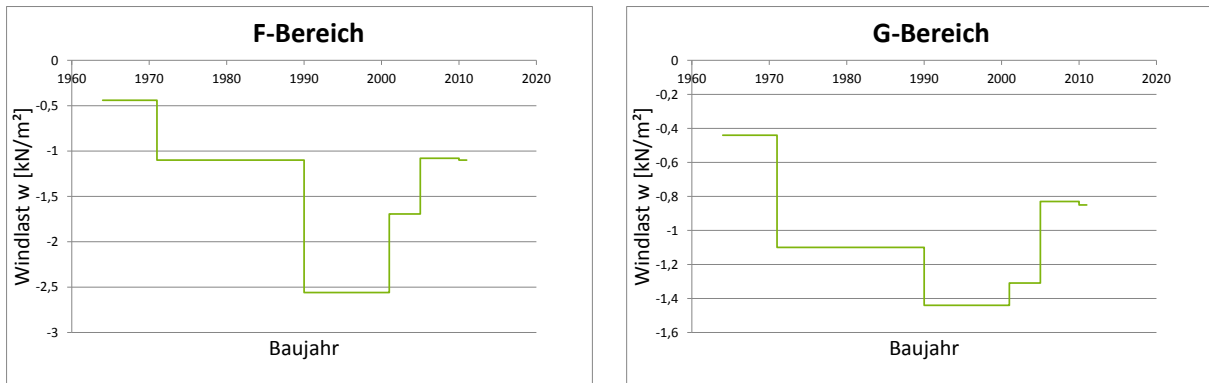


Abbildung 519: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

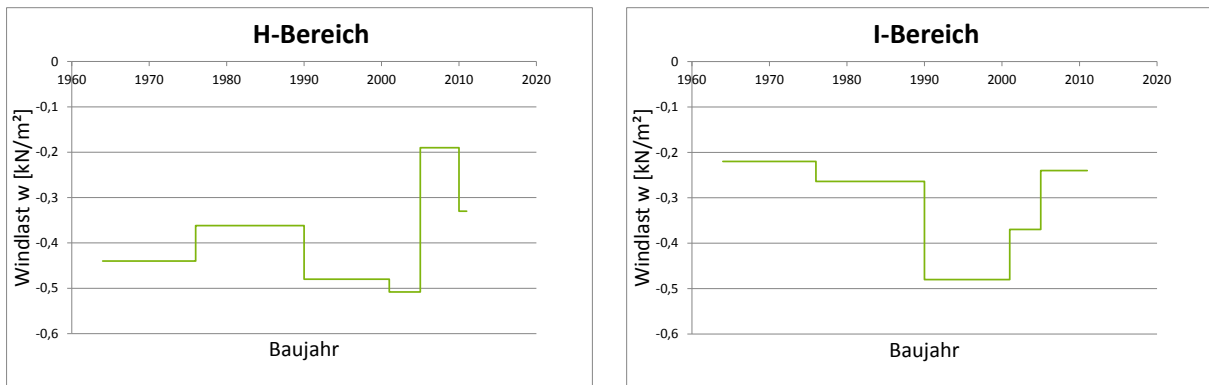


Abbildung 520: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

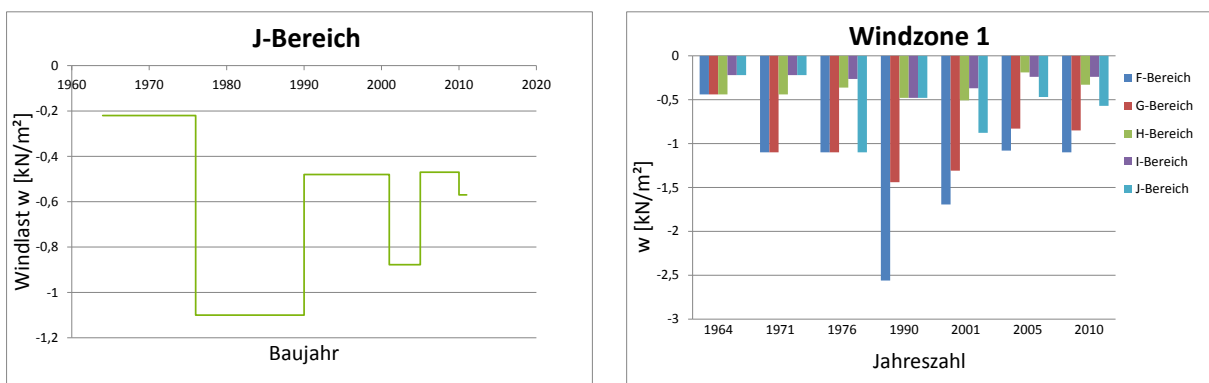


Abbildung 521: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.10 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Binnenland

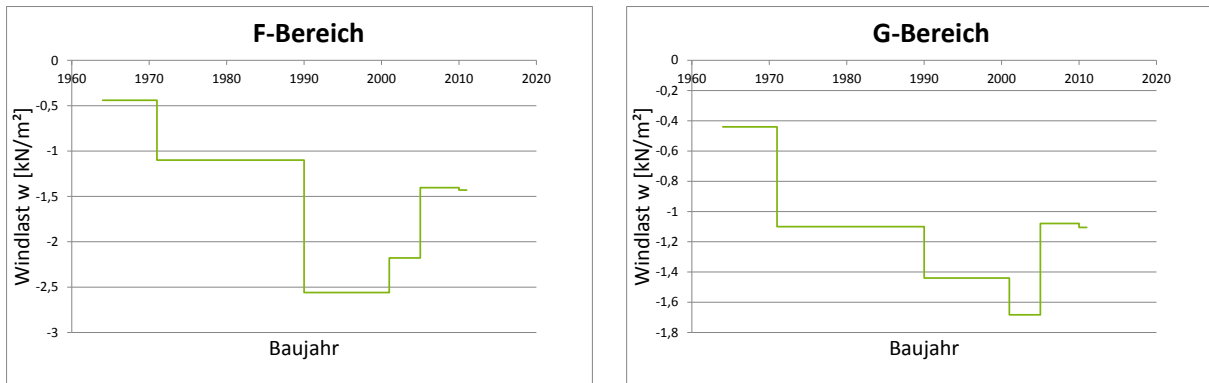


Abbildung 522: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

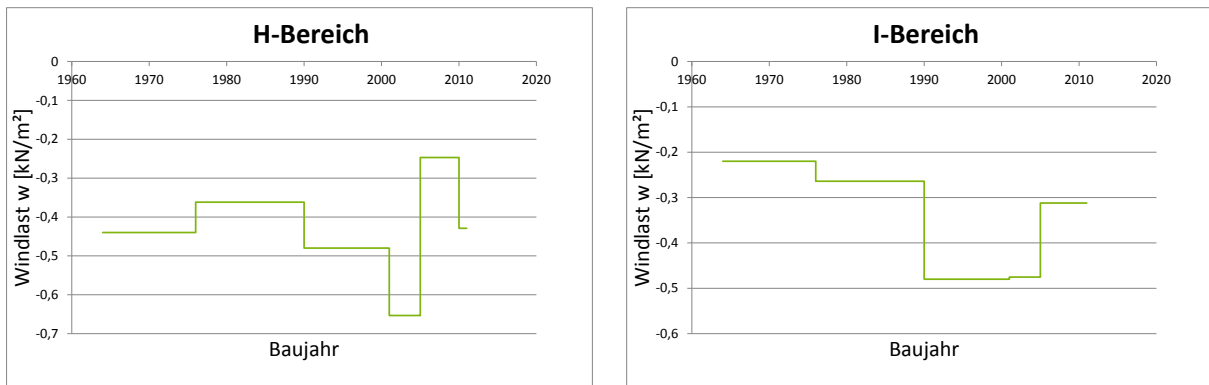


Abbildung 523: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

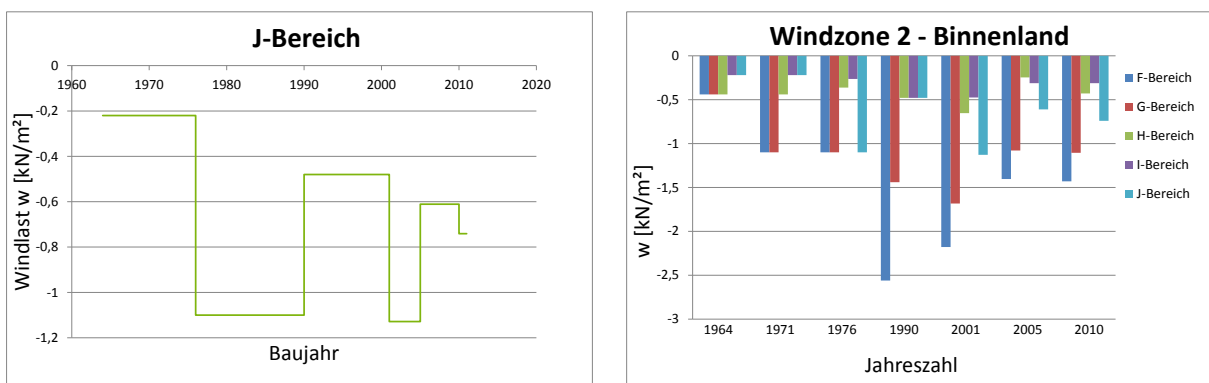


Abbildung 524: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.11 Halle C (DDR) in der Windzone 2 Küste und Inseln der Ostsee

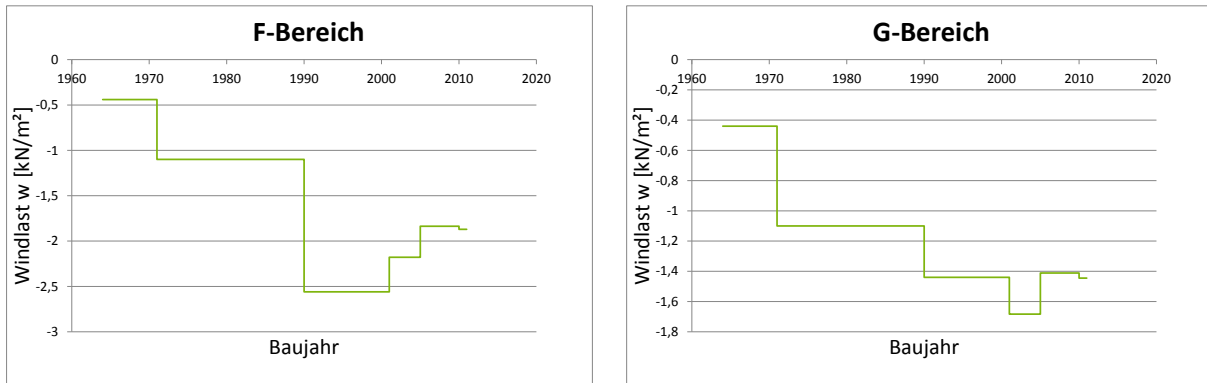


Abbildung 525: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

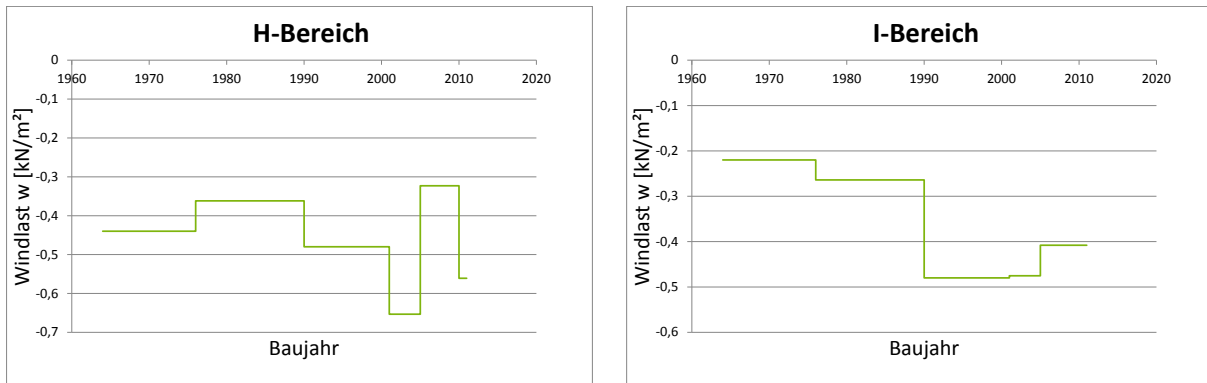


Abbildung 526: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

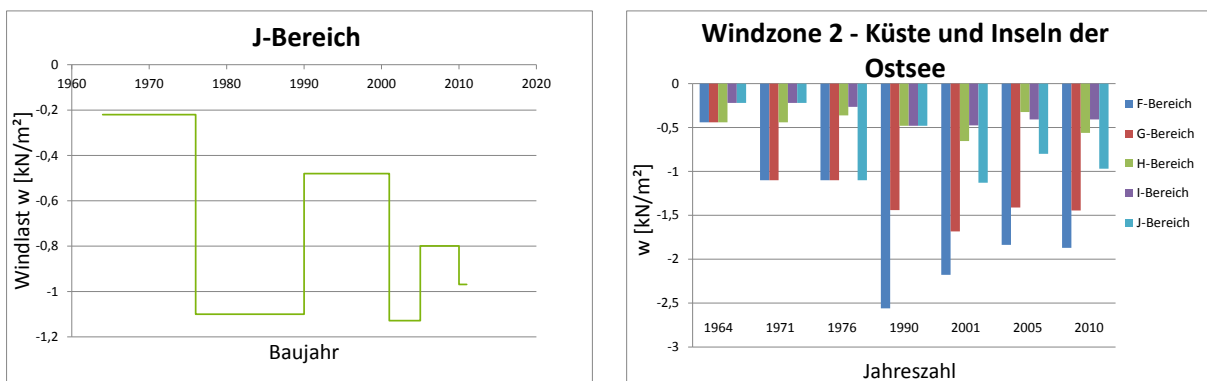


Abbildung 527: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.12 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Binnenland

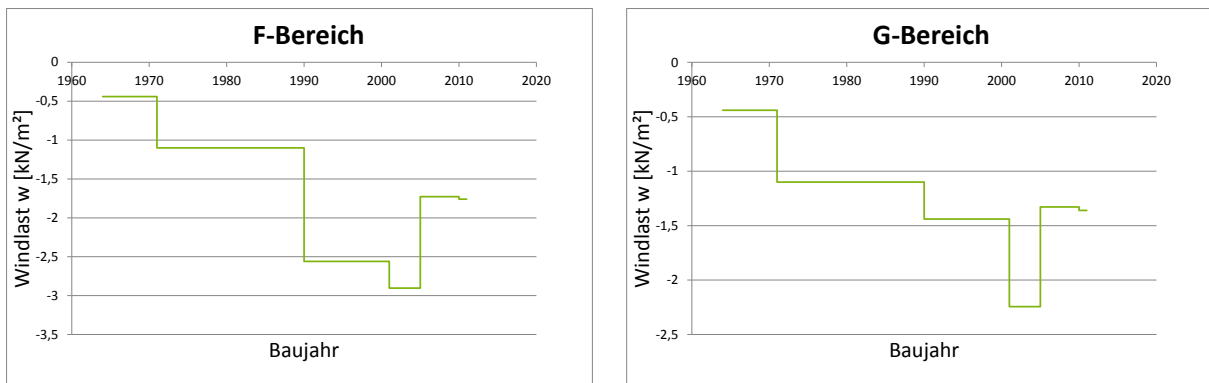


Abbildung 528: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

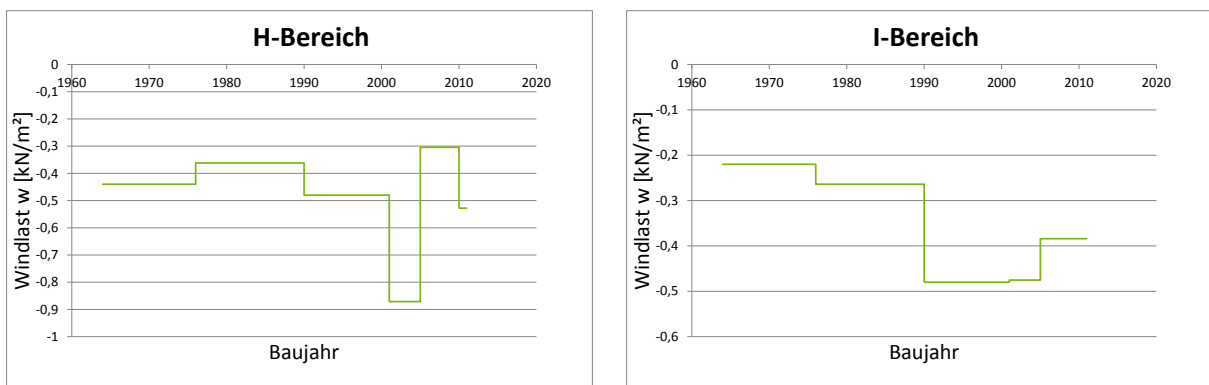


Abbildung 529: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

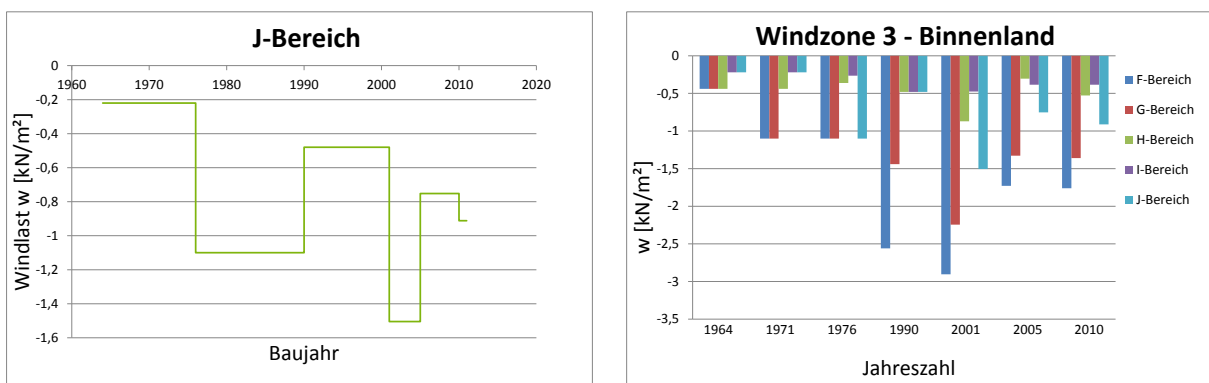


Abbildung 530: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.13 Halle C (DDR) in der Windzone 3 Küste und Inseln der Ostsee

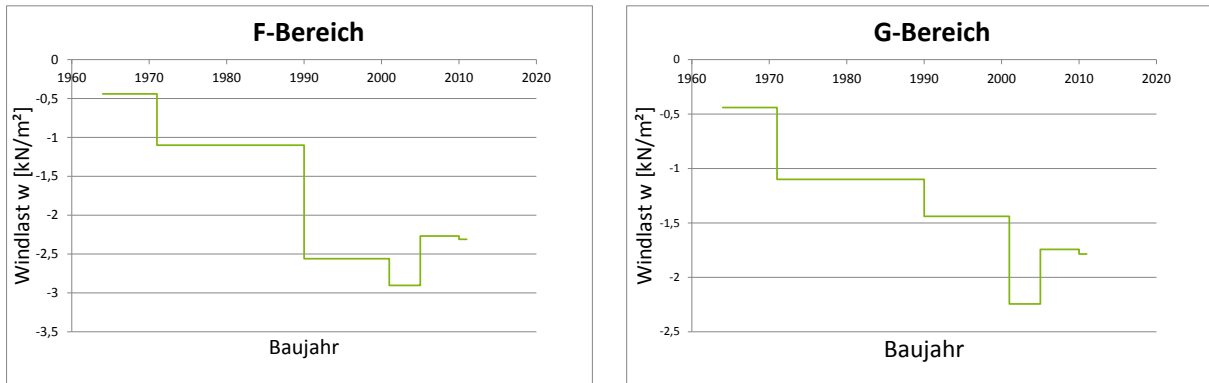


Abbildung 531: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

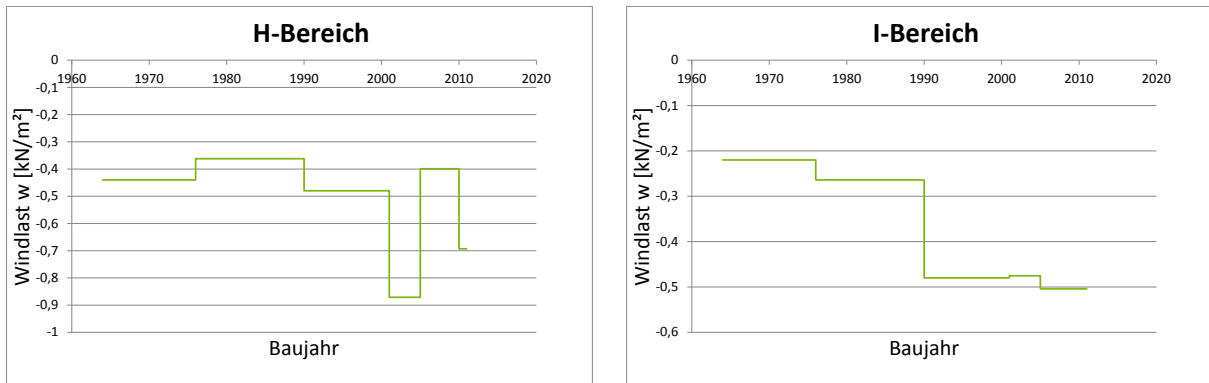


Abbildung 532: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

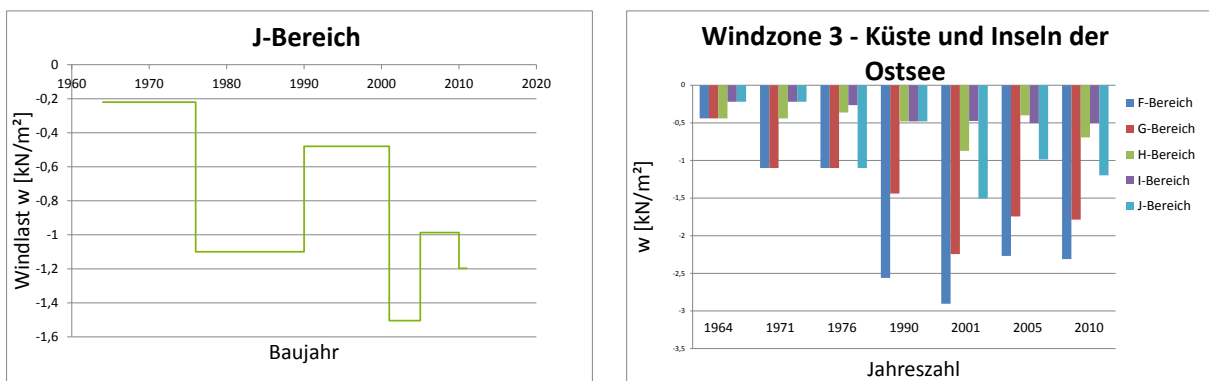


Abbildung 533: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.14 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Binnenland

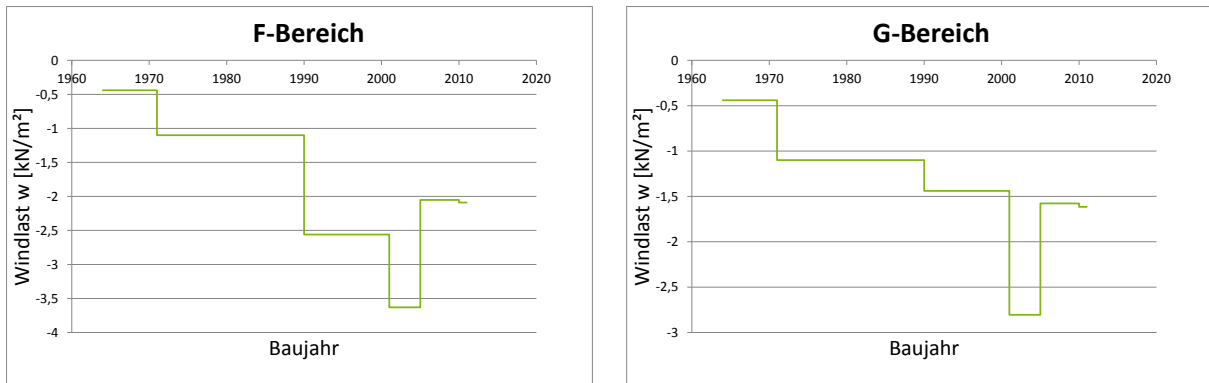


Abbildung 534: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

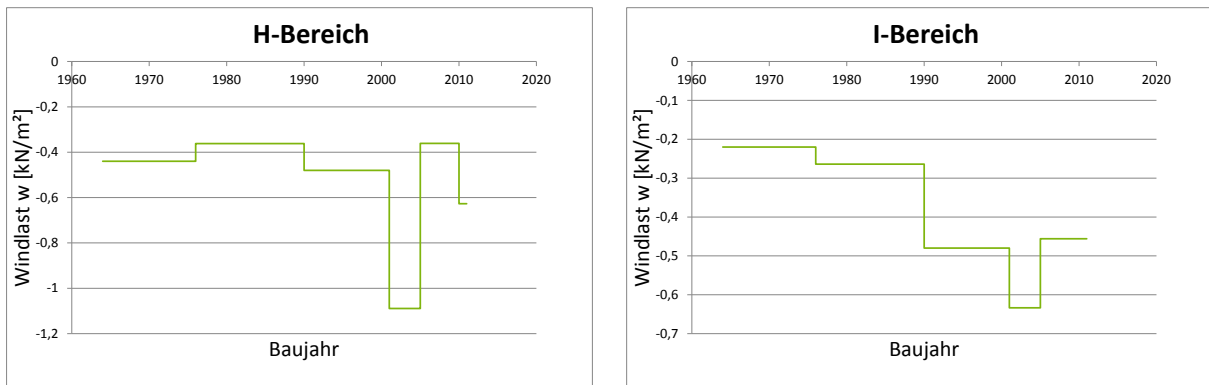


Abbildung 535: Halle C. Links: Bereich H. Rechts: Bereich I

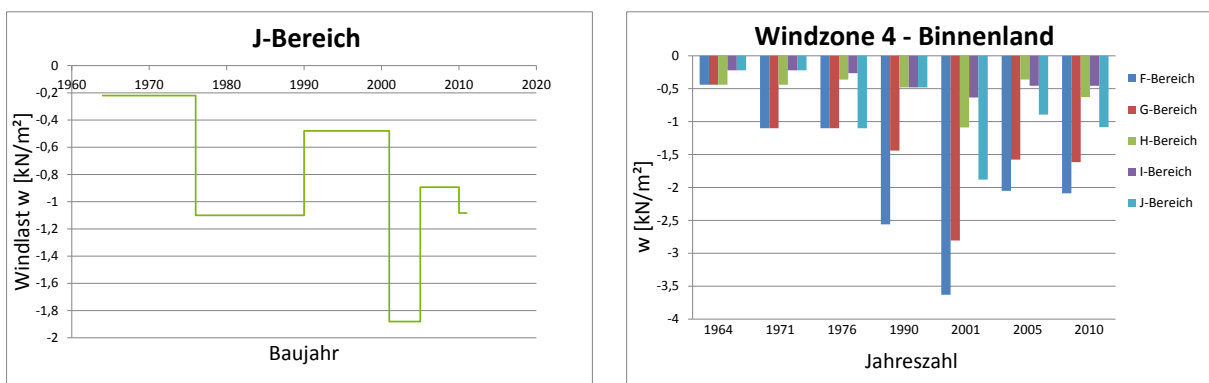


Abbildung 536: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.15 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee

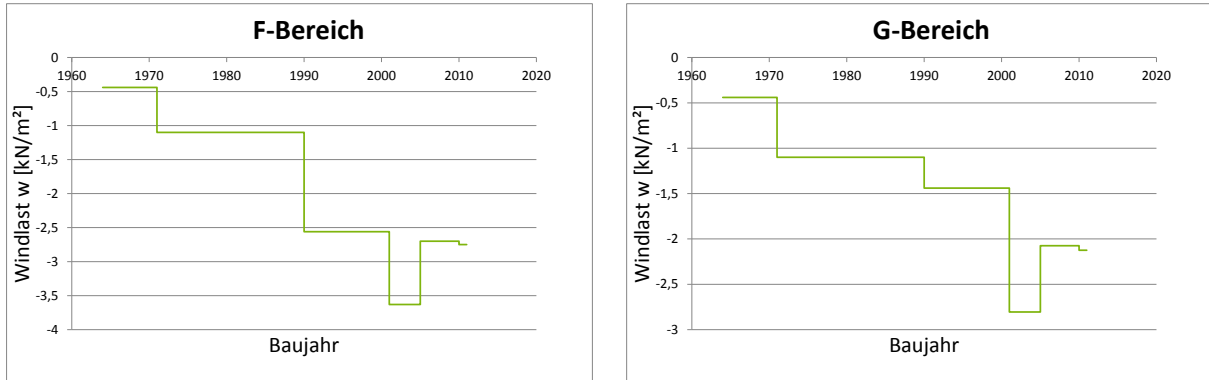


Abbildung 537: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

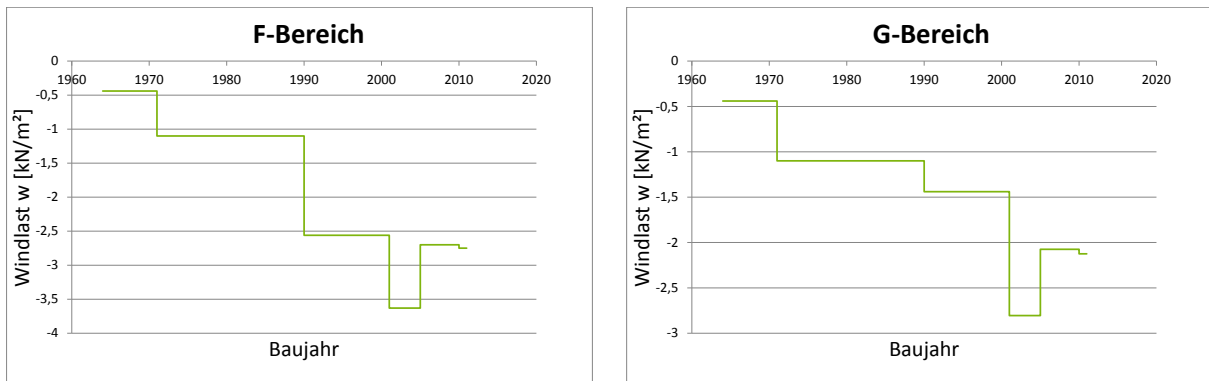


Abbildung 538: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

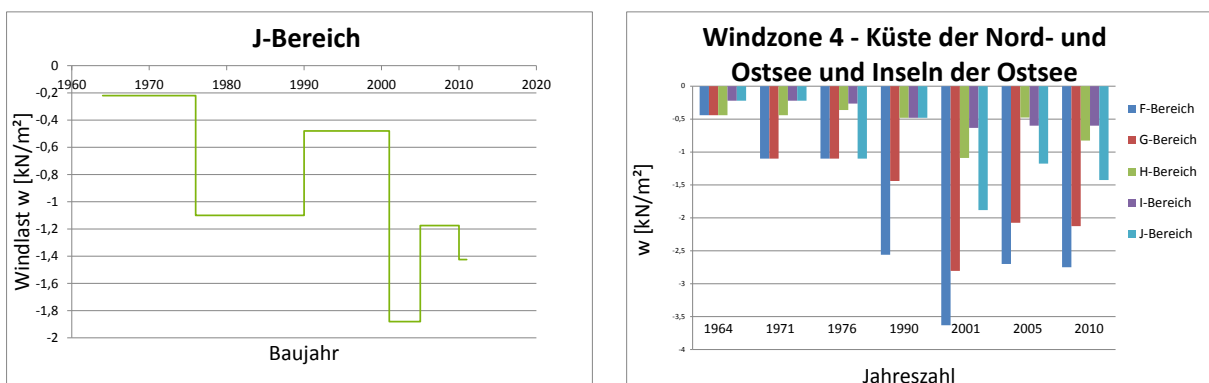


Abbildung 539: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

5.8.16 Halle C (DDR) in der Windzone 4 Inseln der Nordsee

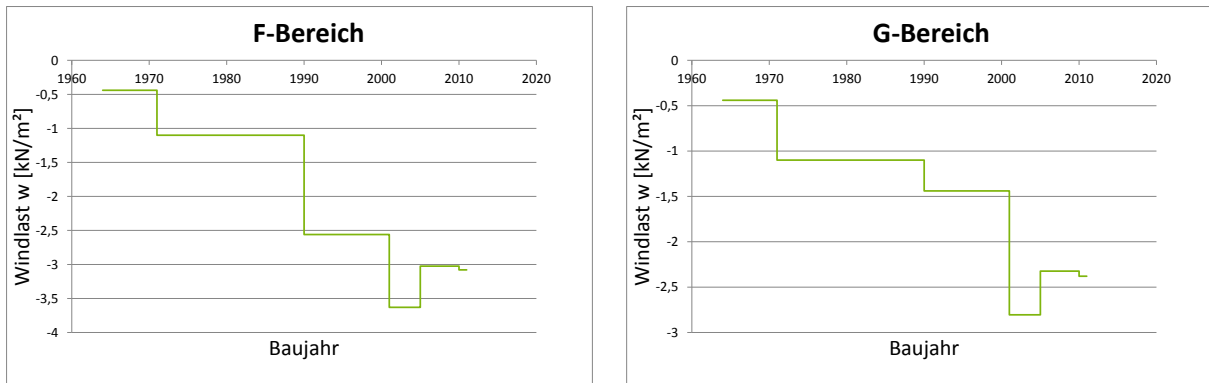


Abbildung 540: Halle C. Links: Bereich F. Rechts: Bereich G

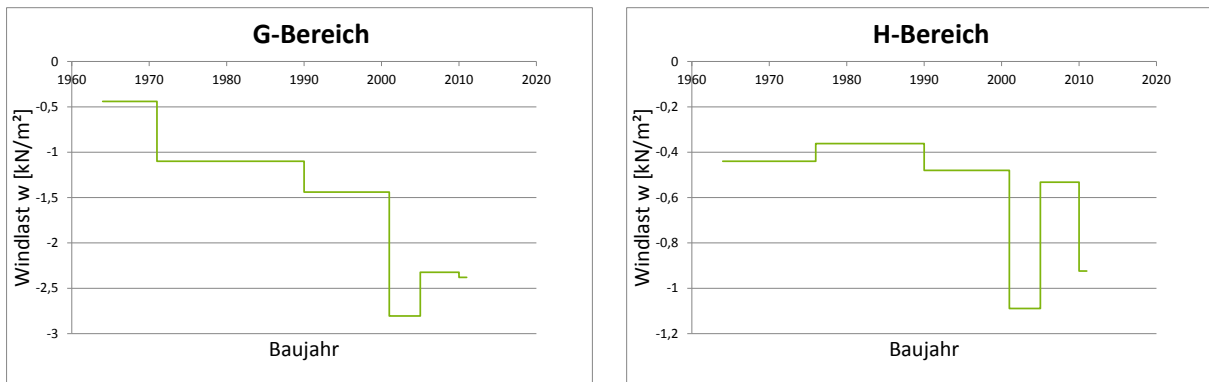


Abbildung 541: Halle C. Links: Bereich G. Rechts: Bereich H

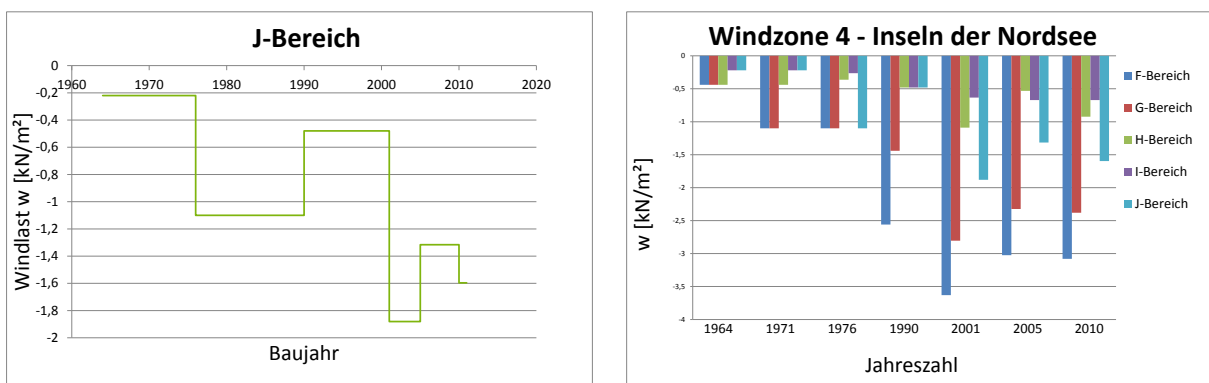


Abbildung 542: Halle C. Links: Bereich J. Rechts: Überblick über alle Bereiche

6 Fazit - Wind

Insgesamt lässt sich sagen, dass insbesondere der Windsog in der Norm von 1938 bereichsweise betragsmäßig deutlich unter den Windsogkräften liegt, die nach dem Eurocode anzusetzen sind. Am erheblichsten zeigt sich diese Abweichung im Bereich A. Also in dem Bereich, der parallel zur Windrichtung verläuft und in der Norm von 1938 keine Berücksichtigung erfahren hat.

Eine Ausnahme ist der E-Bereich. In vereinzelten Fällen wurde die anzusetzende Belastung im Eurocode geringer.

Der Winddruck verringerte sich lediglich in der Windzone 1. In allen anderen Windzonen liegt die heutzutage anzusetzende Belastung über den Werten aus Vorgängernormen.

Die Ausgabe von 1986 ist, gerade in den Windzonen mit geringen Einwirkungen (Windzone 1 und 2) abgesehen vom A-Bereich, konservativer als der Eurocode. Dies gilt sowohl für den Druck- als auch für den Sogbereich. In den Zonen 3 und 4 sind die betragsmäßigen Werte des EC1 jedoch größer als die der Norm von 1986.

Der Normentwurf von 2001 ist von allen betrachteten Normen der konservativste.

Die Normen der DDR sind im Vergleich zum Eurocode bei der Wandbemessung lediglich stellenweise in der Windzone 1 und 2 größer. Bei den Werten für die Dachfläche kommt es auch in den Windzonen 3 und 4 in einigen Bereichen zu höheren Werten. Bei der lokalen Bemessung werden in den höheren Windzonen die Größen des Eurocodes nicht erreicht. Sogspitzen treten bei der TGL von 1964 erst gar nicht auf.

Ein pauschaler Umrechnungsfaktor zwischen den einzelnen Ausgaben ist jedoch nicht zu erkennen. Die Veränderungen variieren dabei stark in der Größenordnung. Die anzusetzende Belastung kann bis auf das vierfache oder mehr ansteigen. Je nach geographischer Lage und Geometrie kann es vorkommen, dass die Windlast nicht erhöht, sondern verringert werden muss.

7 Veränderungen der Schneelastnormen

7.1 1936

In der DIN 1055-5 aus dem Jahr 1936 wird die anzusetzende Schneelast in Abhängigkeit der Dachneigung angegeben und kann Abbildung 543 entnommen werden.

$\alpha =$	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	über 60°
S =	75	70	65	60	55	50	45	40	35	0 kg/m ²

Abbildung 543: Anzusetzende Schneelast nach DIN 1055-5 1936 [8]

Zusätzlich wird auf die mögliche Gefahr der Schneesackbildung hingewiesen und darauf, dass diese Werte bei Bauwerken, welche in Gebirgen errichtet werden, anzupassen sind. Außerdem müssen die Lastfälle volle und einseitige Schneelast untersucht werden.

7.2 1975

In der Normausgabe von 1975 änderte sich die Einheit der Schneelast von $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ in $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$. Der Umrechnungsfaktor beträgt 10^{-2} .

Der Rechenwert der Schneelast ergibt sich aus der Regelschneelast s_0 und einem Abminderungsfaktor k_s zu:

$$s = k_s \cdot s_0$$

Der Abminderungsfaktor ist hierbei abhängig von der Dachneigung. Dieser kann entweder rechnerisch bestimmt werden mit

$$k_s = 1 - \frac{\alpha - 30^\circ}{40^\circ}$$

wobei k_s Größen zwischen 0 und 1 annehmen darf, oder folgender Abbildung entnommen werden.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	α	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
2	0 bis 30°	1,0									
3	30°	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77
4	40°	0,75	0,72	0,70	0,67	0,65	0,62	0,60	0,57	0,55	0,52
5	50°	0,50	0,47	0,45	0,42	0,40	0,37	0,35	0,32	0,30	0,27
6	60°	0,25	0,22	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10	0,07	0,05	0,02
7	70 bis 90°	0									

Abbildung 544: Abminderungsfaktor k_s [9]

Bei einer Untersuchung von einseitig angreifender Schneelast, ist einseitig keine Schneelast anzusetzen, auf der anderen Seite der halbe Wert der Schneelast. Schneeanhäufungen sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Regelschneelast gibt die Norm in Abhängigkeit der Geländehöhe und der Schneelastzone, in der sich das Bauwerk befindet, an. Die Regelschneelast kann der Abbildung 545 entnommen werden.

	1	2	3	4	5
1	Gelände­höhe des Bauwerkstandortes über NN m	Schneelastzone nach Bild 1			
		I	II	III	IV
2	≤ 200 300 400	0,75 (75) 0,75 (75) 0,75 (75)	0,75 (75) 0,75 (75) 0,75 (75)	0,75 (75) 0,75 (75) 1,00 (100)	1,00 (100) 1,15 (115) 1,55 (155)
3	500 600 700	0,75 (75) 0,85 (85) 1,05 (125)	0,90 (90) 1,15 (115) 1,50 (150)	1,25 (125) 1,60 (160) 2,00 (200)	2,10 (210) 2,60 (260) 3,25 (325)
4	800 900 1000	1,25 (125)	1,85 (185) 2,30 (230)	2,55 (255) 3,10 (310) 3,80 (380)	3,90 (390) 4,65 (465) 5,50 (550)
5	> 1000	Wird im Einzelfalle durch die zuständige Baubehörde im Einvernehmen mit dem Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach festgelegt.			

Abbildung 545: Regelschneelast s_0 [9]

Eine Überlagerung von Schnee- und Windlast erfolgt durch eine der folgenden Kombinationen. Hierbei ist der größere Wert maßgebend.

$$s + \frac{w}{2}$$

$$\frac{s}{2} + w$$

Die Schneelastzonen können der nachfolgenden Abbildung 546 entnommen werden.

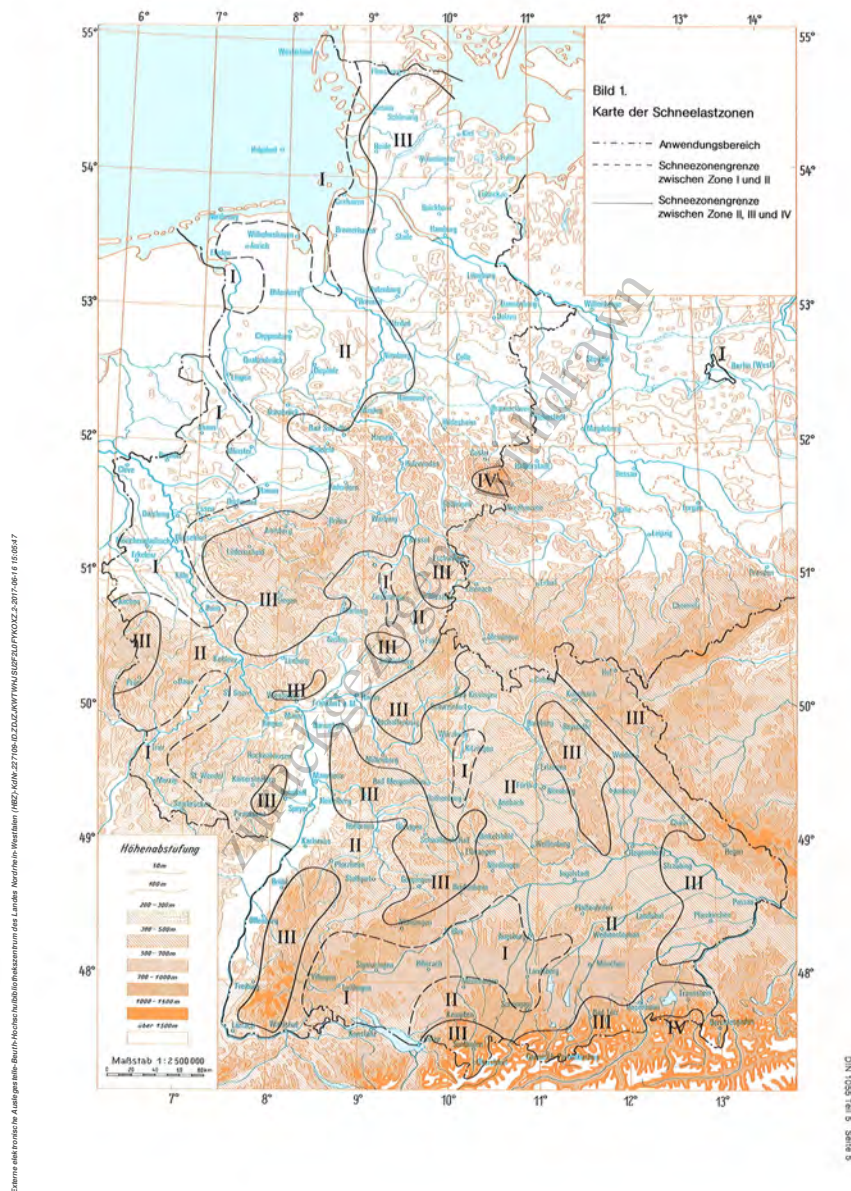


Abbildung 546: Schneelastzonenkarte [9]

7.3 1994

Im Jahr 1994 wurde durch die Einführung des Anhangs A1 die Schneelastzonenkarte um die Bereiche der ehemaligen DDR erweitert. Die Schneelastzonen in Westdeutschland haben sich im Vergleich zur Normausgabe von 1975 kaum verändert.

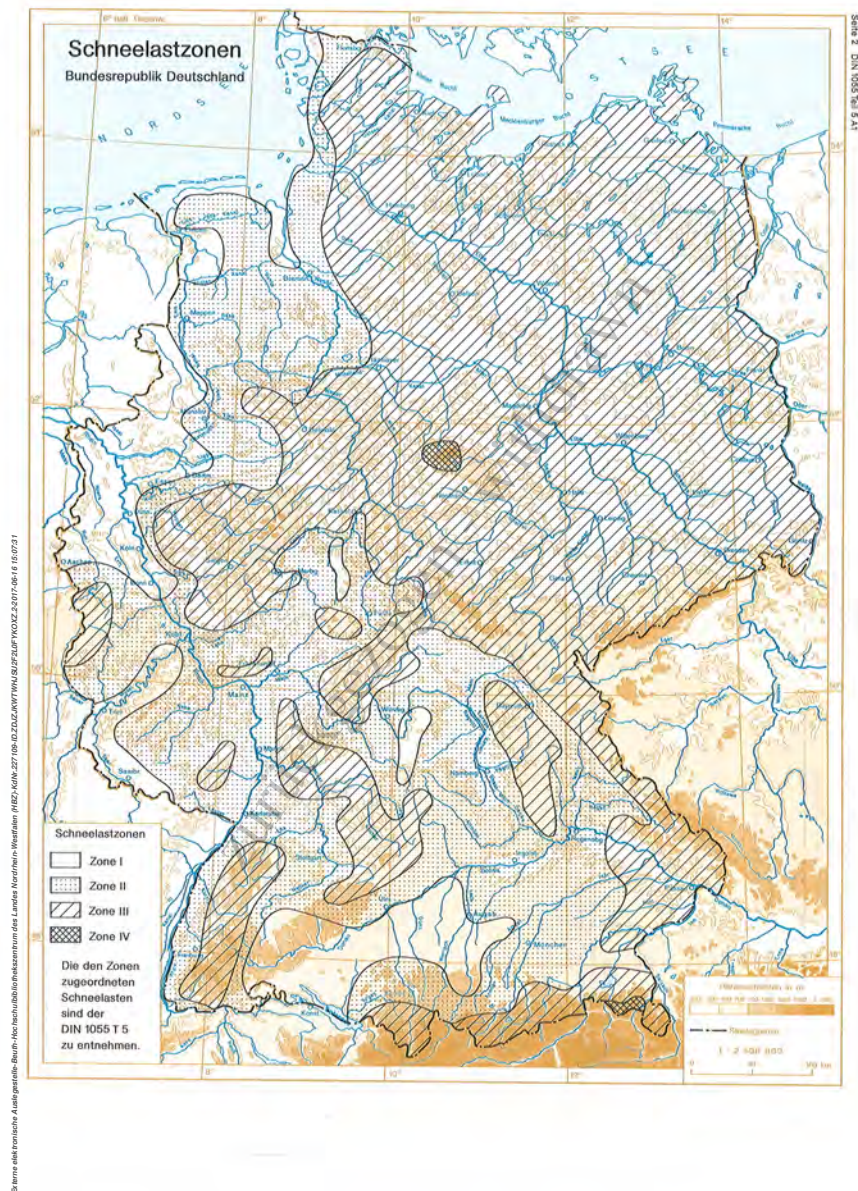


Abbildung 547: Schneelastzonenkarte [10]

7.4 2001

2001 wurde der Normentwurf der DIN 1055-5 veröffentlicht. Sie enthält eine überarbeitete Schneezonenkarte unter Berücksichtigung aktueller Messdaten. Die Grenzen der Schneezonen haben sich im Vergleich zur Vorgängernorm deutlich verschoben.

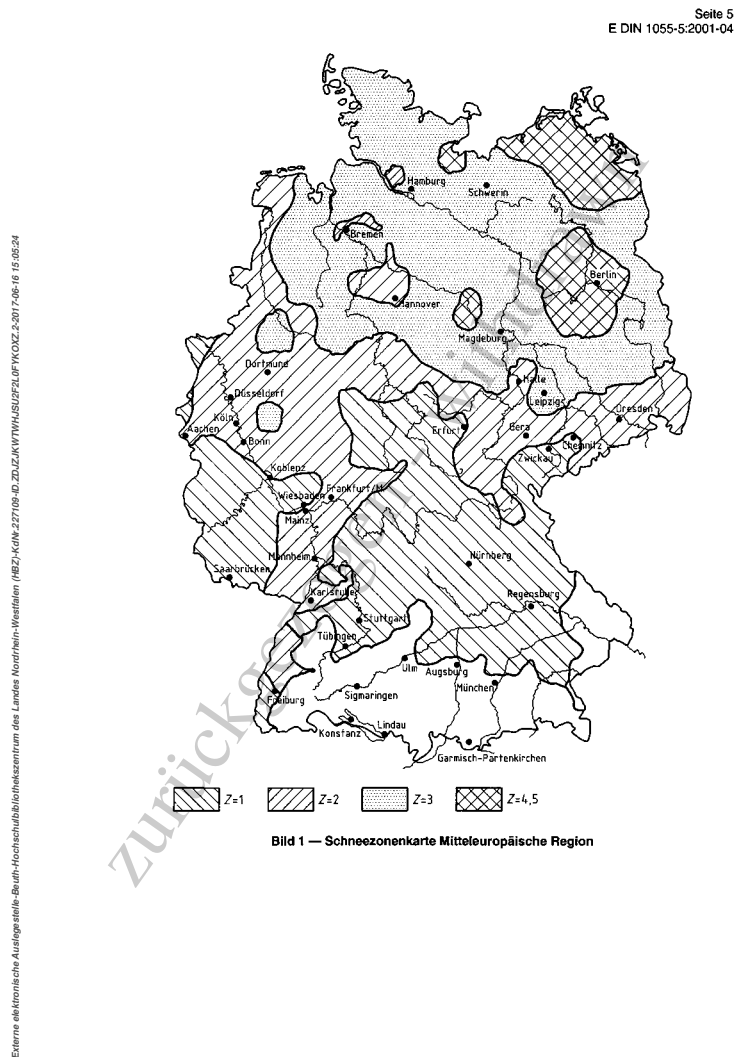


Abbildung 548: Schneezonenkarte

Die charakteristische Schneelast auf den Boden lässt sich in Abhängigkeit der Geländehöhe und der Schneezone bestimmen. Die Berechnungsformeln können der Abbildung 549 entnommen werden.

$$s_k = (0,13 + 0,264 \cdot (Z - 0,5)) \cdot \left[1 + \left(\frac{H_s}{256} \right)^2 \right] \text{ [kNm/m]}$$

$$s_k = (0,33 + 0,638 \cdot (Z - 0,5)) \cdot \left[1 + \left(\frac{H_s}{723} \right)^2 \right] \text{ [kNm/m]}$$

Abbildung 549: Formeln zur Bestimmung der charakteristischen Schneelast [11]

Die erste Gleichung gilt für mitteleuropäische Regionen. Die zweite Gleichung wird auf alpine Regionen angewendet, für die es eine separate Schneezonenkarte in diesem Normentwurf gibt.

Die Schneelast, die auf ein Bauwerk anzusetzen ist, lässt sich nach folgender Gleichung bestimmen:

$$s = \mu_i \cdot s_k$$

μ_i ist ein Formbeiwert, der sich aus der Dachform ergibt. Der Normentwurf unterscheidet hierbei mehrere Situationen, wie z.B. Pult- und Satteldächer, aber auch Shed- und Tonnendächer.

Exemplarisch stellt Abbildung 550 die Formbeiwerte für Satteldächer da.

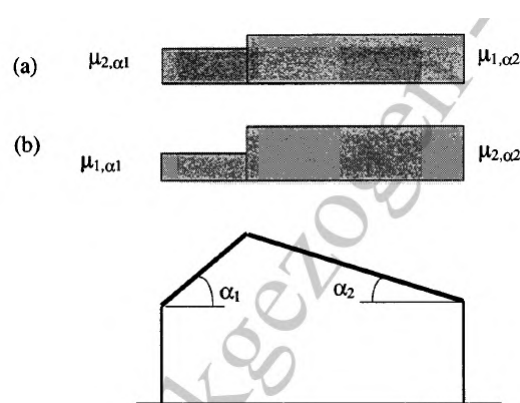


Abbildung 550: Formbeiwerte für Satteldächer [11]

Hierbei werden die beiden Lastfälle a) und b) unterschieden.

Die Formbeiwerte sind dabei abhängig von der Dachneigung.

Dachneigung α	$0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$	$15^\circ < \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 45^\circ$	$45^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
Formbeiwert μ_1	0,8	$0,8 (60^\circ - \alpha) / 45^\circ$	$0,8 (60^\circ - \alpha) / 45^\circ$	$0,8 (60^\circ - \alpha) / 45^\circ$	0
Formbeiwert μ_2	0,8	0,8	0,8	$0,8 (60^\circ - \alpha) / 15^\circ$	0
Formbeiwert μ_3	$0,8 + 0,8 \alpha / 30$	$0,8 + 0,8 \alpha / 30$	1,6	1,6	—

Abbildung 551: Formbeiwerte in Abhängigkeit der Dachneigung [11]

7.5 2004

Im Jahr 2004 wurde ein weiterer Normentwurf veröffentlicht. Die Schneezonenkarte unterschied nun noch zwischen drei Schneezonen. Die Grenzen der Schneezonen wurden erneut überarbeitet.

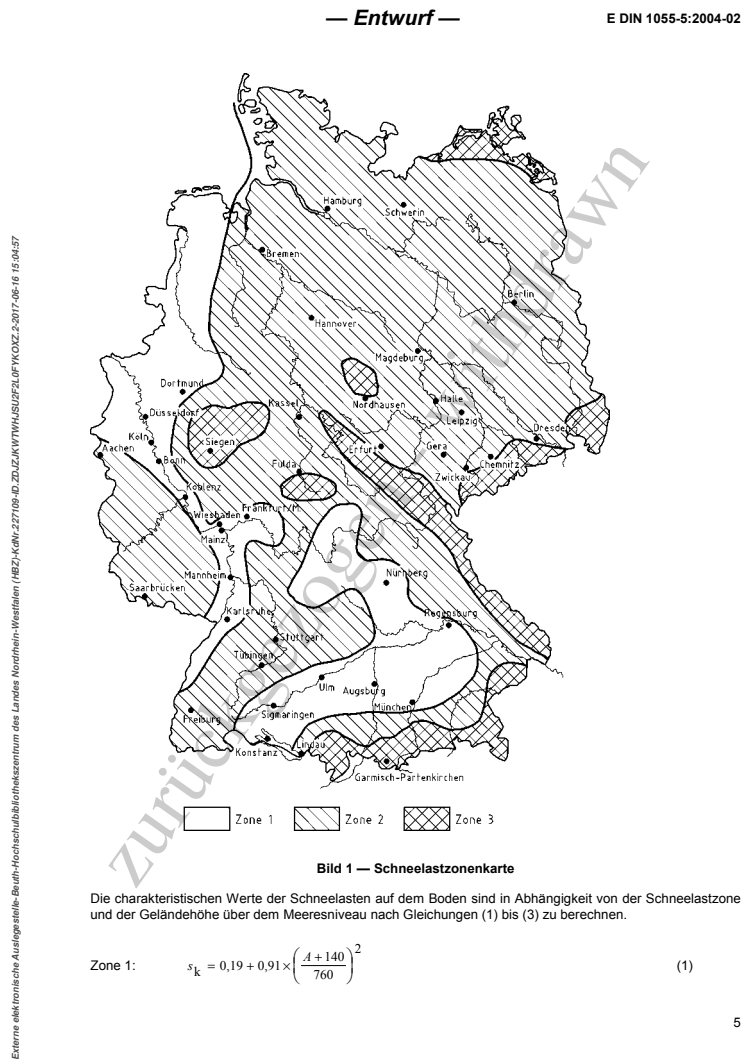


Abbildung 552: Schneezonenkarte [12]

Die charakteristische Schneelast wurde dann für jede Schneezone nach einer anderen Formel bestimmt.

$$\text{Schneezone 1 : } s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

$$\text{Schneezone 2 : } s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

$$\text{Schneezone 3 : } s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

A entspricht hierbei der Geländehöhe über NHN.

Jeder Schneezone wurde zusätzlich ein Mindestwert zugeordnet. Diese betragen:

$$\text{Schneezone 1 : } s_{k,\min} = 0,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Schneezone 2 : } s_{k,\min} = 0,85 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Schneezone 3 : } s_{k,\min} = 1,10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Bei der Berechnung der Windlast auf Satteldächern wurde zwischen drei Fällen unterschieden, die Abbildung 553 entnommen werden können.

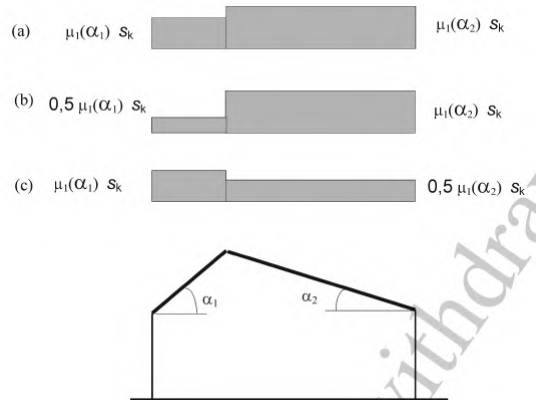


Abbildung 553: Formbeiwerte für Satteldächer [12]

Die Formbeiwerte können Abbildung 554 entnommen werden.

Dachneigung α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	$\alpha > 60^\circ$
Formbeiwert μ_1	0,8	$0,8 (60^\circ - \alpha) / 30^\circ$	0
Formbeiwert μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha / 30$	1,6	1,6

Abbildung 554: Formbeiwerte in Abhängigkeit der Dachneigung [12]

Diese Werte haben jedoch nur Gültigkeit, sofern sichergestellt ist, dass der Schnee ungehindert abrutschen kann.

7.6 2005

Nach den zwei Normentwürfen von 2001 und 2004 wurde 2005 die nächste Normausgabe eingeführt. Die Schneezonenkarte von 2004 wurde durch die beiden Unterzonen 1a und 2a erweitert, sonst jedoch nicht verändert.

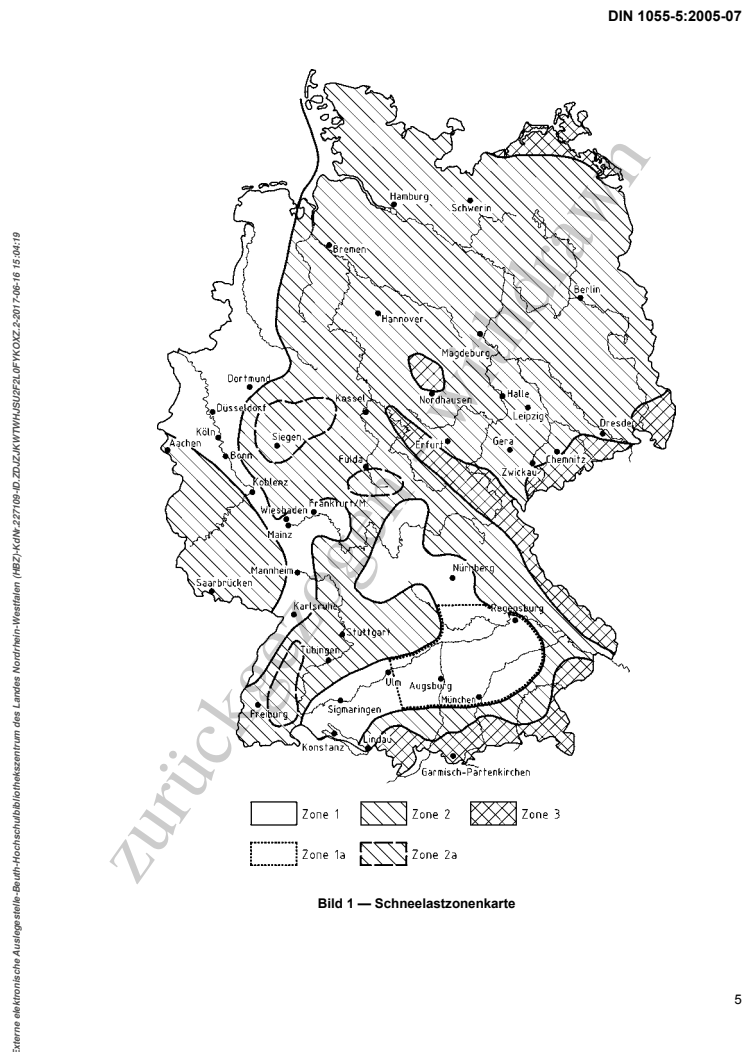


Abbildung 555: Schneezonenkarte [13]

Die Berechnung der charakteristischen Schneelast erfolgt analog zum Entwurf von 2004. Auch die Mindestwerte der Schneelast und die Formbeiwerte sind identisch geblieben. Befindet sich ein Bauwerk in der Schneezone 1a oder 2a muss die anzusetzende Schneelast um den Faktor 1,25 erhöht werden.

7.7 2010

Im Dezember 2010 wurde dann die erste europäische Schneenorm eingeführt. Die DIN EN 1993-1-3 mit dem Nationalen Anhang sowie dem Anhang A1 unterscheidet sich dabei nicht nennenswert von der DIN 1055-5 aus dem Jahr 2005, da diese deutsche Norm bereits an den Eurocode angelehnt war. In der Schneezonenkarte wurde lediglich die Grenze zum Norddeutschen Tiefland aufgeführt. In diesem Gebiet kann es zu deutlich höheren Lasten kommen. Den zuständigen Behörden wird in der Norm die Möglichkeit gegeben für diesen Fall separate Werte festzulegen, welche als außergewöhnliche Last bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen.

DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12

Externe elektronische Ausgabe des Bauinformatikzentrum der Landes Nordrhein-Westfalen (NBZ) Köln 227109-02/02/02 KWTH/HS/DF/PL/PT/KO/ZZ/2017-08-16 15:10:32

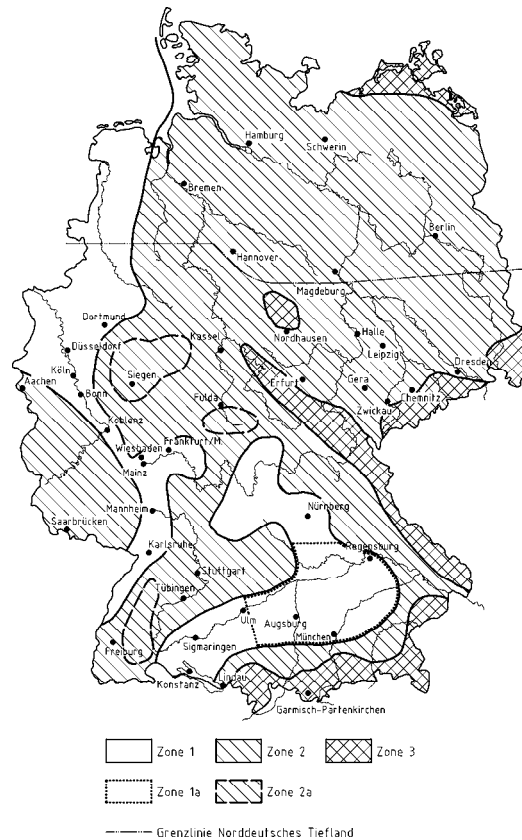


Bild NA.1 — Schneelastzonenkarte

Abbildung 556: Schneezonenkarte [17]

8 Veränderungen der Schneelastnormen der DDR

8.1 1964

Die 1964 eingeführte TGL 20167 unterschied sich auch bei der Ermittlung der Schneelast nicht vom Entwurf von 1963.

Die Schneelast lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$p_n = s_0 \cdot c$$

Mit der Last der Schneedecke s_0 und dem Beiwert c zur Berücksichtigung der Dachform.

Schneegebiet	Schneelast s_0 kp/m ²	Schneegebiet	Schneelast s_0 kp/m ²
I	50	III	100
II	70	IV	150

Abbildung 557: Schneelast in Abhängigkeit des Schneegebiets [21]

Die Schneegebiete waren dabei abhängig von der Geländehöhe.

Höhe über HN m	Schneegebiet
0 bis 400	II
über 400 bis 600	III
über 600	IV

Abbildung 558: Schneegebiete in Abhängigkeit der Geländehöhe [21]

Bei der Bemessung muss die Schneelast mit dem Faktor 1,4 multipliziert werden.

Es wurde zwischen verschiedenen Dachformen unterschieden. Die Beiwerte c für Satteldächer können der Abbildung 559 entnommen werden.

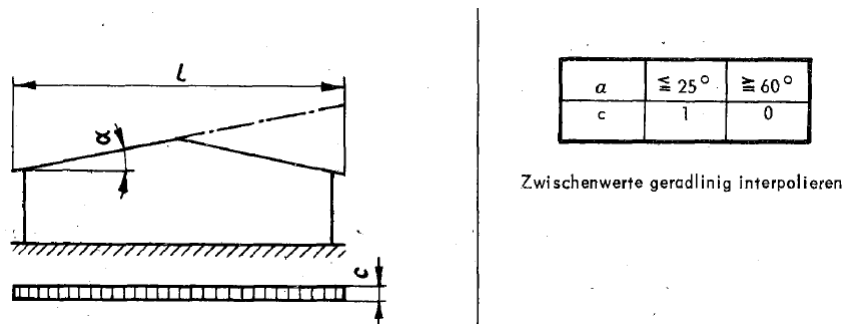


Abbildung 559: Beiwert c bei Satteldächern [21]

Auch nach der TGL müssen die Laststellungen Vollast und einseitige Last untersucht werden.

8.2 1971

Der Entwurf der TGL 20167 aus dem Jahr 1971 erweiterte die Schneegebiete auf sechs zu unterscheidende Kategorien.

Schneegebiet	Schneelast s_0 kp/m ²	Schneegebiet	Schneelast s_0 kp/m ²
I	50	IV	150
II	70	V	200
III	100	VI	250

Abbildung 560: Schneelast in Abhängigkeit des Schneegebietes [22]

Ist die Dacheigenlast größer als $150 \frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$ darf immer die Schneelast aus dem nächstniedrigeren Schneegebiet angesetzt werden. Nur wenn das Dacheigengewicht kleiner gleich $50 \frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$ ist, muss der volle Wert, der laut Schneegebiet anzusetzen ist, genommen werden. Dazwischen darf interpoliert werden.

Die c-Beiwerte für Satteldächer haben sich im Vergleich zur Ausgabe von 1964 nicht geändert.

Für die Schneegebiete enthält der Normentwurf mehrere Karten und im Anhang eine Übersicht der Ortschaften, welche sich im Grenzgebiet befinden. Abbildung 561 enthält die Schneegebietskarte für den Thüringer Wald und Rhön.

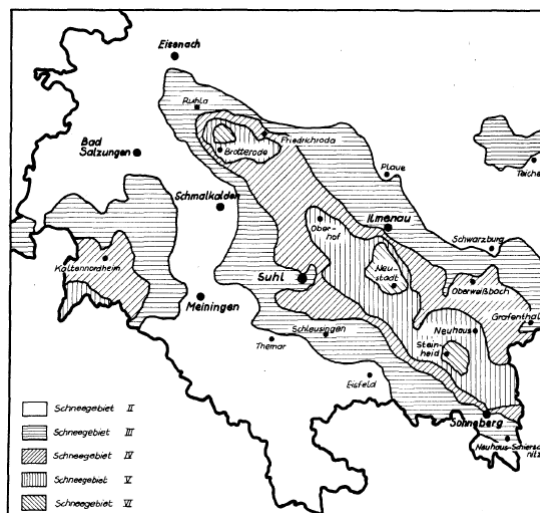


Abbildung 561: Schneegebietskarte für den Thüringer Wald und Rhön [22]

8.3 1976

Im Dezember 1976 wurde die TGL 32274/05, welche nur Schneelasten beinhaltet, eingeführt. Die Lasten wurden nicht mehr in $\frac{kP}{m^2}$ sondern in $\frac{kN}{m^2}$ angegeben.

Die c-Beiwerte für Satteldächer wurden um die Faktoren c_2 und c_3 erweitert.

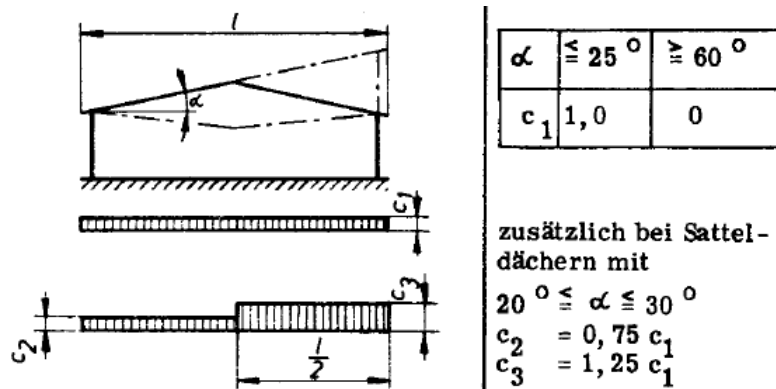


Abbildung 562: Beiwert c bei Satteldächern [24]

Bei der Bestimmung der Schneelast wurde nicht mehr explizit zwischen verschiedenen Schneegebieten unterschieden. Entscheidend für den Grundwert der Schneelast ist die Geländehöhe.

Höhe über Meeresspiegel in m für das Gebiet		Grundwert s_0 kN/m ²
Harz	sonstige DDR	
bis 250	bis 300	0,50
über 250 bis 375	über 300 bis 450	0,70
über 375 bis 475	über 450 bis 575	1,00
über 475 bis 525	über 575 bis 650	1,50
über 525 bis 575	über 650 bis 725	2,00
über 575	über 725	2,50

Abbildung 563: Grundwert der Schneelast in Abhängigkeit der Geländehöhe [24]

Bei der Bemessung von Bauwerksteilen und -elementen führte die Norm zusätzlich einen Lasterhöhungsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen dem Grundwert der Schneelast und dem Eigengewicht ein. Dieser Lasterhöhungsfaktor k_s ist mit der Schneelast p_n zu multiplizieren. Die Werte können der nachfolgenden Abbildung entnommen werden. Der Wert g entspricht hierbei der ständigen Flächenlast.

Verhältnis von Grundwert der Schneelast zur ständigen Last	Lasterhöhungsfaktor k_s
$\frac{s_0}{g} \leq 0,5$	1,0
$0,5 < \frac{s_0}{g} < 3,0$	$0,9 + 0,2 \frac{s_0}{g}$
$\frac{s_0}{g} \geq 3,0$	1,5

Abbildung 564: Lasterhöhungsfaktor zur Bemessung von Bauwerksteilen [24]

9 Auswertung der Schneelastveränderung

Während die Schneelast in der Normausgabe der DIN 1055-5 von 1936 direkt in Abhängigkeit der Dachneigung bestimmt werden konnte, geben die Ausgaben von 1975 und 2005 sowie der Eurocode eine Regelschneelast bzw. eine charakteristische Schneelast an, die abhängig der Dachneigung abgemindert werden muss. Einen Vergleich der Abminderungsfaktoren liefert Abbildung 565.

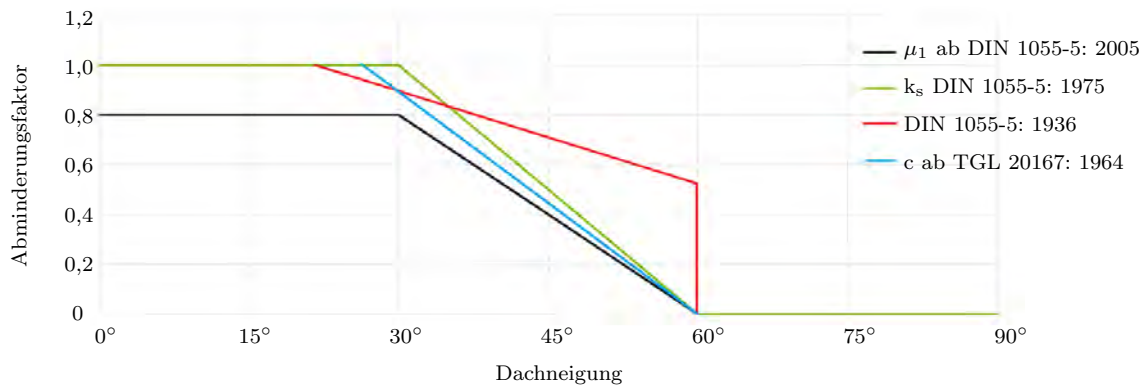


Abbildung 565: Vergleich der Abminderungsfaktoren

Bei der Normausgabe von 1936 wurde der größte Wert als Referenzwert benutzt und die Schneelasten der anderen Dachneigungen umgerechnet, um einen Vergleich durchführen zu können.

Bei der TGL von 1974 ist darauf zu achten, dass bei Dachneigungen zwischen 20° und 30° zusätzlich andere Laststellungen untersucht werden müssen.

Aus dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass ab einer Dachneigung von 60° alle Normen bis auf die Ausgabe von 1936 keine Schneelasten mehr ansetzen. Nach DIN 1055-5: 1936 ist bei 60° eine Last von $0,35 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ zu berücksichtigen. Erst bei Dachneigungen $> 60^\circ$ ist von keiner Schneelast auszugehen.

Im flachen Dachneigungsbereich ist die Abminderung des Eurocodes am größten.

Die Veränderung der charakteristischen Schneelast auf dem Boden s_k (nach DIN 1055-5: 2005 und DIN EN 1991-1-3 :2010) und der Regelschneelast s_0 (nach DIN 1055-5: 1975) in den unterschiedlichen Schneezonen zeigt Abbildung 566.

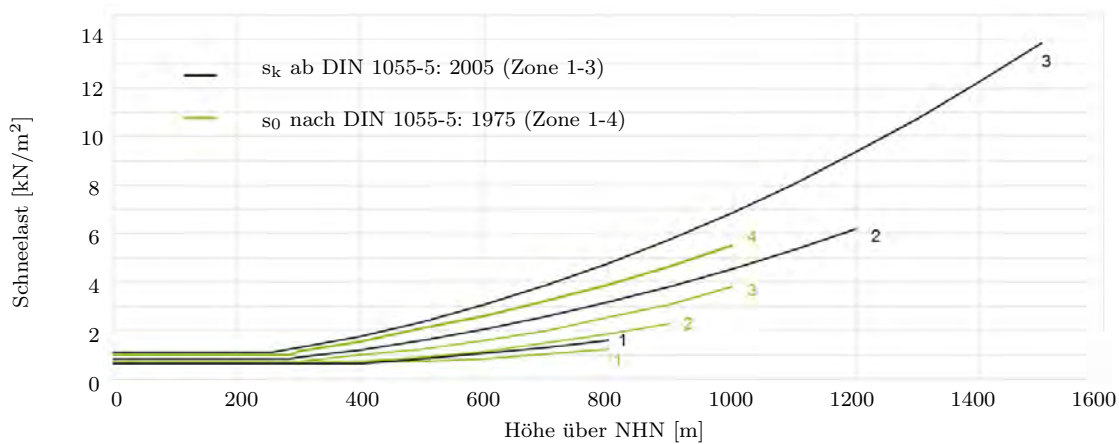


Abbildung 566: Vergleich der charakteristischen Schneelast mit der Regelschneelast

Die Sockelbeträge bzw. Mindestwerte in den unterschiedlichen Schneezonen betragen nach DIN 1055-5: 1975:

Zone 1: $0,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 500 m über NHN)

Zone 2: $0,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 400 m über NHN)

Zone 3: $0,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 300 m über NHN)

Zone 4: $1,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 200 m über NHN)

Und ab 2005:

Zone 1: $0,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 400 m über NHN)

Zone 2: $0,85 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 285 m über NHN)

Zone 3: $1,10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ (bis 255 m über NHN)

Für die Zonen 1a und 2a sind die Werte um den Faktor 1,25 zu erhöhen.

Bei den anderen Normen ist jeder Schneezone ein fester Wert zugeordnet.

Da ein allgemeiner Vergleich der Schneelasten aufgrund der unterschiedlichen Schneezonenkarten und dem nichtlinearen Verlauf der Regelschneelast schwierig bis unmöglich ist, werden im folgenden die anzusetzenden charakteristischen Schneelasten für einige Beispielstädte bestimmt.

Die Normentwürfe werden bei der folgenden Zusammenstellung nicht berücksichtigt.

Für alle Beispielhallen ergeben sich aufgrund der einheitlichen Dachneigung von 11° die gleichen Schneelasten.

9.1 Vergleich der Schneelast am Standort Dortmund

Dortmund befindet sich ca. 105 m über NHN. Nach der Schneezonenkarte von 1975 befindet sich Dortmund in der Zone 2, in der Karte von 1994 auf der Grenze zwischen den Zonen 1 und 2, und nach dem Eurocode in Zone 1.

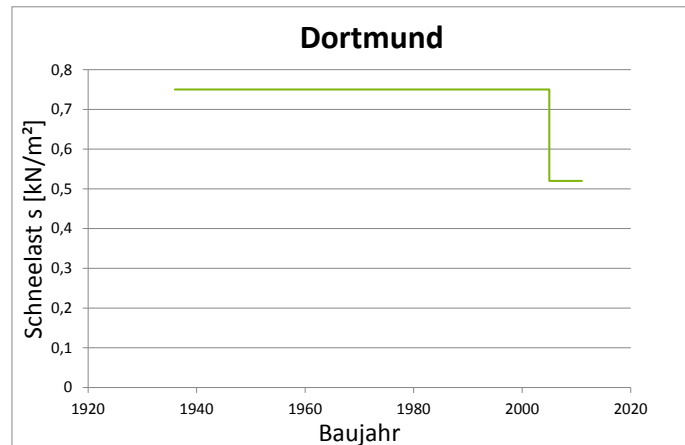


Abbildung 567: Vergleich der Schneelast am Standort Dortmund

9.2 Vergleich der Schneelast am Standort Aachen

Aachen befindet sich ca. 206 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 befindet sich Aachen in der Zone 1, nach dem Eurocode in Zone 2.

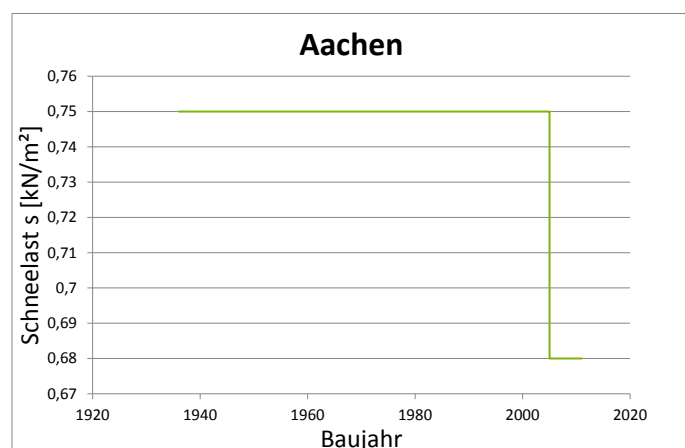


Abbildung 568: Vergleich der Schneelast am Standort Aachen

9.3 Vergleich der Schneelast am Standort München

München befindet sich ca. 518 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 befindet sich München in der Zone 2, nach dem Eurocode in Zone 1a.

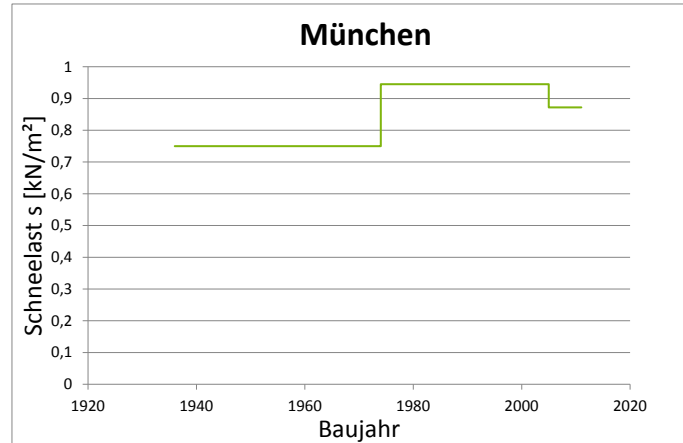


Abbildung 569: Vergleich der Schneelast am Standort München

9.4 Vergleich der Schneelast am Standort Garmisch-Partenkirchen

Garmisch-Partenkirchen befindet sich ca. 708 m über NHN. Sowohl nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 als auch nach dem Eurocode befindet sich Garmisch-Partenkirchen in der Zone 3.

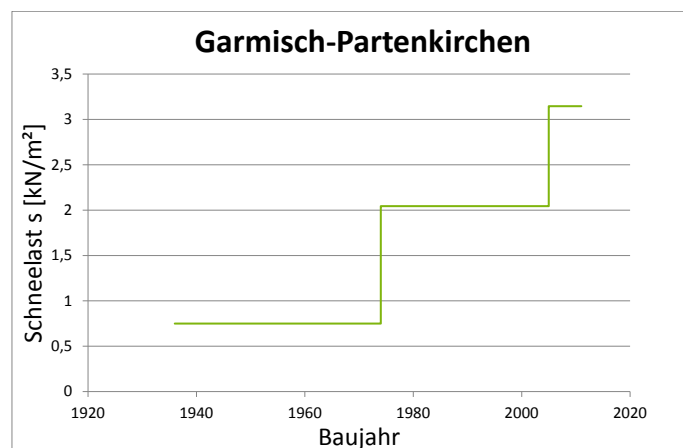


Abbildung 570: Vergleich der Schneelast am Standort Garmisch-Partenkirchen

9.5 Vergleich der Schneelast am Standort Hamburg

Hamburg befindet sich ca. 6 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1975 und 1994 befindet sich Hamburg in der Zone 3, nach dem Eurocode in Zone 2.

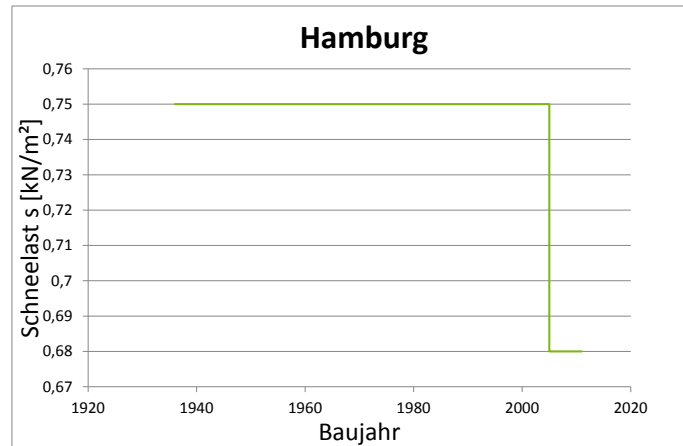


Abbildung 571: Vergleich der Schneelast am Standort Hamburg

9.6 Vergleich der Schneelast am Standort Rostock

Rostock befindet sich ca. 14 m über NHN. Nach den Schneezonenkarten von 1994 und des Eurocodes befindet sich Rostock in der Zone 3. Nach der TGL von 1964 befindet sich Rostock aufgrund seiner Höhe im Schneegebiet 2. Nach der TGL von 1976 ist für die Stadt der niedrigste Grundwert anzusetzen.

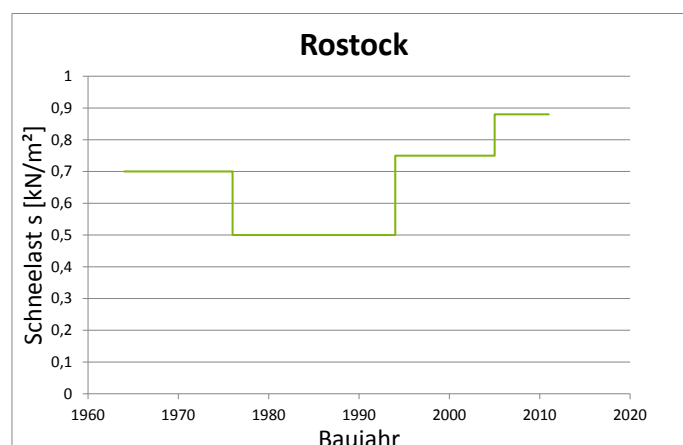


Abbildung 572: Vergleich der Schneelast am Standort Rostock

9.7 Vergleich der Schneelast am Standort Dresden

Dresden befindet sich ca. 112 m über NHN. Nach der Schneezonenkarte von 1994 befindet sich Dresden in der Zone 3, nach dem Eurocode in Schneezone 2. Nach der TGL von 1964 befindet sich Dresden aufgrund seiner Höhe im Schneegebiet 2. Nach der TGL von 1976 ist für die Stadt der niedrigste Grundwert anzusetzen.

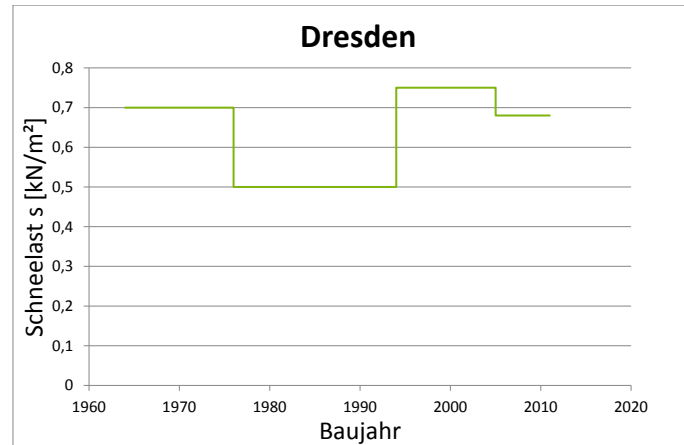


Abbildung 573: Vergleich der Schneelast am Standort Dresden

9.8 Vergleich der Schneelast am Standort Blankenburg

Blankenburg befindet sich im Harz und liegt ca. 288 m über NHN. Nach der Schneezonenkarte von 1994 befindet sich Blankenburg in der Zone 3, nach dem Eurocode in Schneezone 2. Nach der TGL von 1964 befindet sich Dresden aufgrund seiner Höhe im Schneegebiet 2. Nach der TGL von 1976 ist für die Stadt ein Grundwert von $0,7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ anzusetzen.

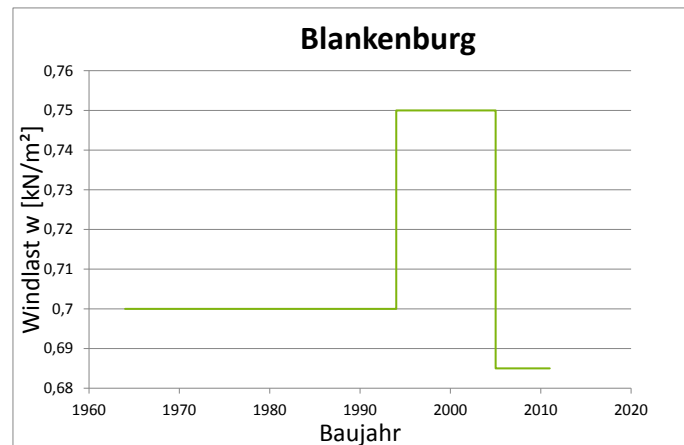


Abbildung 574: Vergleich der Schneelast am Standort Blankenburg

10 Fazit - Schnee

Es wird bereits an den wenigen dargestellten Standorten deutlich, dass eine tendenzielle Richtung der Schneelastentwicklung nicht zu erkennen ist.

Die unterschiedlichen Schneezonenkarten und die unterschiedliche Anzahl an Schneezonen im Laufe der Normentwicklung folgen keinem klaren Trend hinsichtlich einer Erhöhung oder Verringerung der anzusetzenden charakteristischen Schneelast.

Die Umstellung von einem Wert je Schneezone hin zu höhenabhängigen Formeln zu Bestimmung der Last, verkomplizieren einen Vergleich.

Viele Standorte wechseln zwischen den einzelnen Normen die Schneezone und die an die Zonen geknüpften Werte wurden an neuen Erkenntnissen und auf das neue Sicherheitskonzept angepasst.

11 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 1055 BLATT 4 [1938], “Lastannahmen im Hochbau - Verkehrslasten - Windlast”
- [2] DIN 1055 BLATT 4 [1977], “Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten - Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke”
- [3] DIN 1055 TEIL 4 [1986], “Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten - Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke”
- [4] DIN 1055 TEIL 4 [1987], “Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken Änderung 1 Berichtigungen”
- [5] DIN 1055-4 ENTWURF [2001], “Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten”
- [6] DIN 1055-4 [2005], “Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten”
- [7] DIN 1055-4 BERICHTIGUNG 1 [2006], “Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten”
- [8] DIN 1055 BLATT 5 [1936], “Lastannahmen im Hochbau - Verkehrslasten - Schneelast”
- [9] DIN 1055 BLATT 5 [1975], “Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten -Schneelast und Eislast”
- [10] DIN 1055 TEIL 5 A1 [1994], “Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten - Schneelast und Eislast”
- [11] DIN 1055-5 ENTWURF [2001], “Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten”
- [12] DIN 1055-5 ENTWURF [2004], “Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten”
- [13] DIN 1055-5 [2005], “Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten”
- [14] DIN 1056 [1984], “Freistehende Schornsteine in Massivbauart - Berechnung und Ausführung”
- [15] DIN EN 1991-1-3 [2010], “Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten”

- [16] DIN EN 1991-1-3/A1 [2010], “Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten”
- [17] DIN EN 1991-1-3/NA [2010], “Nationaler Anhang National festgelegte Parameter Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten”
- [18] DIN EN 1991-1-4 [2010], “Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten”
- [19] DIN EN 1991-1-4/NA [2010], “Nationaler Anhang National festgelegte Parameter Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten”
- [20] TGL 20167 BLATT 1 ENTWURF [1963], “Lastannahmen für Bauten - Grenzlastfaktoren Normlasten infolge Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung”
- [21] TGL 20167 BLATT 1 [1964], “Lastannahmen für Bauten - Grenzlastfaktoren Normlasten infolge Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung”
- [22] TGL 20167 BLATT 1 ENTWURF [1971], “Lastannahmen für Bauten - Grenzlastfaktoren Normlasten infolge Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung”
- [23] TGL 32274/07 [1976], “Lastannahmen für Bauwerke - Windlasten”
- [24] TGL 32274/05 [1976], “Lastannahmen für Bauwerke - Schneelasten”

12 Anhang

12.1 Umrechnungsverfahren für Hallen mit Flachdächern

Eine Möglichkeit zwischen den Windbelastungen für die globale Bemessung bezüglich der Norm von 1938 und dem Eurocode umzurechnen, bietet das nachstehende Verfahren. Dieses Verfahren wurde für Hallen mit Flachdächern entwickelt. Für Satteldächer sind die Umrechnungsfaktoren nicht gültig, da sich die Definitionen der Höhen zu Breiten Verhältnisse im Laufe der Normgeschichte geändert haben.

Tabelle 4 zeigt den ersten Umrechnungsfaktor ω_{1938} zwischen dem Staudruck nach DIN 1055-4: 1938 und dem Geschwindigkeitsdruck nach Eurocode 1.

Bereich	A	B	C	D	E
h/d					
≥ 5	3,5	2	1,25	1	1,25
1	3	2	1,25	1	1,25
$\leq 0,25$	3	2	1,25	0,875	0,75

Tabelle 4: Umrechnungsfaktor ω_{1938}

Zur Berücksichtigung der Gebäudehöhen muss der Faktor ω_{1938} mit einem weiteren Faktor ω_h angepasst werden. Eine Übersicht über die Faktoren liefert Tabelle 5.

Gebäudehöhe	ω_h
0-8 m	1,0
8-10 m	0,625
10-18 m	0,8125
18-20 m	0,9375
20-25 m	0,6818

Tabelle 5: Korrekturfaktor ω_h

Der Beiwert zur Berücksichtigung der Windzone wird mit ω_{wz} bezeichnet. Dieser Faktor ist dabei abhängig von der Gebäudehöhe. Die Werte können Tabelle 6 entnommen werden.

	Windzone	$h \leq 10$	$10 < h \leq 18$	$18 < h \leq 25$
1	Binnenland	1,0	1,0	1,0
2	Binnenland	1,3	1,23	1,2
2	Küste und Inseln der Ostsee	1,7	1,54	1,47
3	Binnenland	1,6	1,46	1,47
3	Küste und Inseln der Ostsee	2,1	1,85	1,733
4	Binnenland	1,9	1,77	1,733
4	Küsten der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	2,154	2,154	2,07
4	Inseln der Nordsee	2,8	-	-

Tabelle 6: Umrechnungsfaktor ω_{wz} für die Windzonen

Die Windbelastung w nach dem Eurocode ergibt sich dann aus der Windbelastung der DIN 1055-1-4:1938 w_{1938} wie folgt:

$$W = W_{1938} \cdot \omega_{1938} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz}$$

Für Bauwerke, die nach der DIN 1055-4: 1977 oder DIN 1055-4: 1986 bemessen wurden, kann der Umrechnungsfaktor ω_{1986} Tabelle 7 entnommen werden.

Bereich	A	B	C	D	E
h/d					
≥ 5	2,000	1,143	0,714	1,000	1,000
1	1,714	1,143	0,714	1,000	1,000
0,95	1,714	1,143	0,714	0,992	0,973
0,90	1,714	1,143	0,714	0,983	0,947
0,85	1,714	1,143	0,714	0,975	0,920
0,80	1,714	1,143	0,714	0,967	0,933
0,75	1,714	1,143	0,714	0,958	0,867
0,70	1,714	1,143	0,714	0,950	0,840
0,65	1,714	1,143	0,714	0,942	0,813
0,60	1,714	1,143	0,714	0,933	0,787
0,55	1,714	1,143	0,714	0,925	0,760
0,50	1,714	1,143	0,714	0,917	0,733
0,45	1,818	1,212	0,758	0,908	0,707
0,40	1,935	1,290	0,806	0,900	0,680
0,35	2,069	1,379	0,862	0,892	0,653
0,30	2,222	1,481	0,926	0,883	0,627
$\leq 0,25$	2,400	1,600	1,000	0,875	0,600

Tabelle 7: Umrechnungsfaktor ω_{1986}

Die anzusetzende Windlast nach dem EC 1 ergibt sich dann analog zu:

$$W = W_{1986} \cdot \omega_{1986} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz}$$

12.2 Beispiel 1 - Baujahr 1940

Ist die anzusetzende Windlast für ein Gebäude in der Windzone 4 Binnenland mit den Abmessungen der Halle B (mit einem Flachdach, wobei die Höhe des Firstes der Hallenhöhe entspricht) ausgehend von der Windlast nach DIN 1055-4:1938 zu ermitteln, sieht das Vorgehen wie folgt aus.

Da das h/d-Verhältnis 0,35 beträgt, muss in Tabelle 4 interpoliert werden. Für den A-Bereich ergibt sich

$$\omega_{1938} = 3,0.$$

Da die Gebäudehöhe 7,0 m beträgt, ist

$$\omega_h = 1,0.$$

Für ein Bauwerk in der Windzone 4 Binnenland ergibt sich

$$\omega_{wz} = 1,9.$$

Der anzusetzende Windsog für die Halle B beträgt $-0,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$.

Die Windlast nach dem Eurocode ergibt sich dann zu:

$$\begin{aligned} w &= w_{1938} \cdot \omega_{1938} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz} \\ &= -0,2 \cdot 3,0 \cdot 1,0 \cdot 1,9 \\ &= -1,14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Im A-Bereich muss also ein Windsog von $-1,14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ angesetzt werden. Die anderen Wandbereiche lassen sich analog berechnen.

12.3 Beispiel 2 - Baujahr 1990

Für ein späteres Baujahr, beispielsweise 1990, sind die Faktoren ω_h und ω_{wz} identisch. Der Faktor ω_{1986} ergibt sich nach Tabelle 7 zu

$$\omega_{1986} = 2,069.$$

Daraus folgt für die anzusetzende Windlast

$$\begin{aligned} W &= W_{1986} \cdot \omega_{1986} \cdot \omega_h \cdot \omega_{wz} \\ &= -0,29 \cdot 2,069 \cdot 1,0 \cdot 1,9 \\ &= -1,14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Im A-Bereich muss also ein Windsog von $-1,14 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ angesetzt werden. Dies entspricht dem Ergebnis einer Eurocode-Berechnung.

Anhang B2

Experimentelle Untersuchungen zur Federsteifigkeit des Anschlusses der Sandwichelemente an den schmalen Kassettenurten

Das IGF-Vorhaben „Bauen im Bestand – Lösungen für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise“, IGF-Projekt Nr. 18623 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

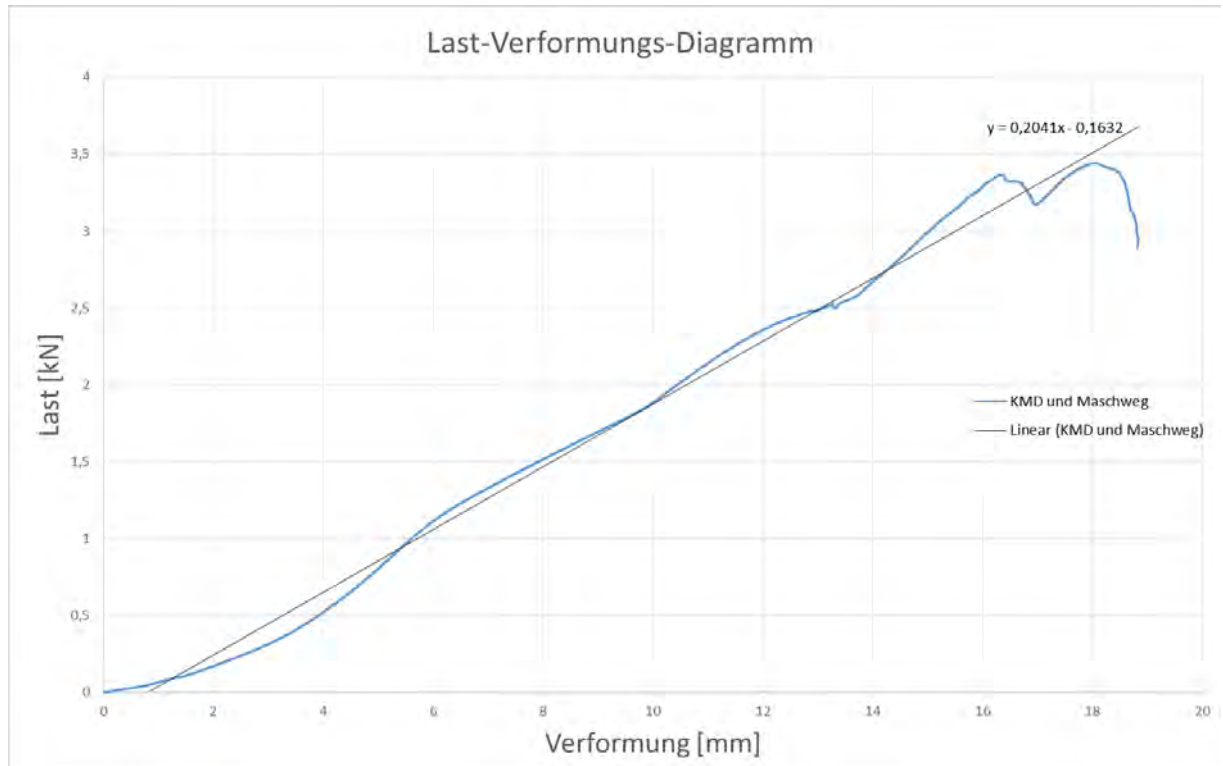


FS01	Datum 08.11.2016
	Versuch-Nr. 1

Versuchsart Zugversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
 Breite [mm] 300

Fmax [kN] 2,49 k [kN/mm] 0,2041



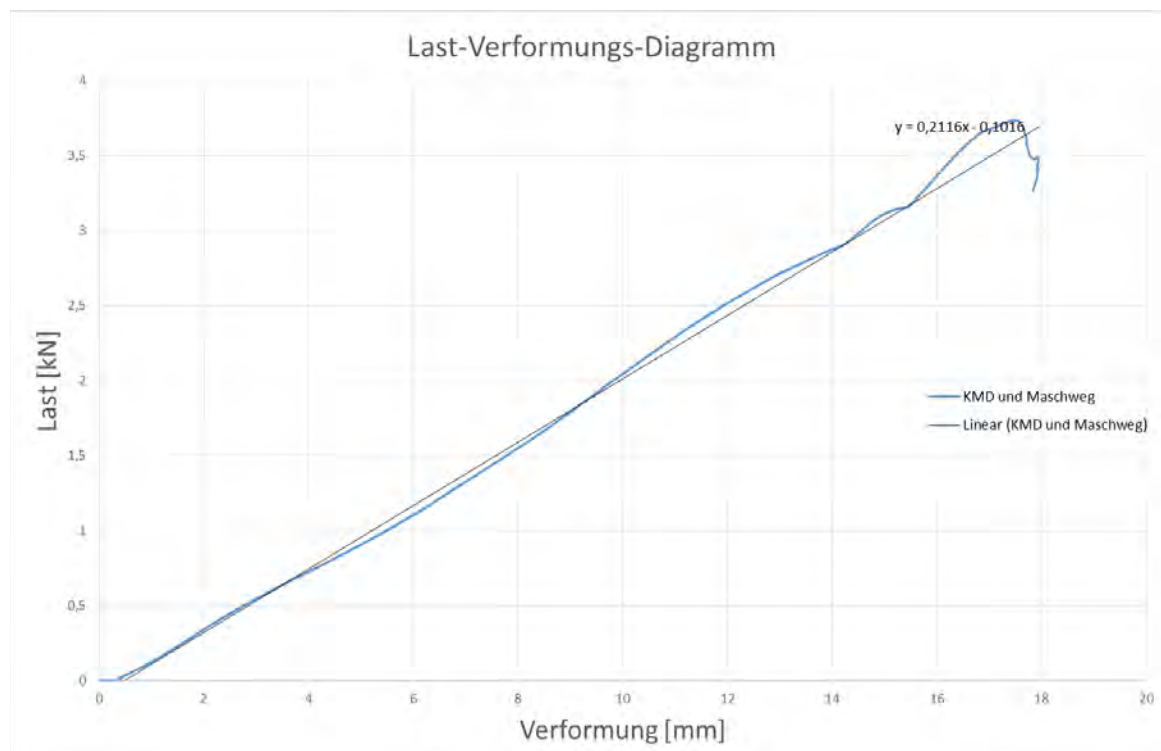
Anmerkungen

FS02	Datum 14.11.2016 Versuch-Nr. 2
-------------	-----------------------------------

Versuchsart Zugversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 300

Fmax [kN] 2,07 k [kN/mm] 0,2116



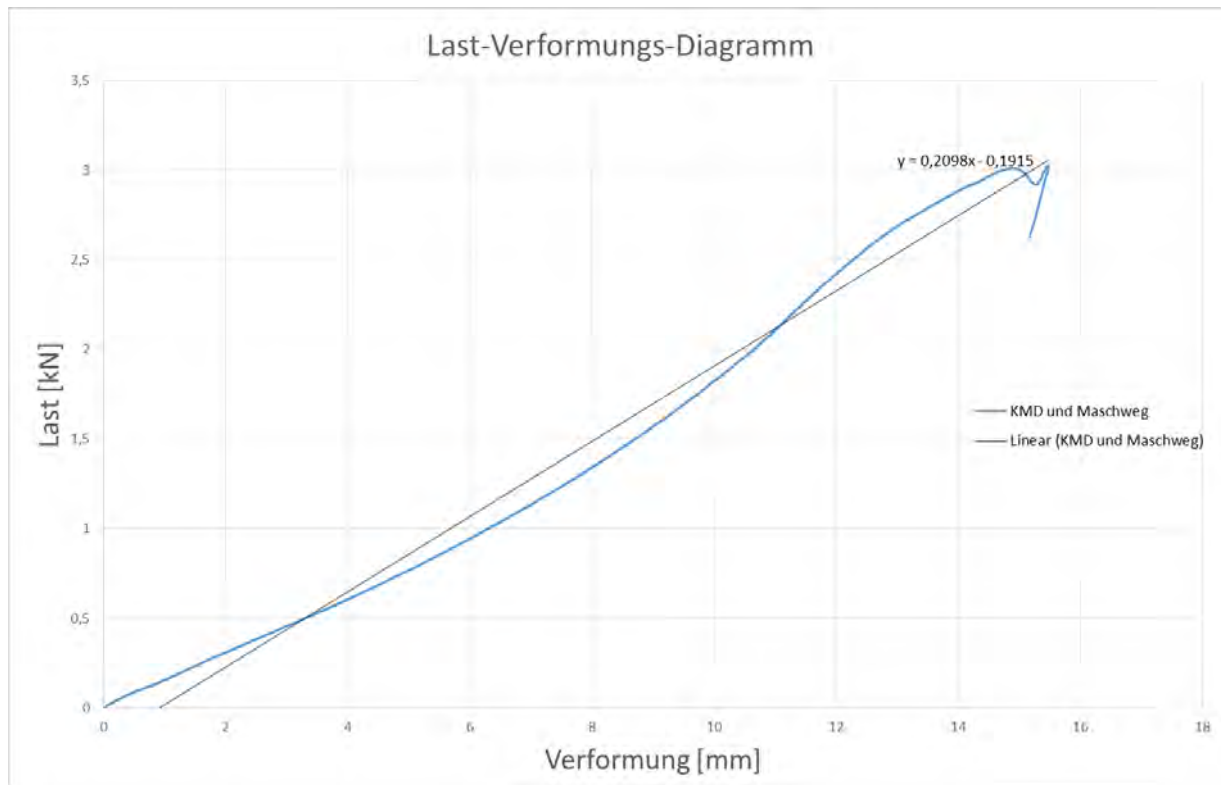
Anmerkungen

FS03	Datum 14.11.2016
	Versuch-Nr. 3

Versuchsart Zugversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 300

Fmax [kN] 3,03 k [kN/mm] 0,2098



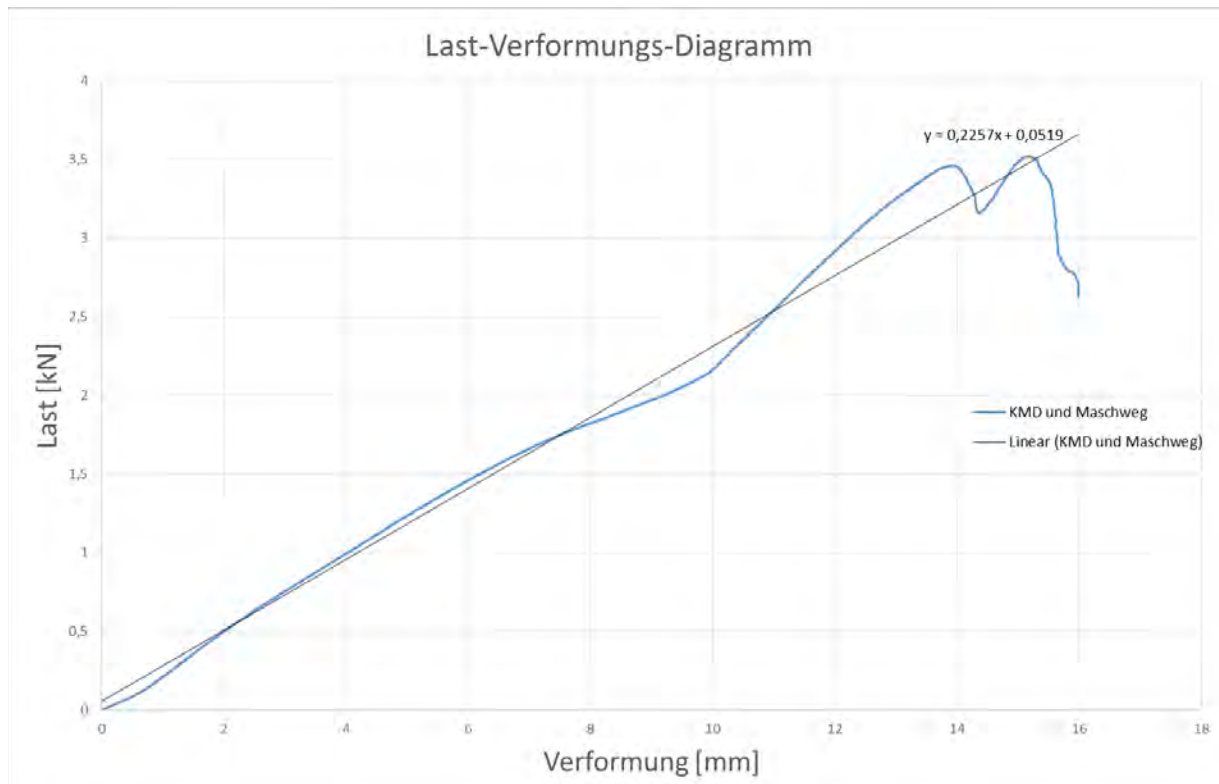
Anmerkungen

FS04Datum 14.11.2016
Versuch-Nr. 4

Versuchsart Zugversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 1000

Fmax [kN] 3,52 k [kN/mm] 0,2257



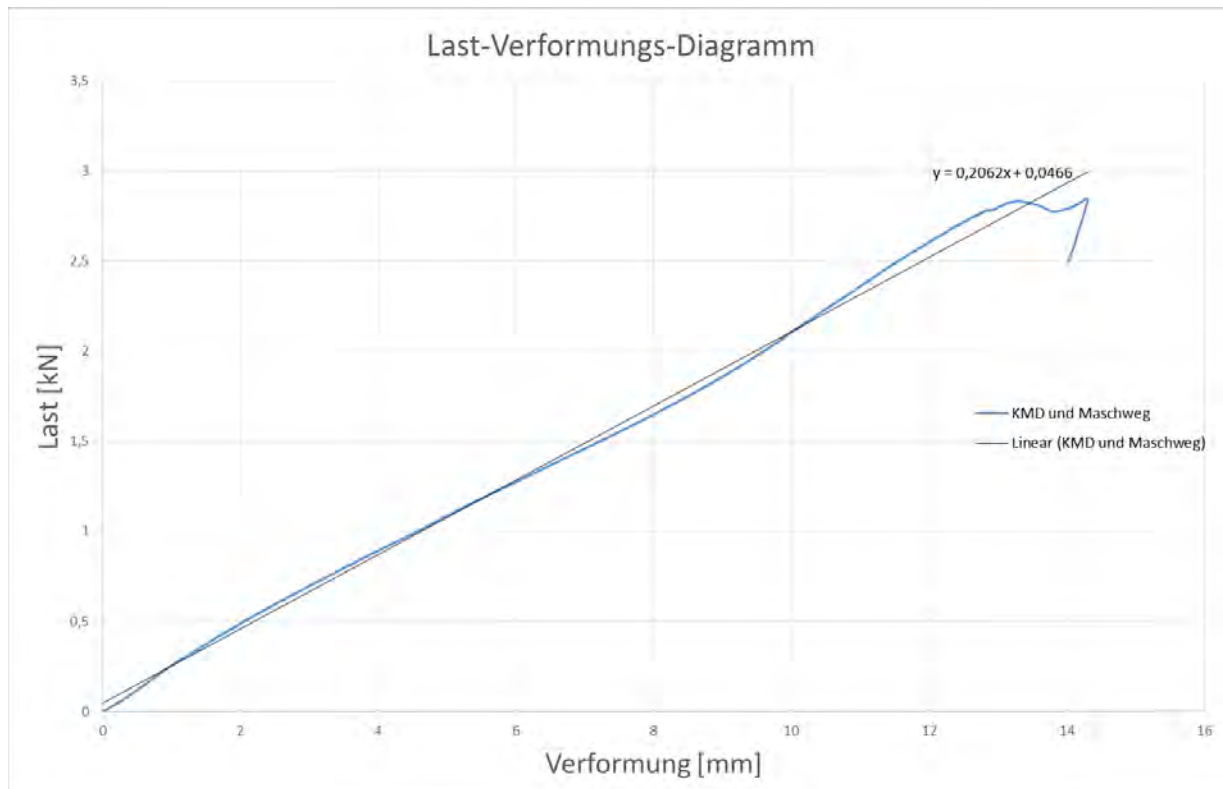
Anmerkungen

FS05	Datum 14.11.2016
	Versuch-Nr. 5

Versuchsart Zugversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
 Breite [mm] 1000

Fmax [kN] 2,85 k [kN/mm] 0,2062



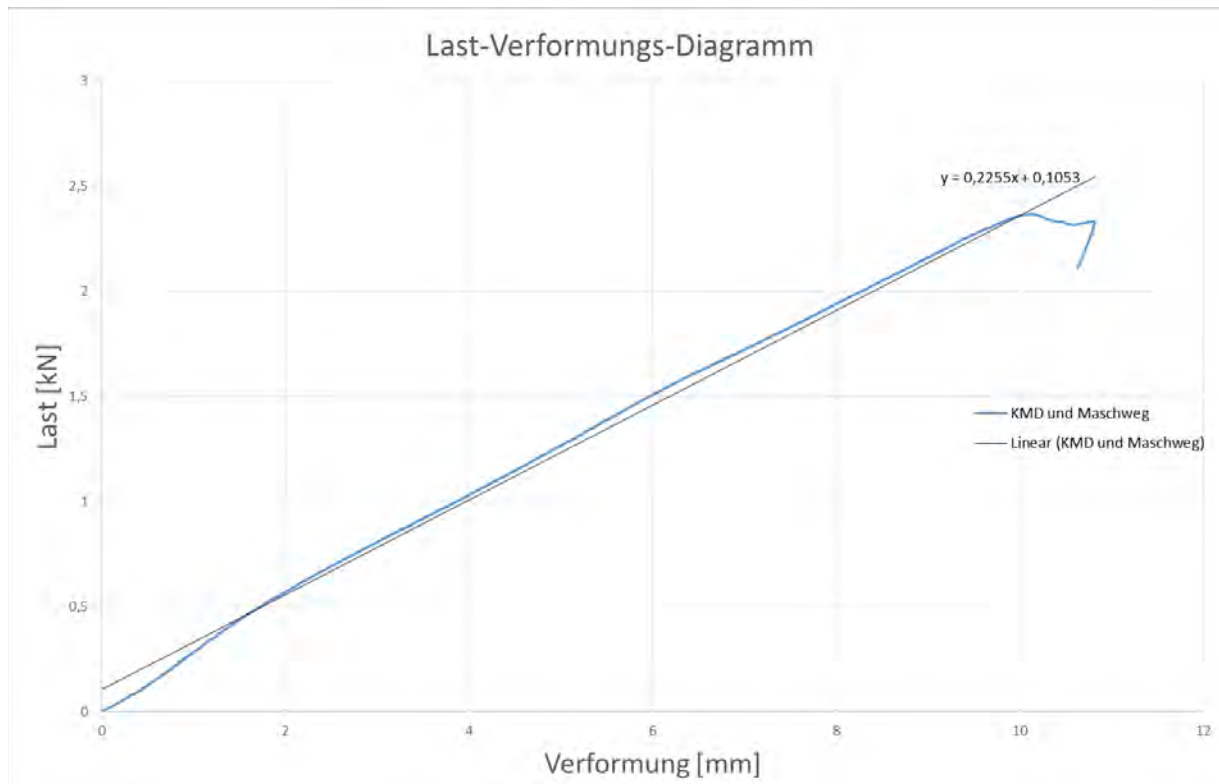
Anmerkungen

FS06Datum 14.11.2016
Versuch-Nr. 6

Versuchsart Zugversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 1000

Fmax [kN] 2,37 k [kN/mm] 0,2255



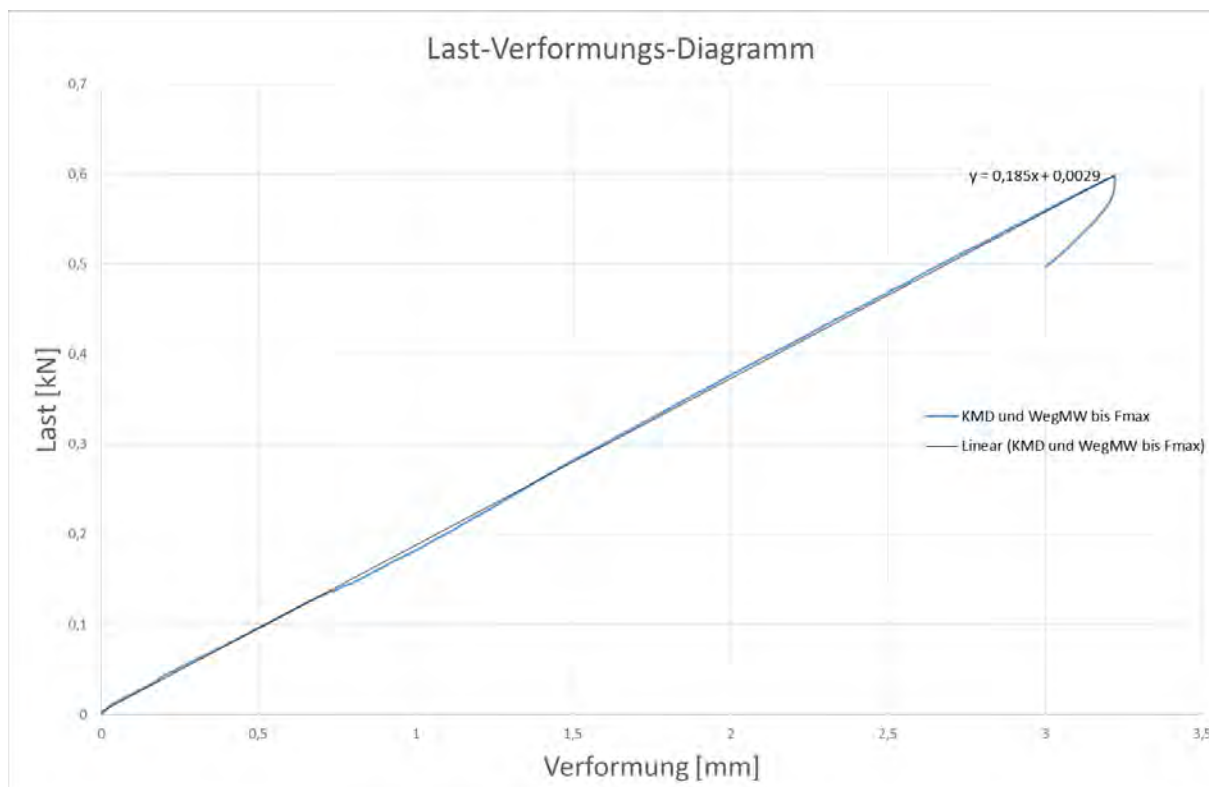
Anmerkungen

FS07	Datum 18.11.2016
	Versuch-Nr. 7

Versuchsart Druckversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 300

Fmax [kN] 0,60 k [kN/mm] 0,185



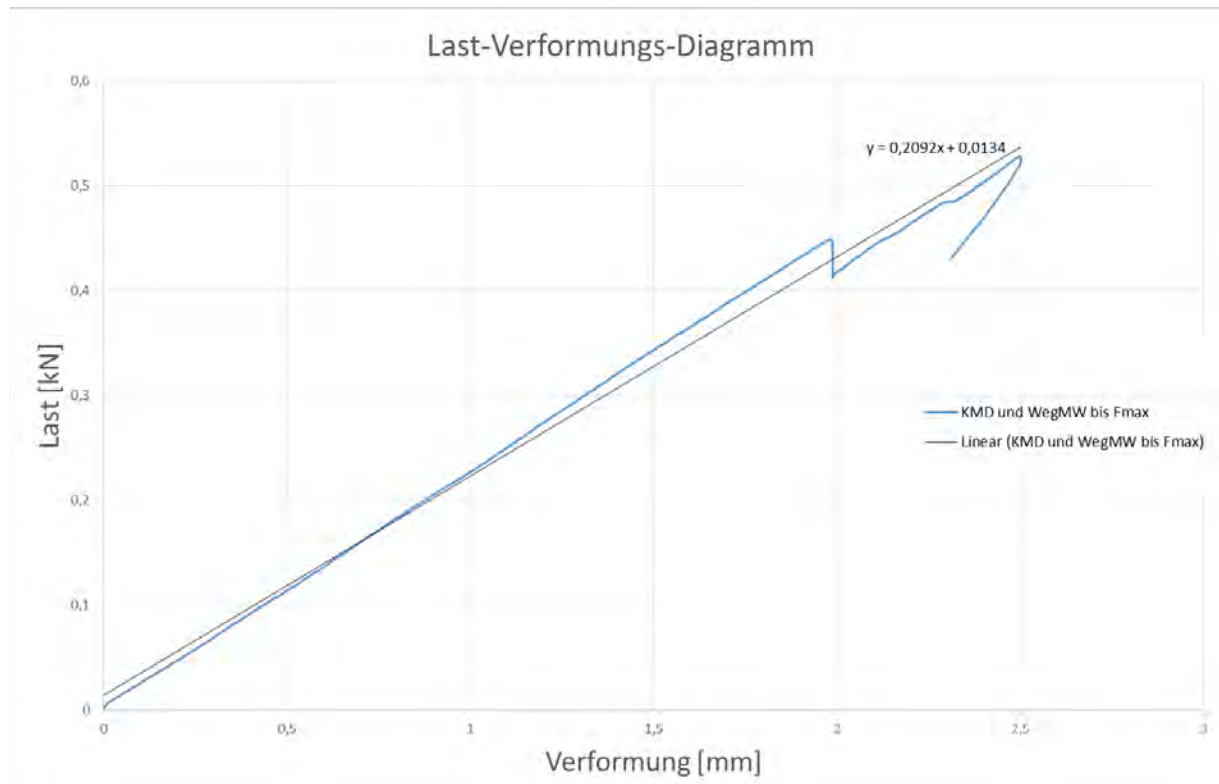
Anmerkungen

FS08	Datum 19.11.2016 Versuch-Nr. 8
-------------	-----------------------------------

Versuchsart Druckversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 300

Fmax [kN] 0,53 k [kN/mm] 0,2092



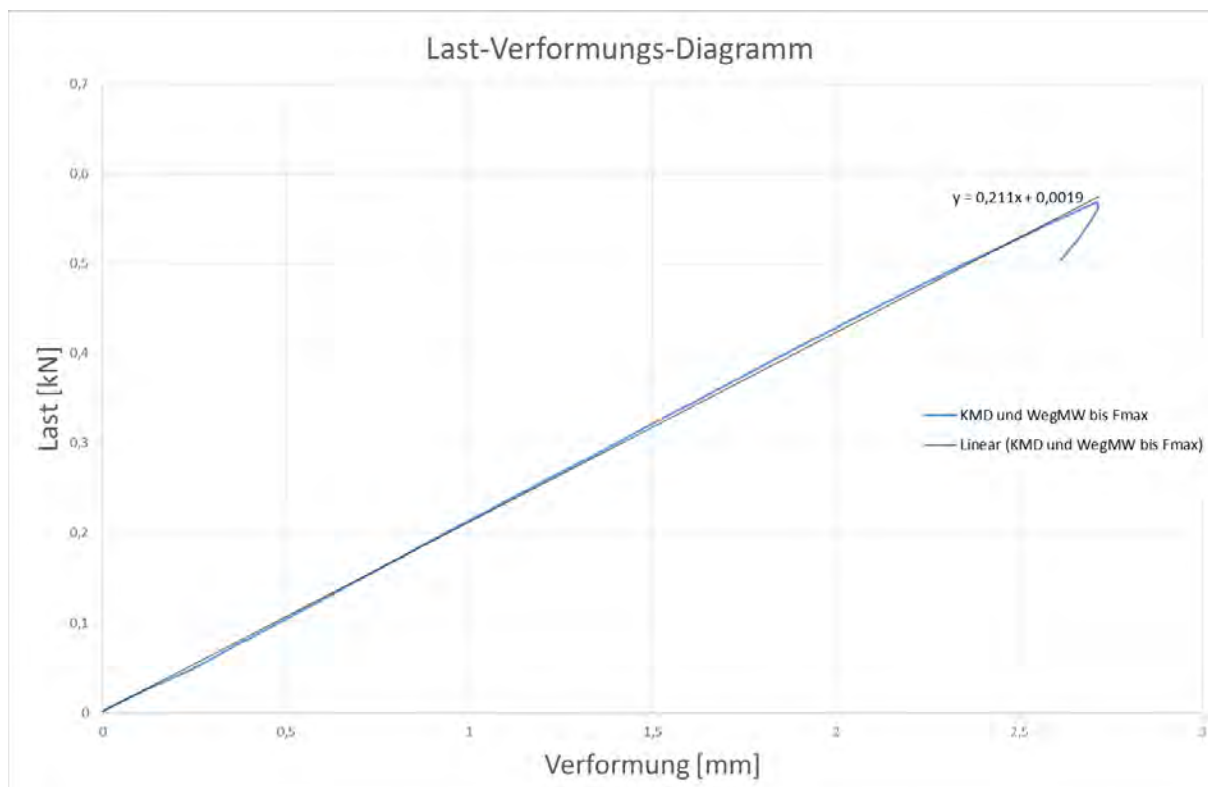
Anmerkungen

FS09	Datum 19.11.2016
	Versuch-Nr. 9

Versuchsart Druckversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
 Breite [mm] 300

Fmax [kN] 0,57 k [kN/mm] 0,211



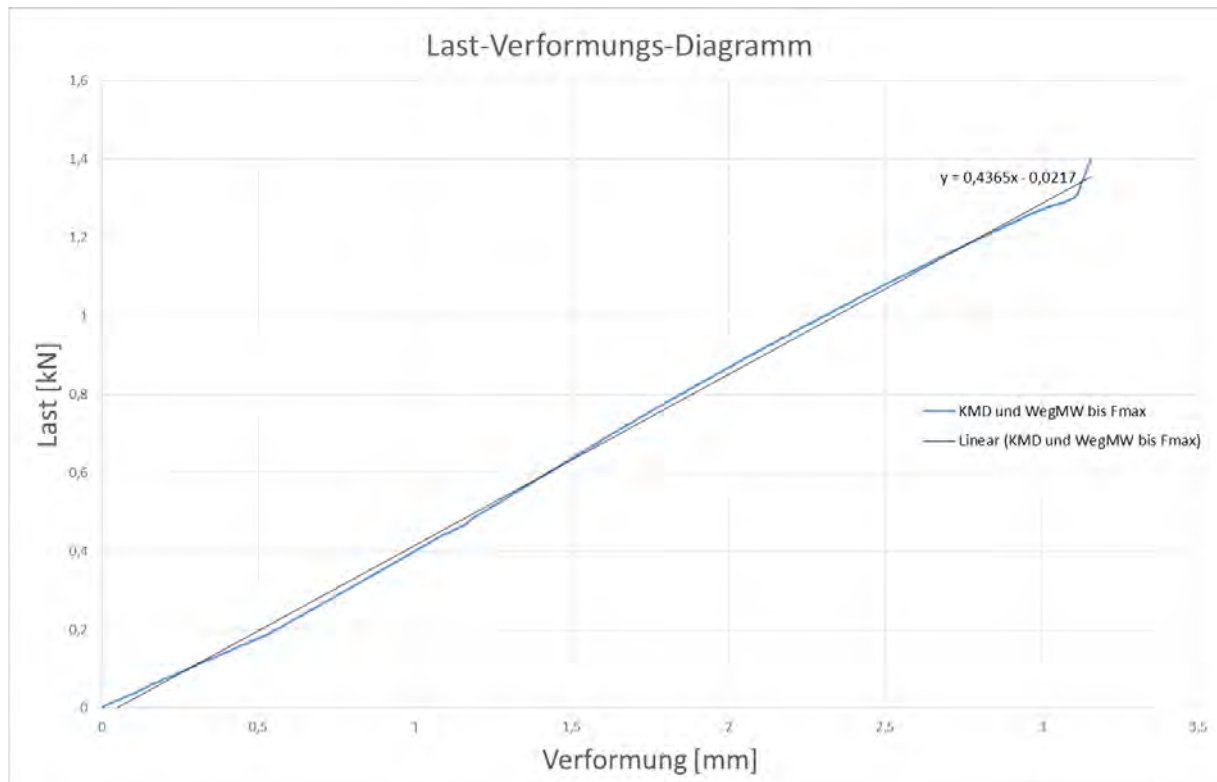
Anmerkungen

FS10Datum 19.11.2016
Versuch-Nr. 10

Versuchsart Druckversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 1000

Fmax [kN] 1,31 k [kN/mm] 0,4365



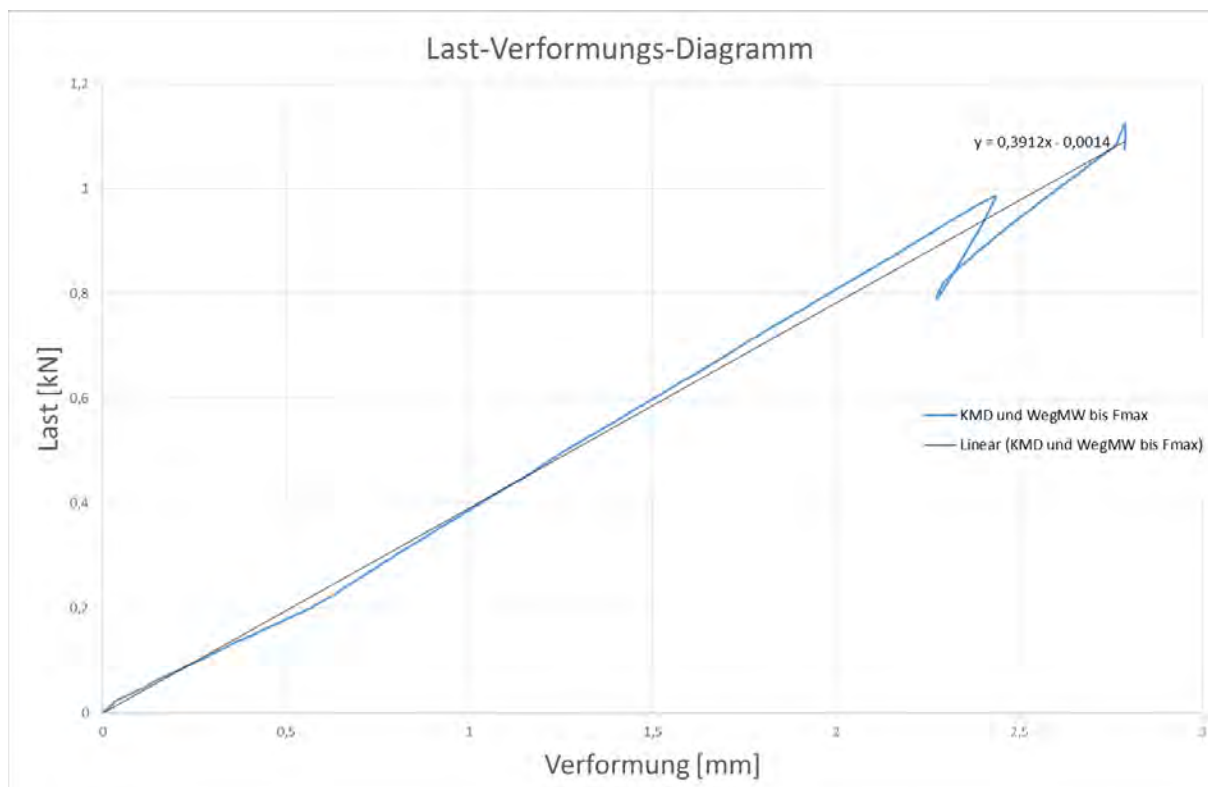
Anmerkungen

FS11	Datum 19.11.2016
	Versuch-Nr. 11

Versuchsart Druckversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 1000

Fmax [kN] 1,12 k [kN/mm] 0,3912



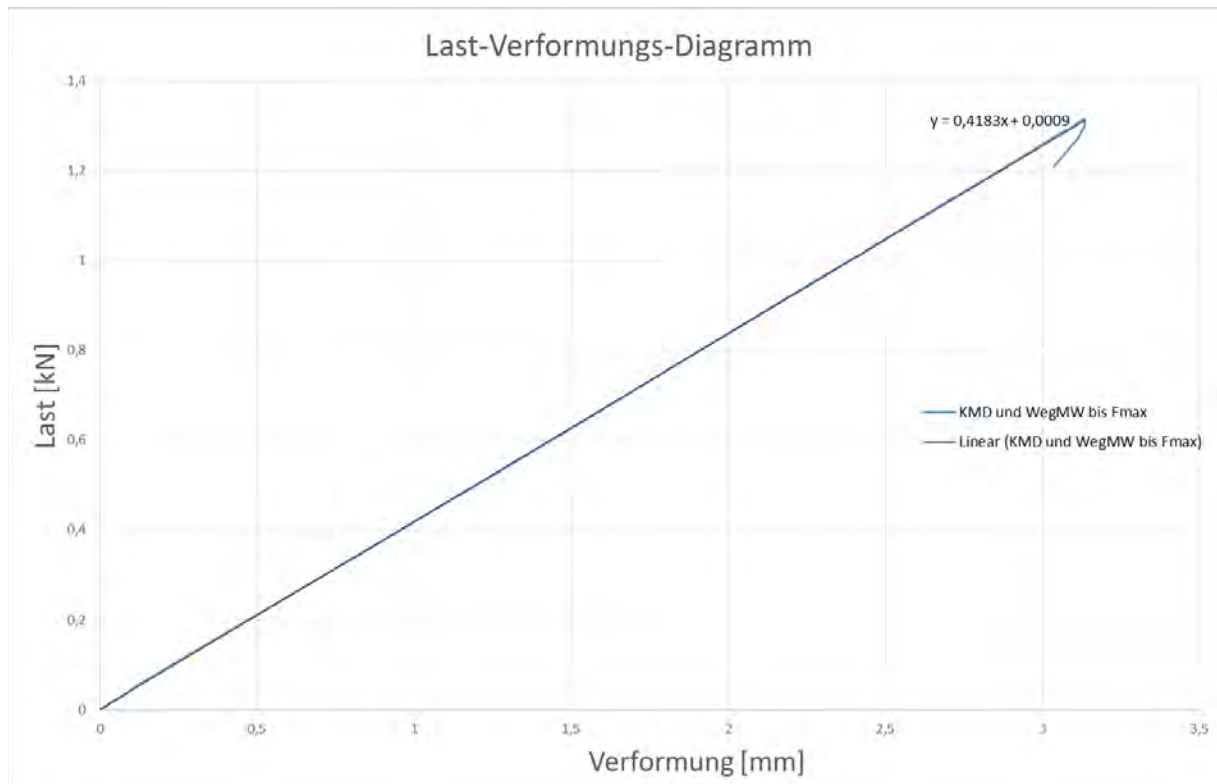
Anmerkungen

FS12Datum 19.11.2016
Versuch-Nr. 12

Versuchsart Druckversuch

Kassettenprofile 100/600 t=0,75
Breite [mm] 1000

Fmax [kN] 1,31 k [kN/mm] 0,4183



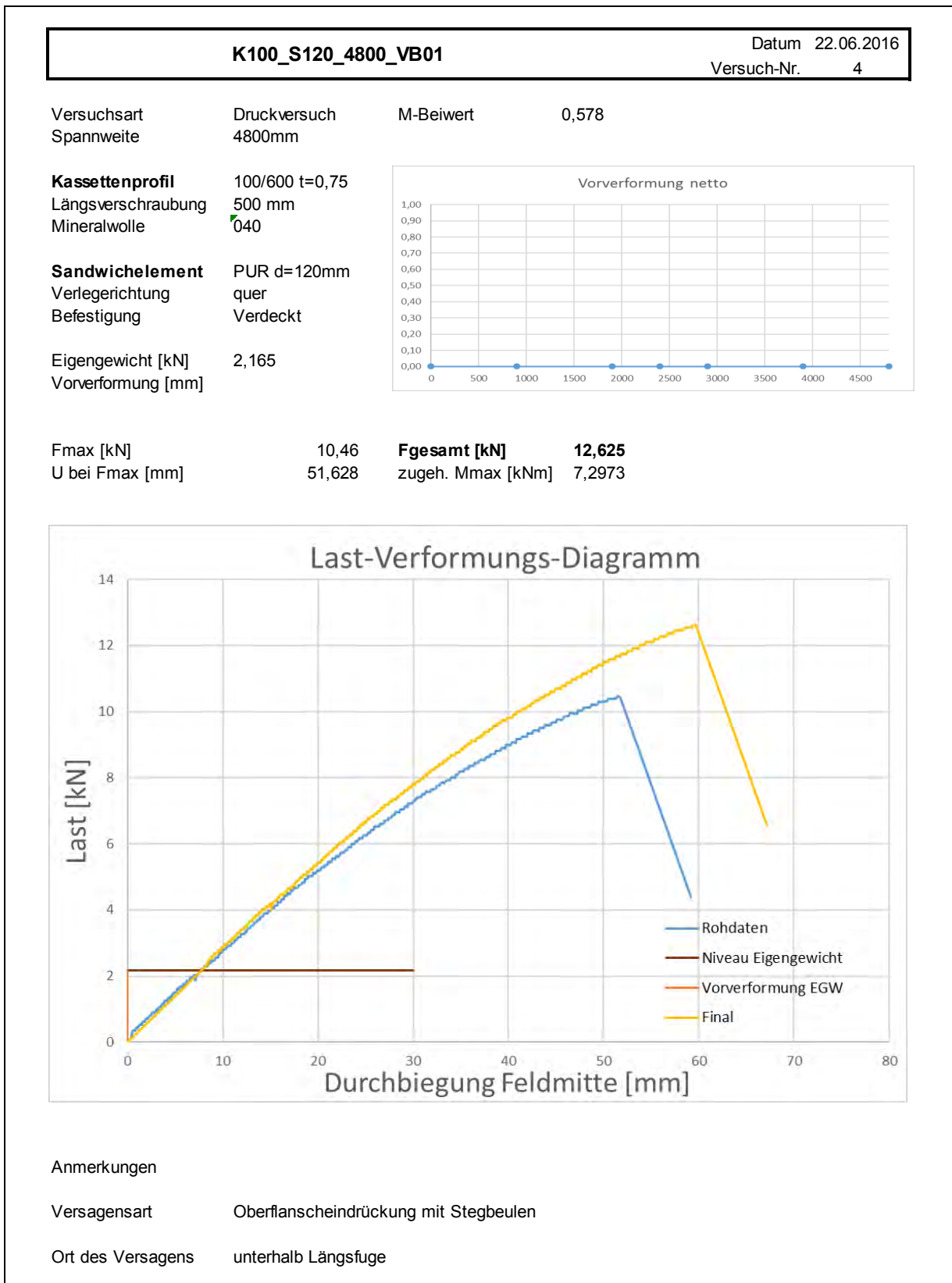
Anmerkungen

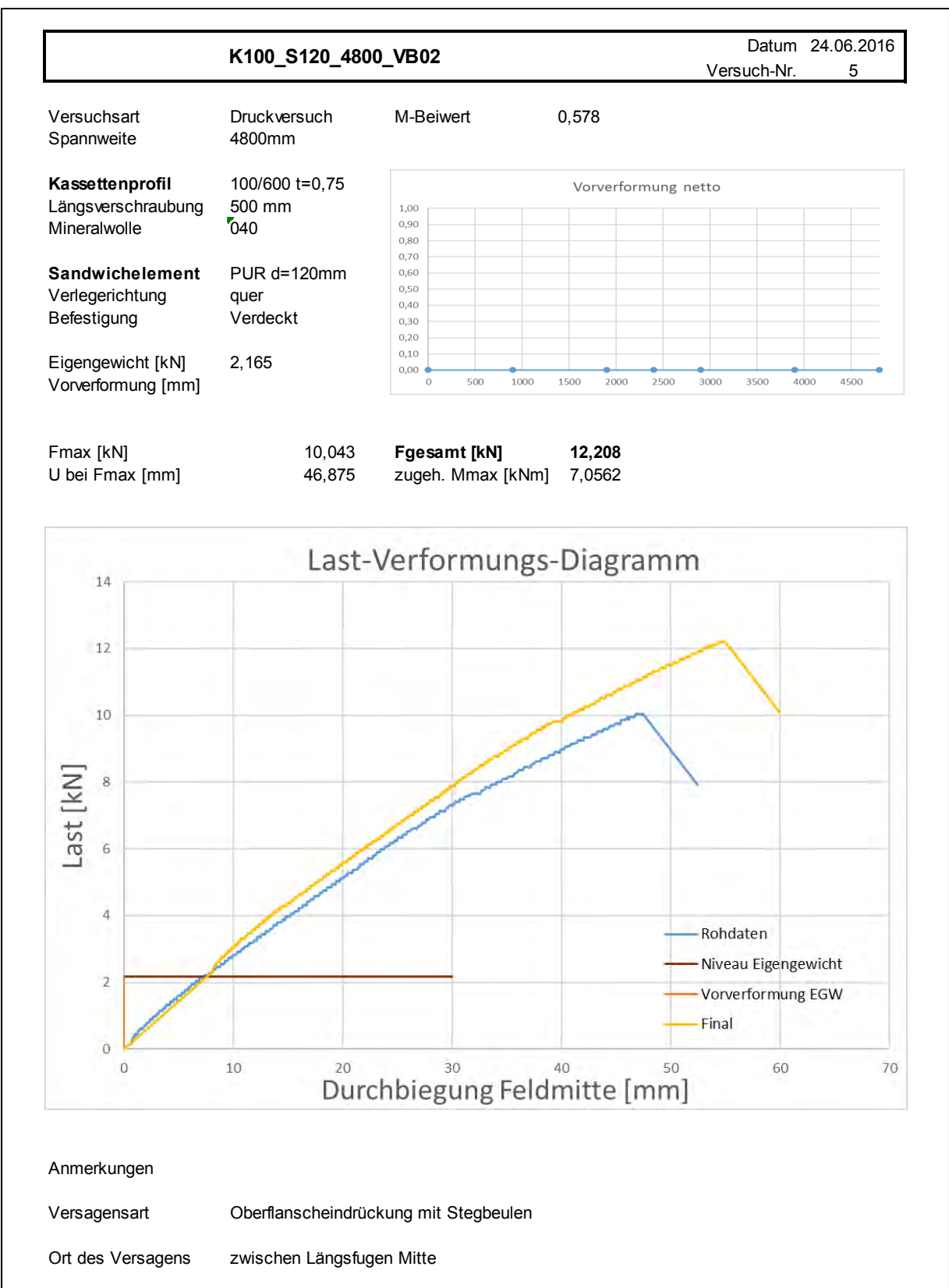
Anhang B3

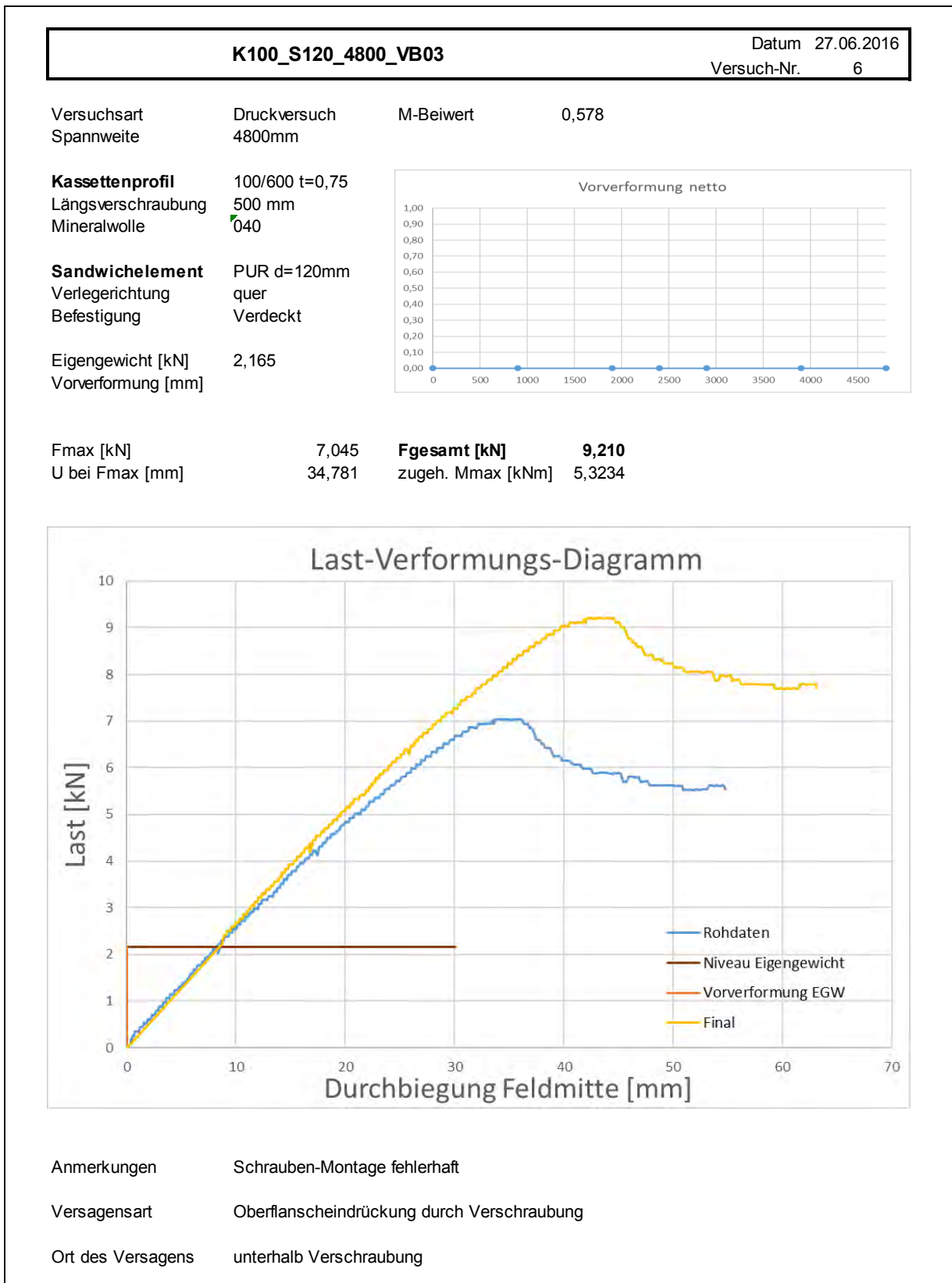
Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Hybridfassaden

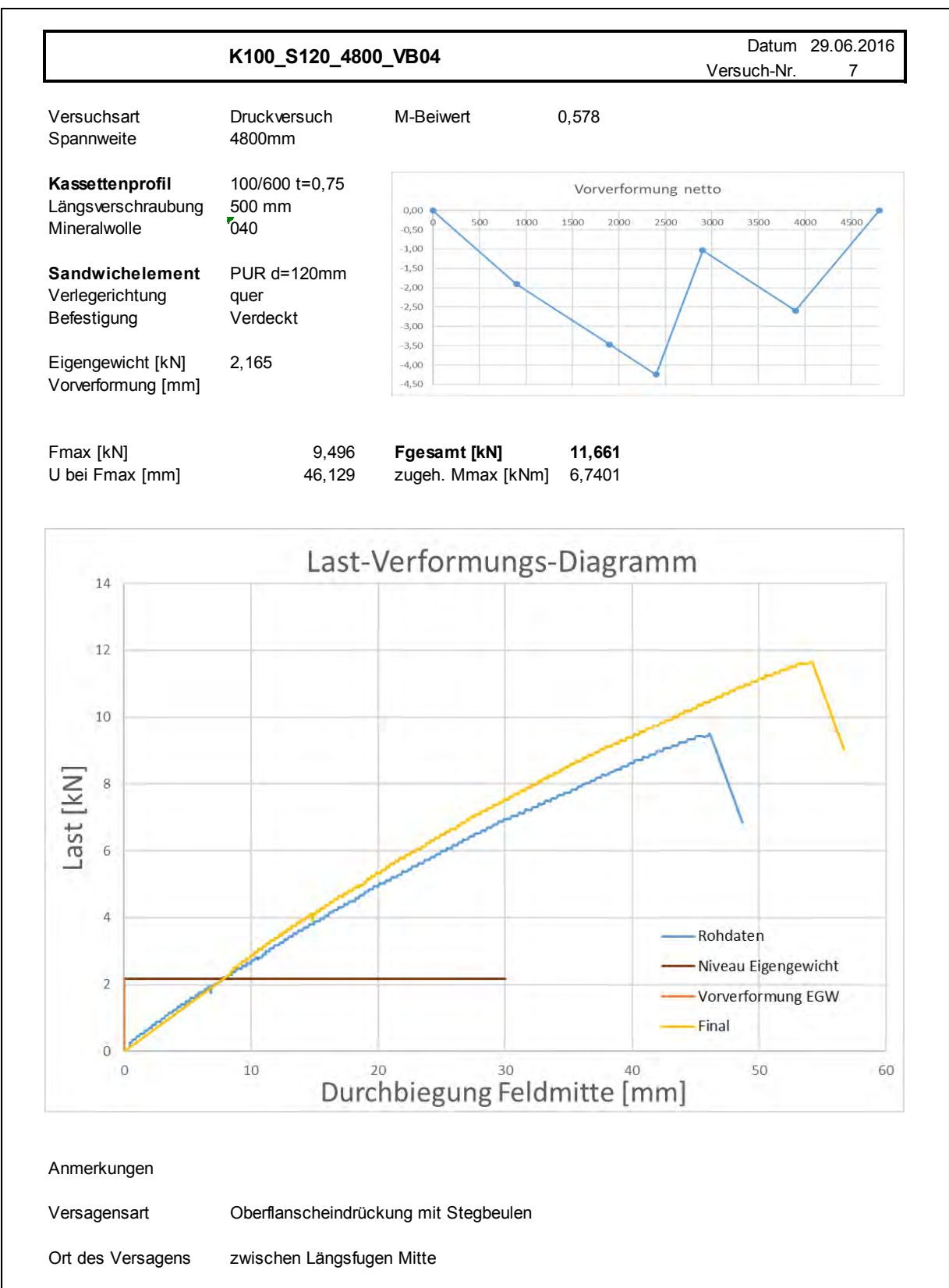
Das IGF-Vorhaben „Bauen im Bestand – Lösungen für Dach und Fassade in Stahlleichtbauweise“, IGF-Projekt Nr. 18623 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

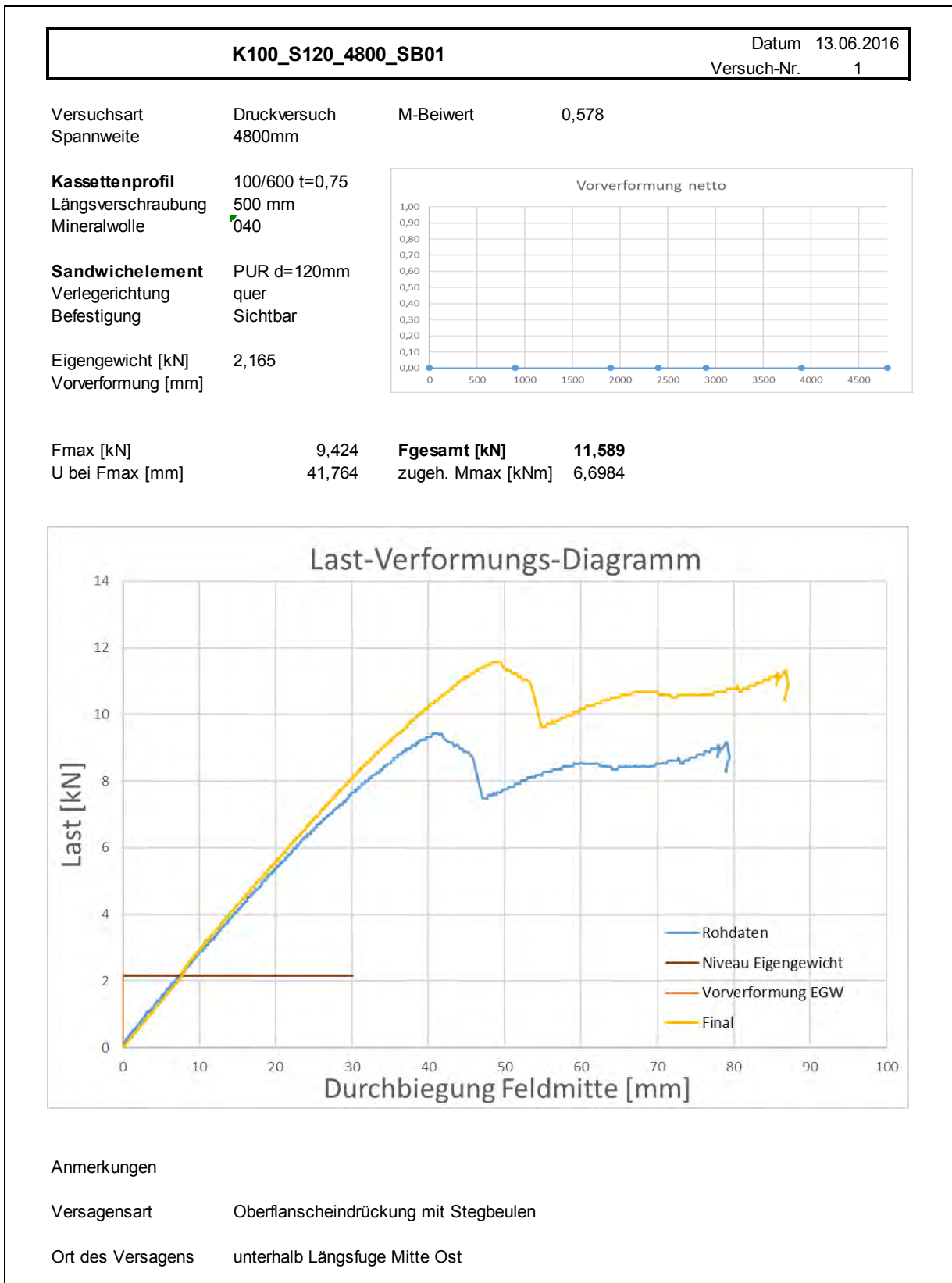


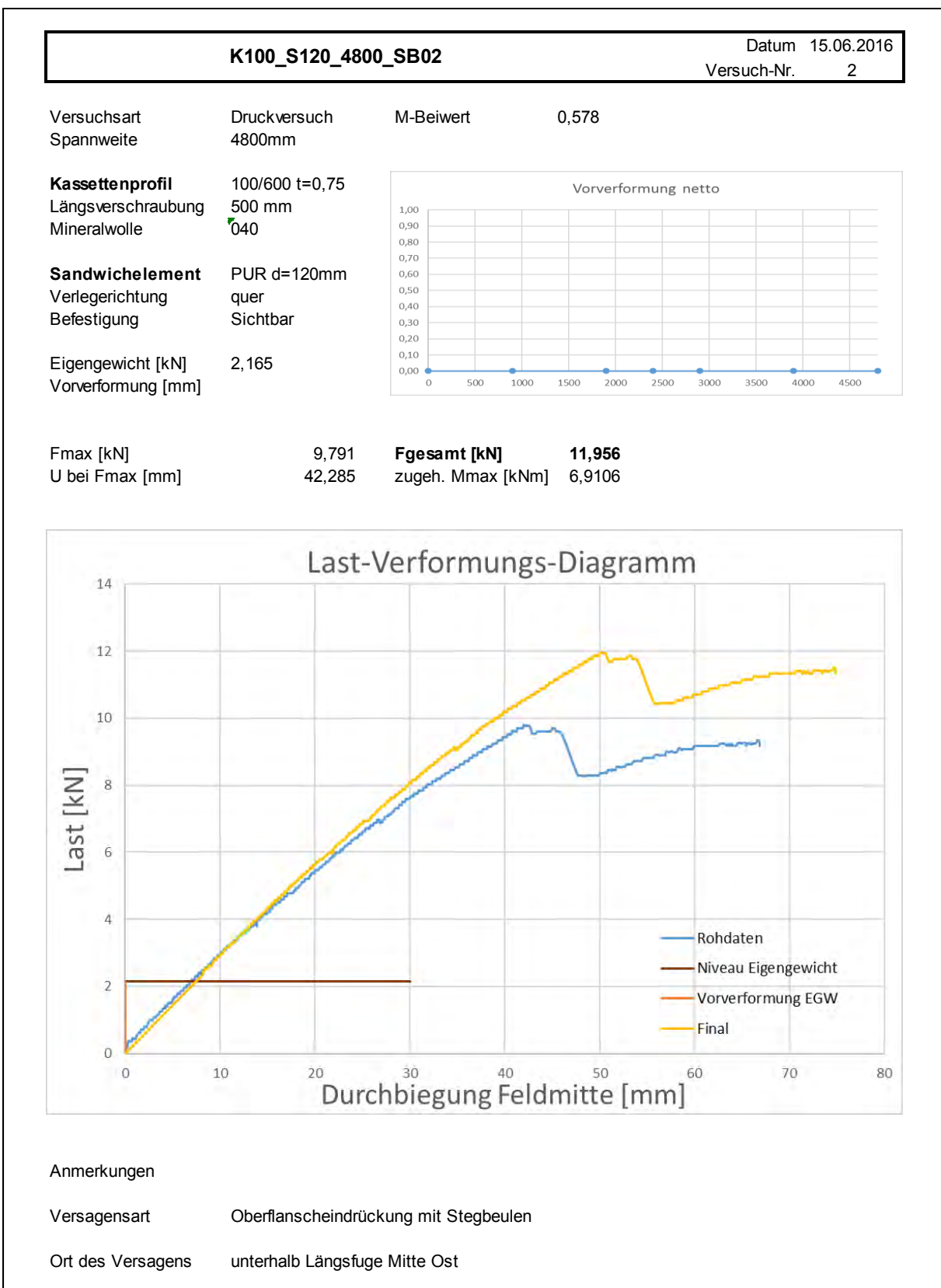


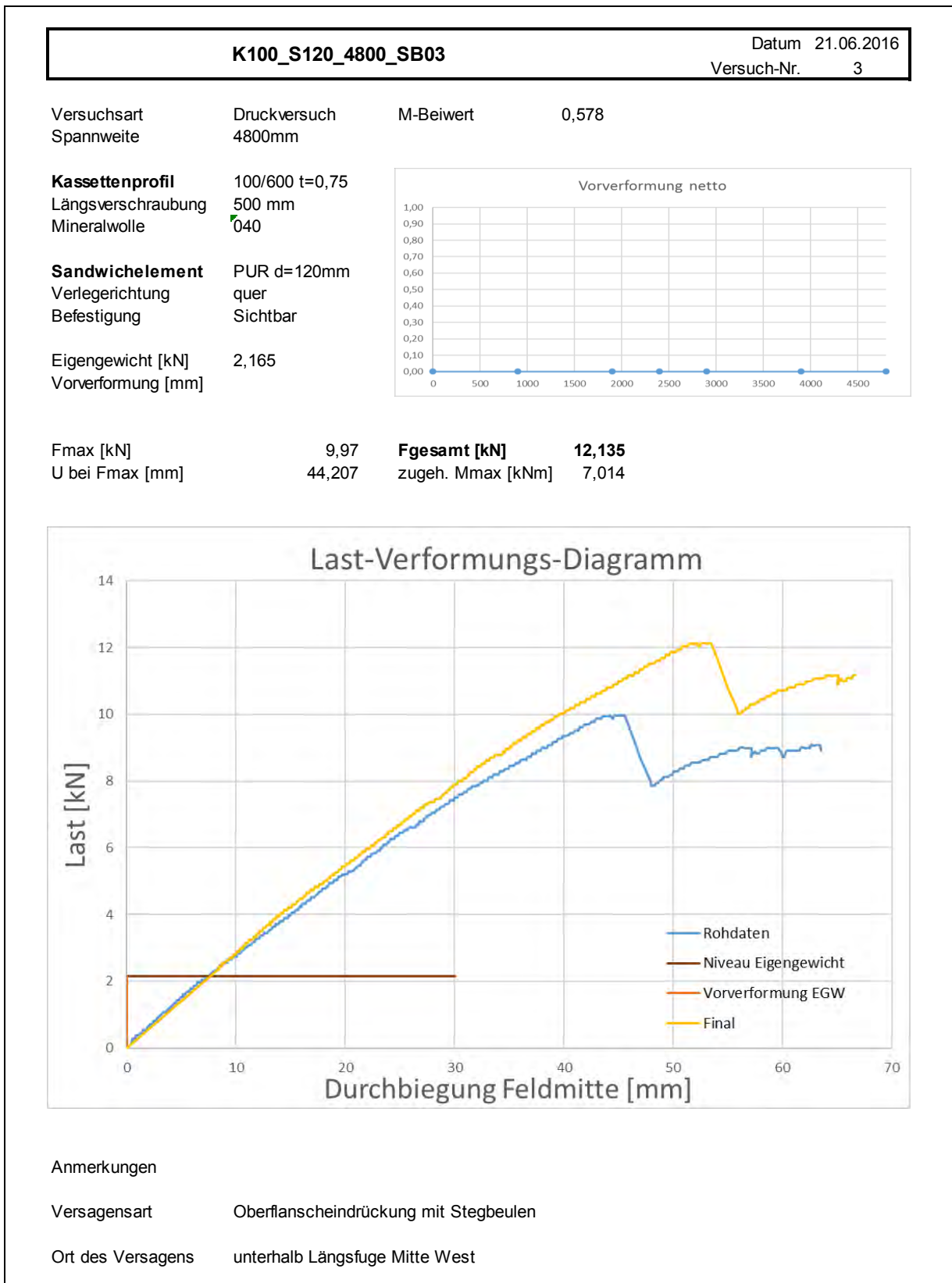


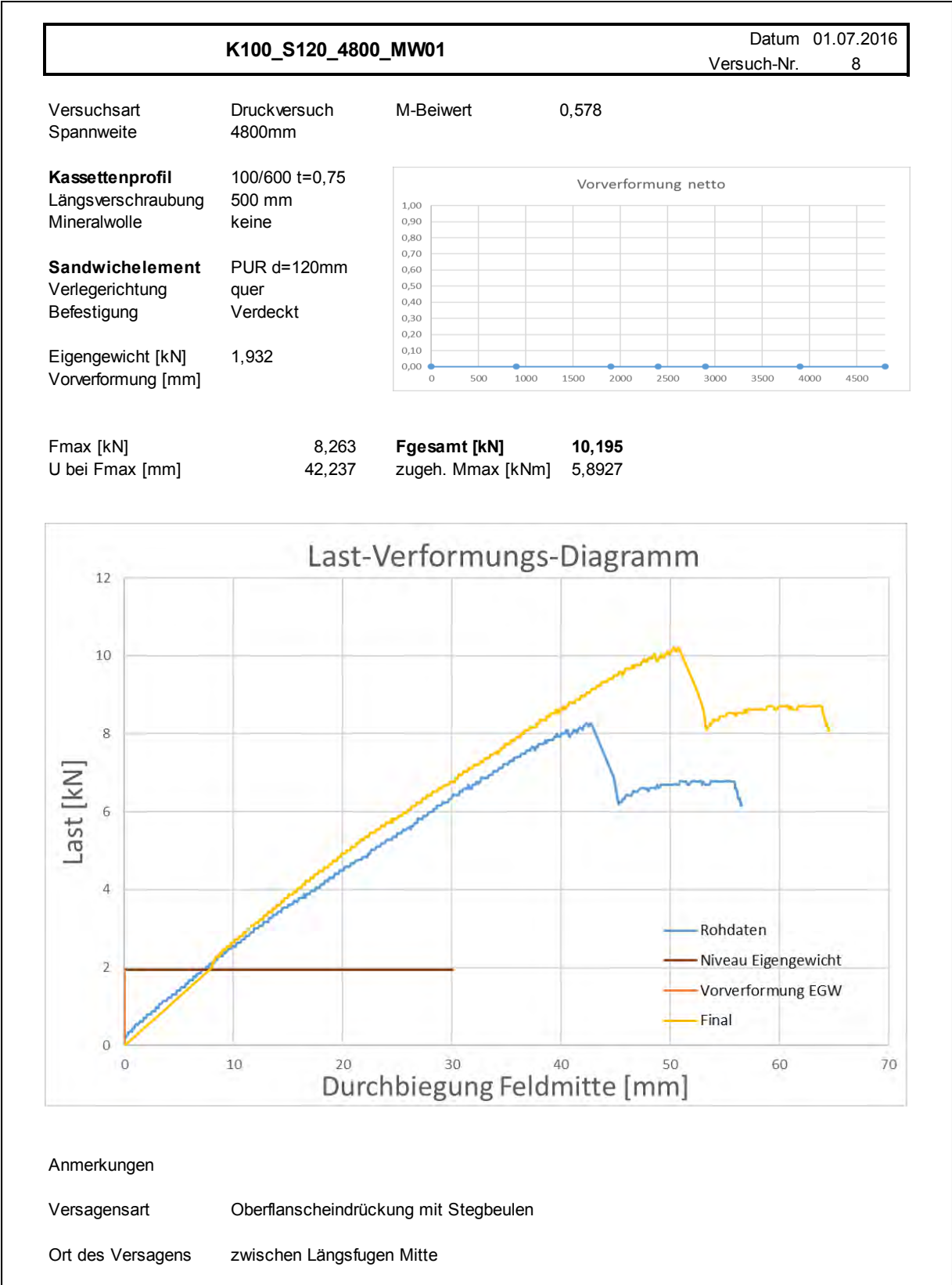


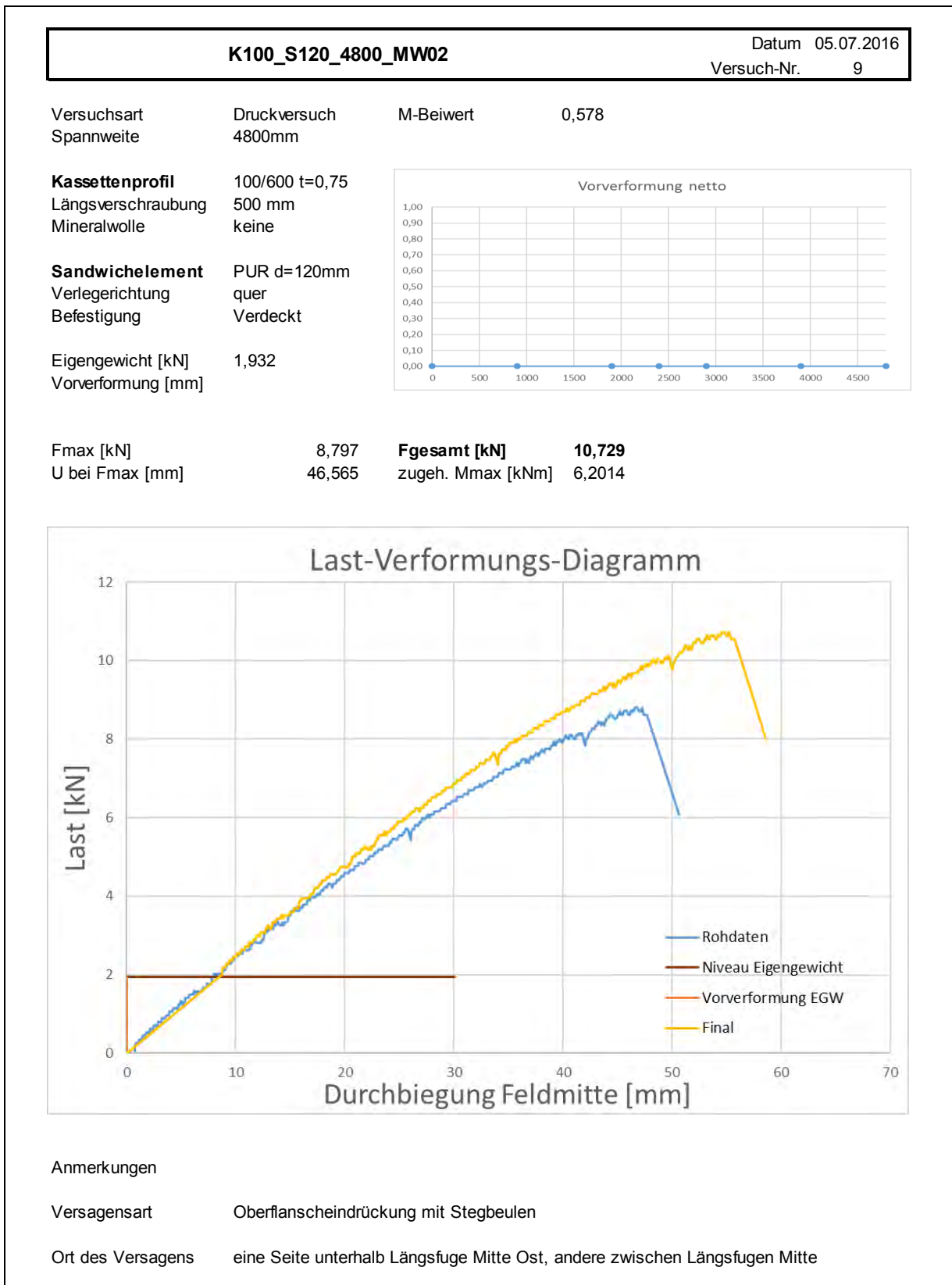


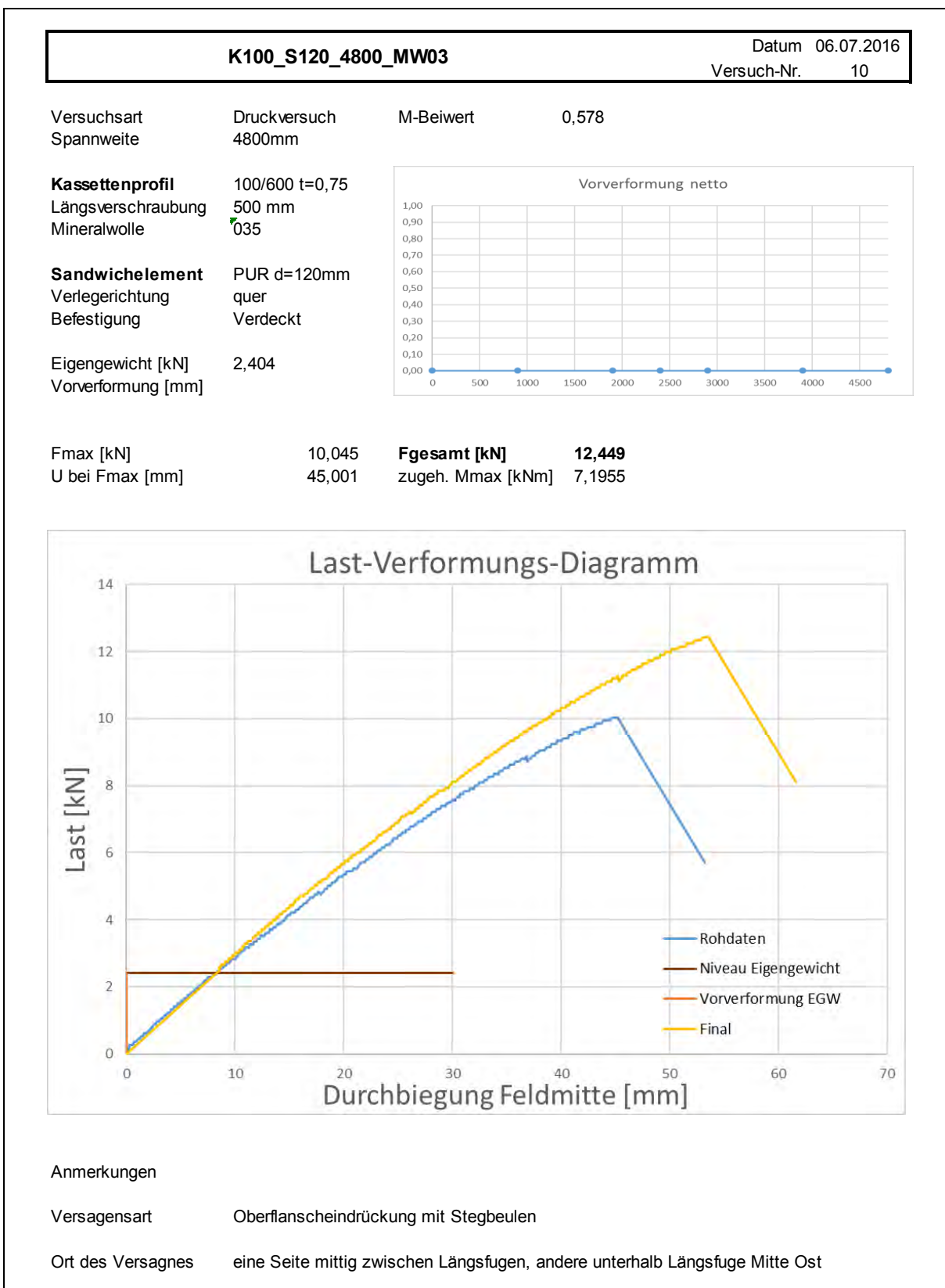


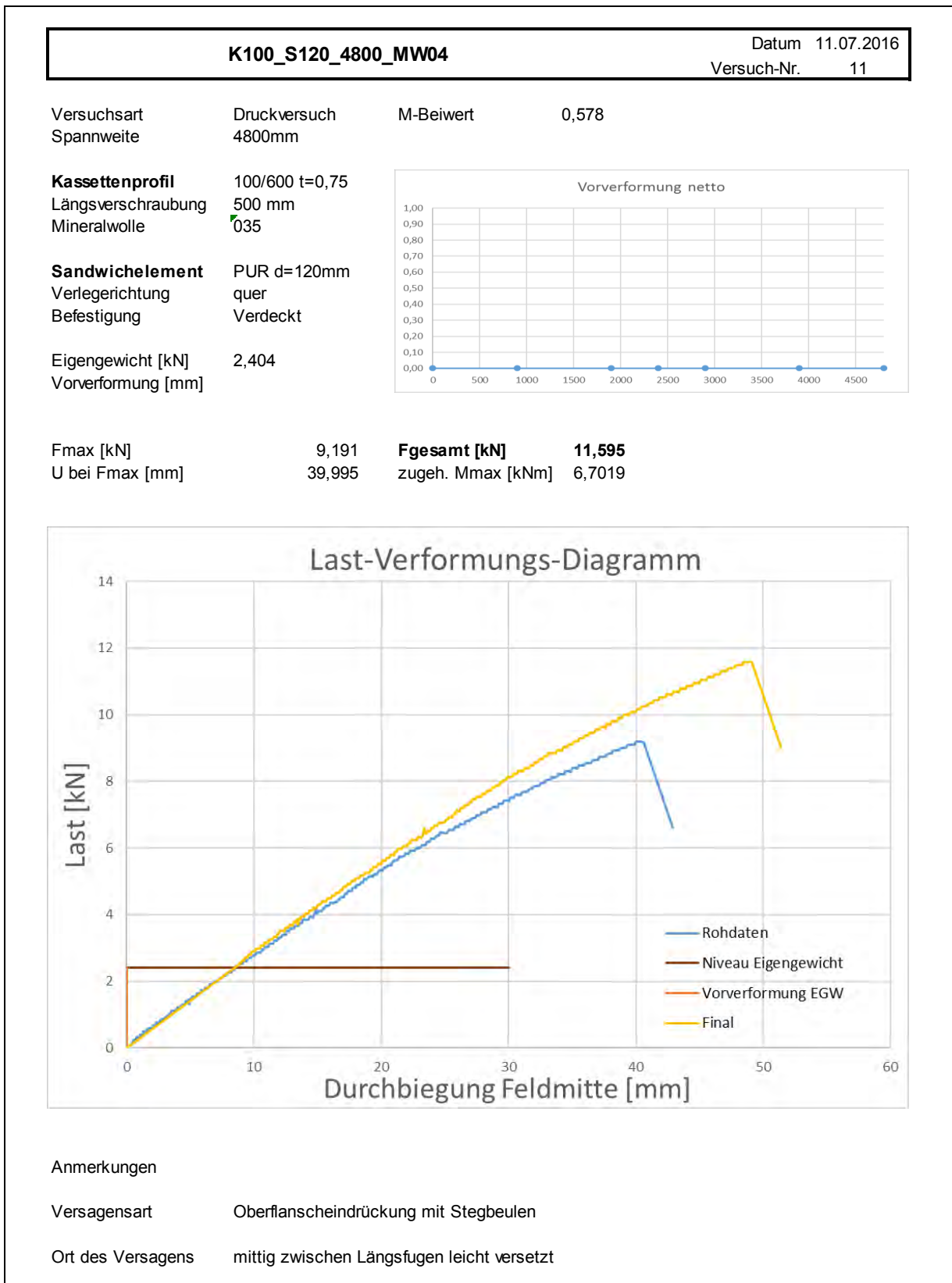


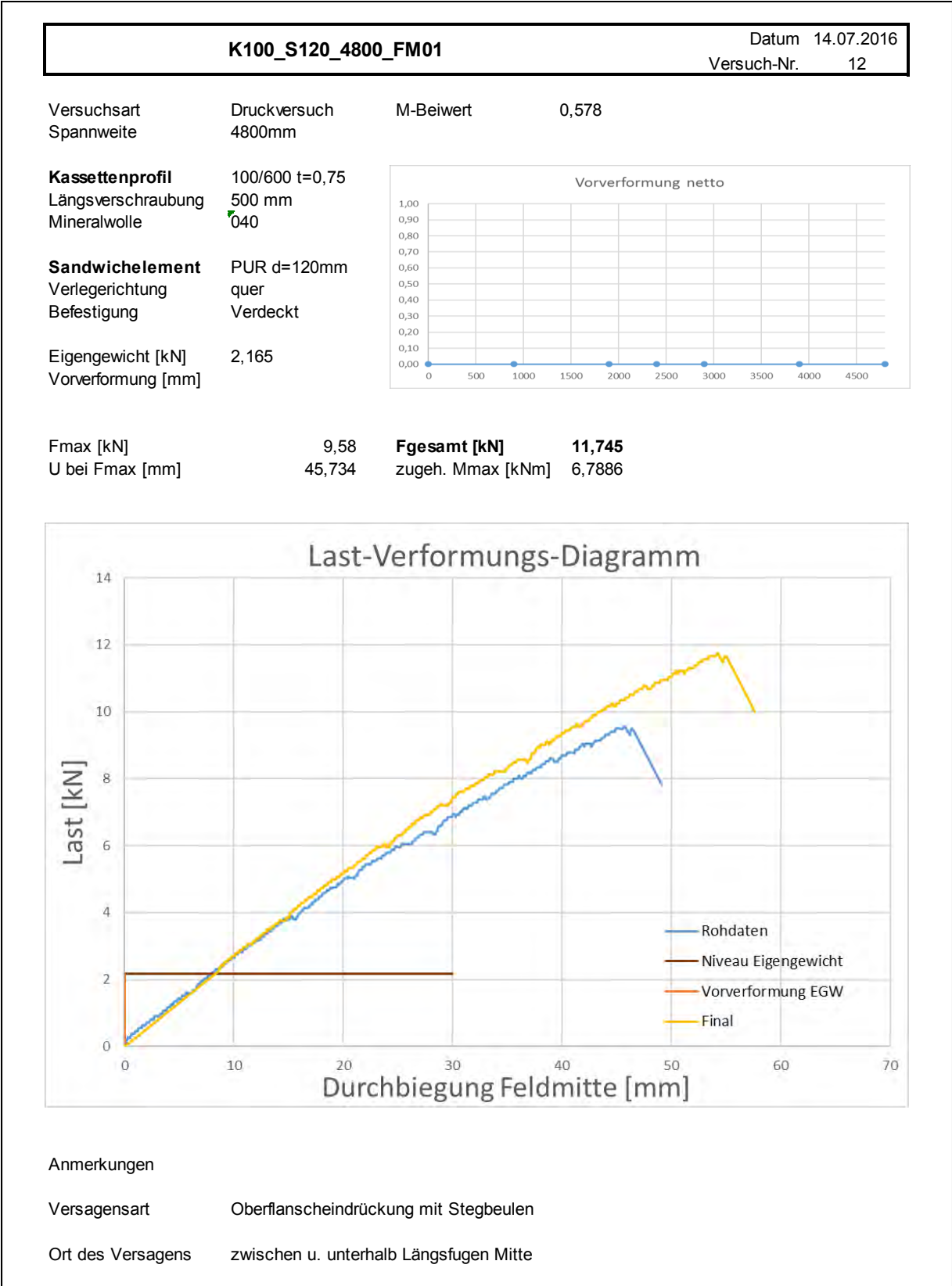












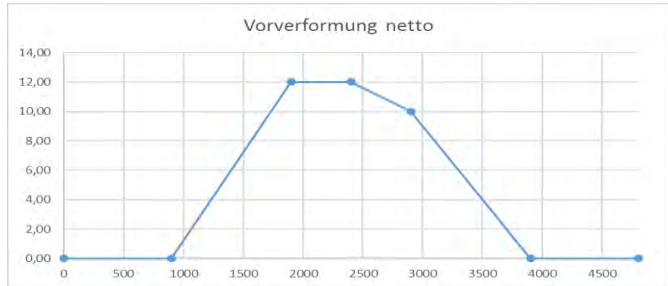
K100_S120_4800_0_VB01		Datum 02.08.2016
		Versuch-Nr. 17

Versuchsart Druckversuch M-Beiwert 0,578
 Spannweite 4800mm

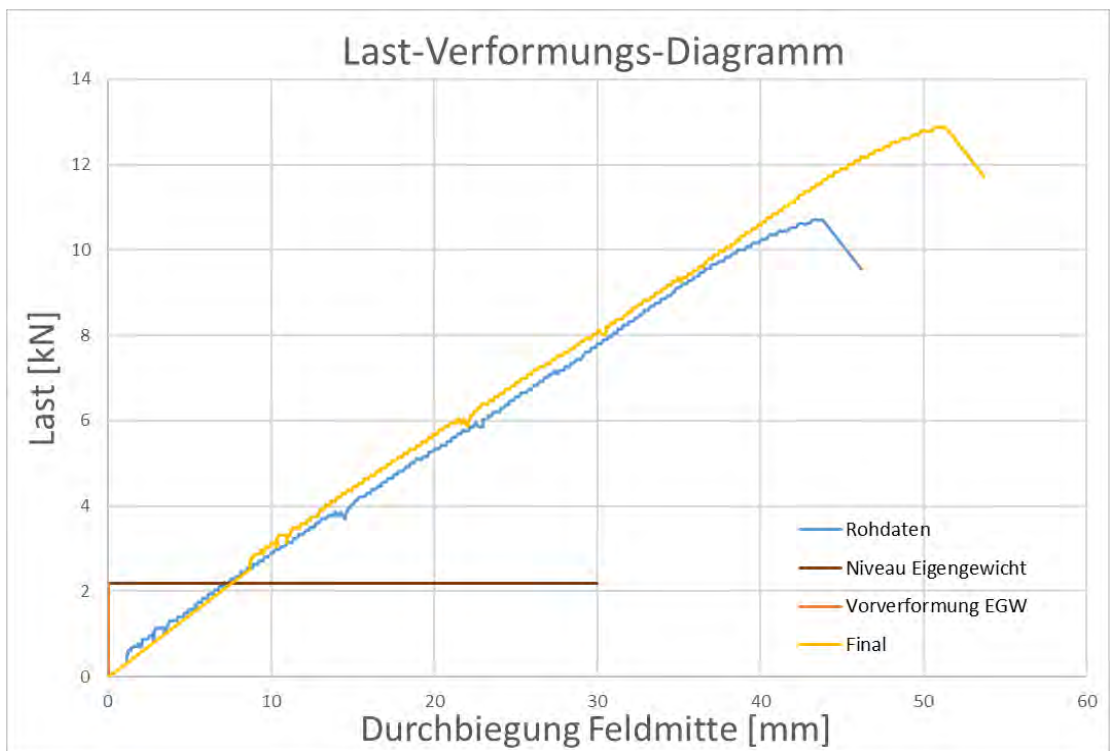
Kassettenprofil 100/600 t=0,75
 Längsschraubung 500 mm
 Mineralwolle 040

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung quer
 Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] 2,186
 Vorverformung [mm] 0



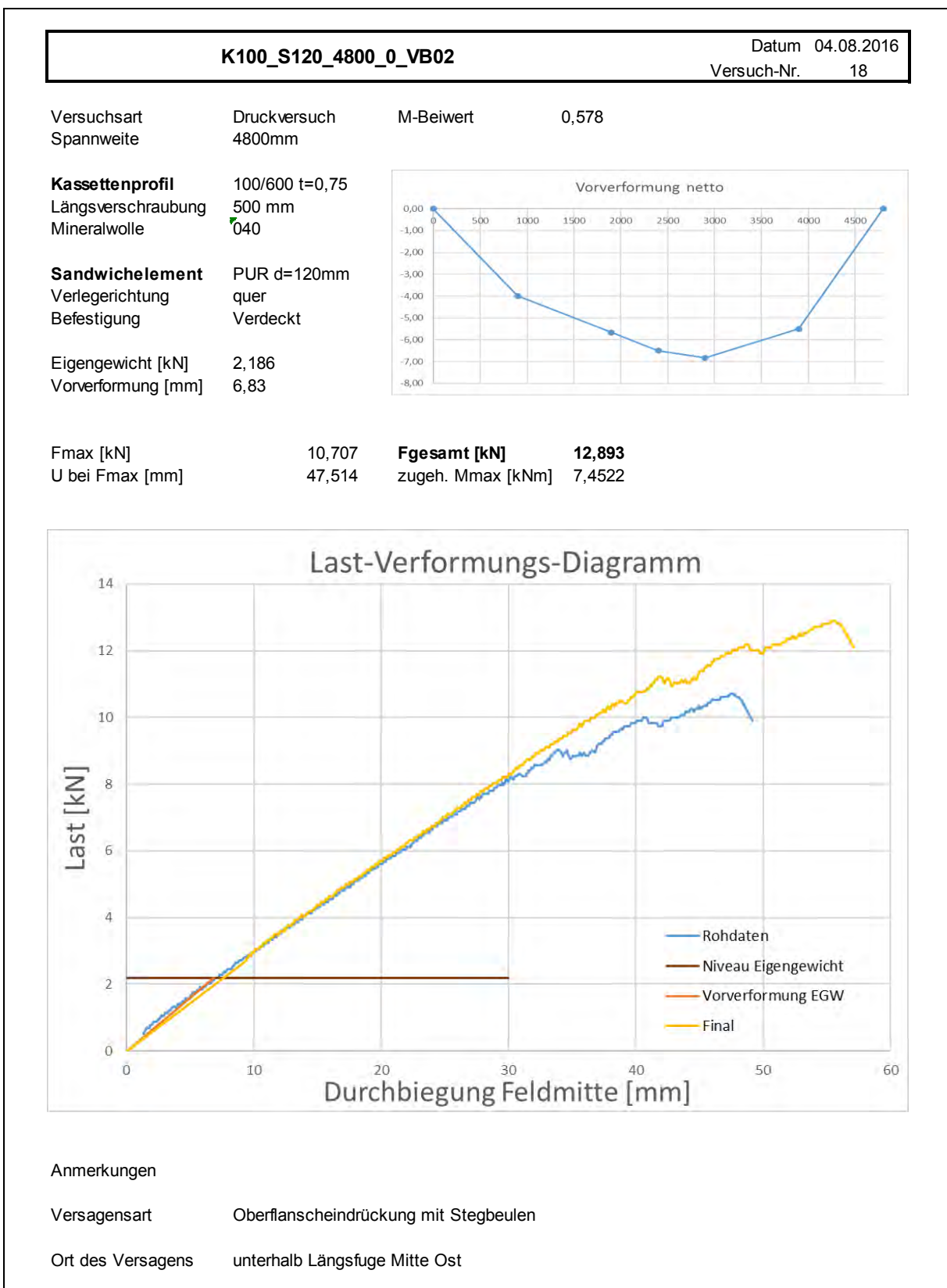
Fmax [kN] 10,708 **Fgesamt [kN] 12,894**
 U bei Fmax [mm] 43,422 zugeh. Mmax [kNm] 7,4527

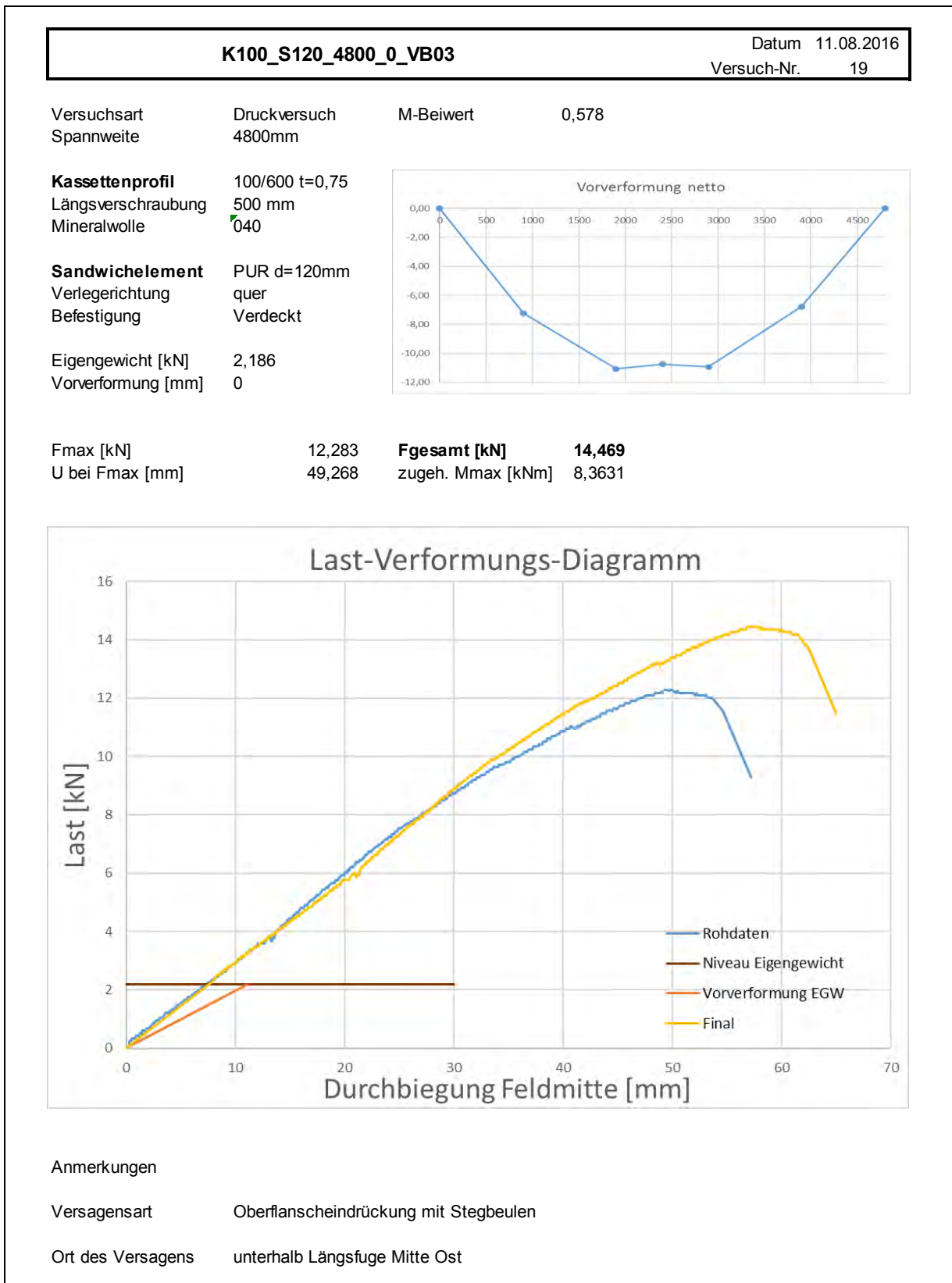


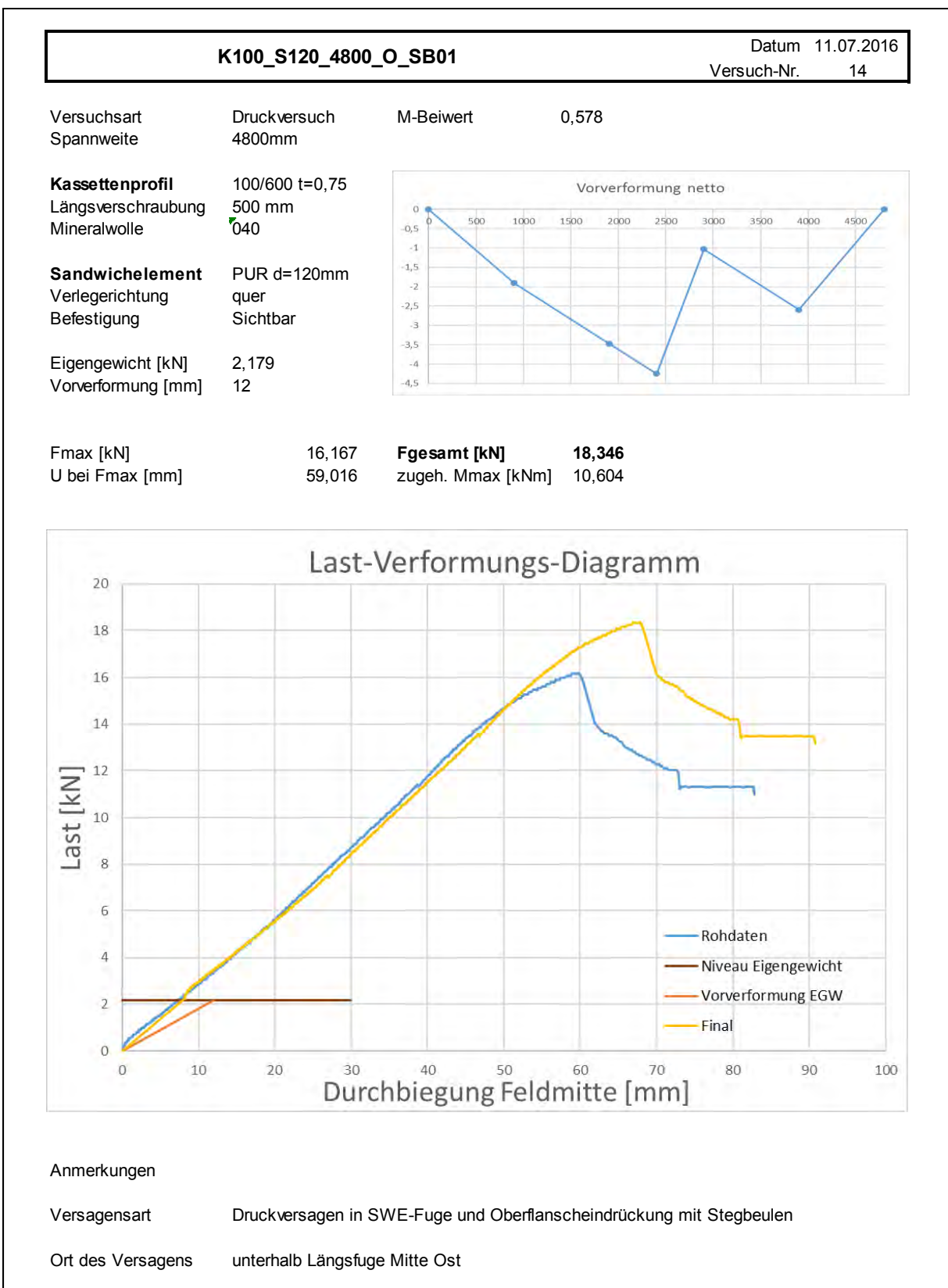
Anmerkungen

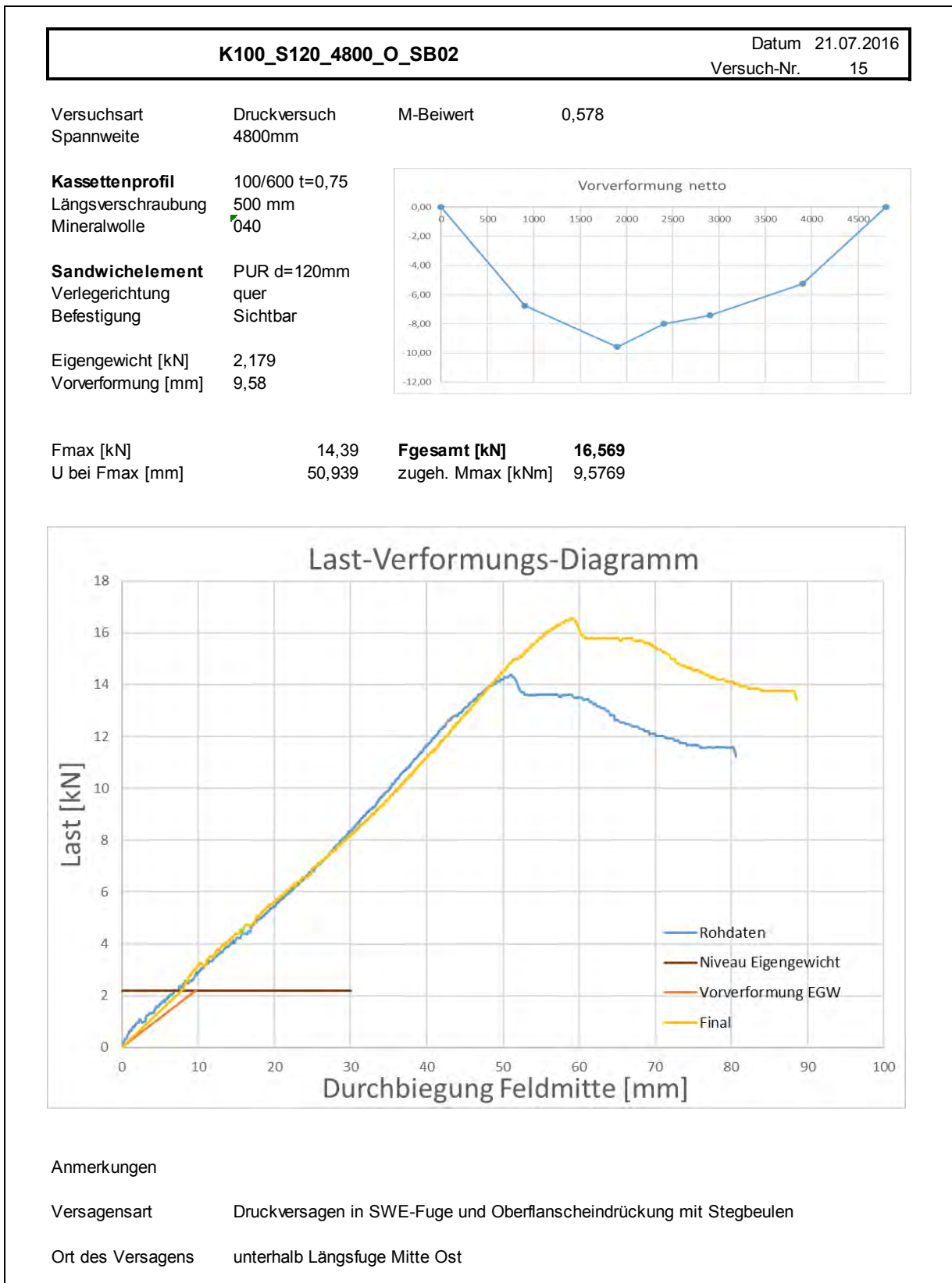
Versagensart Oberflanscheindrückung mit Stegbeulen

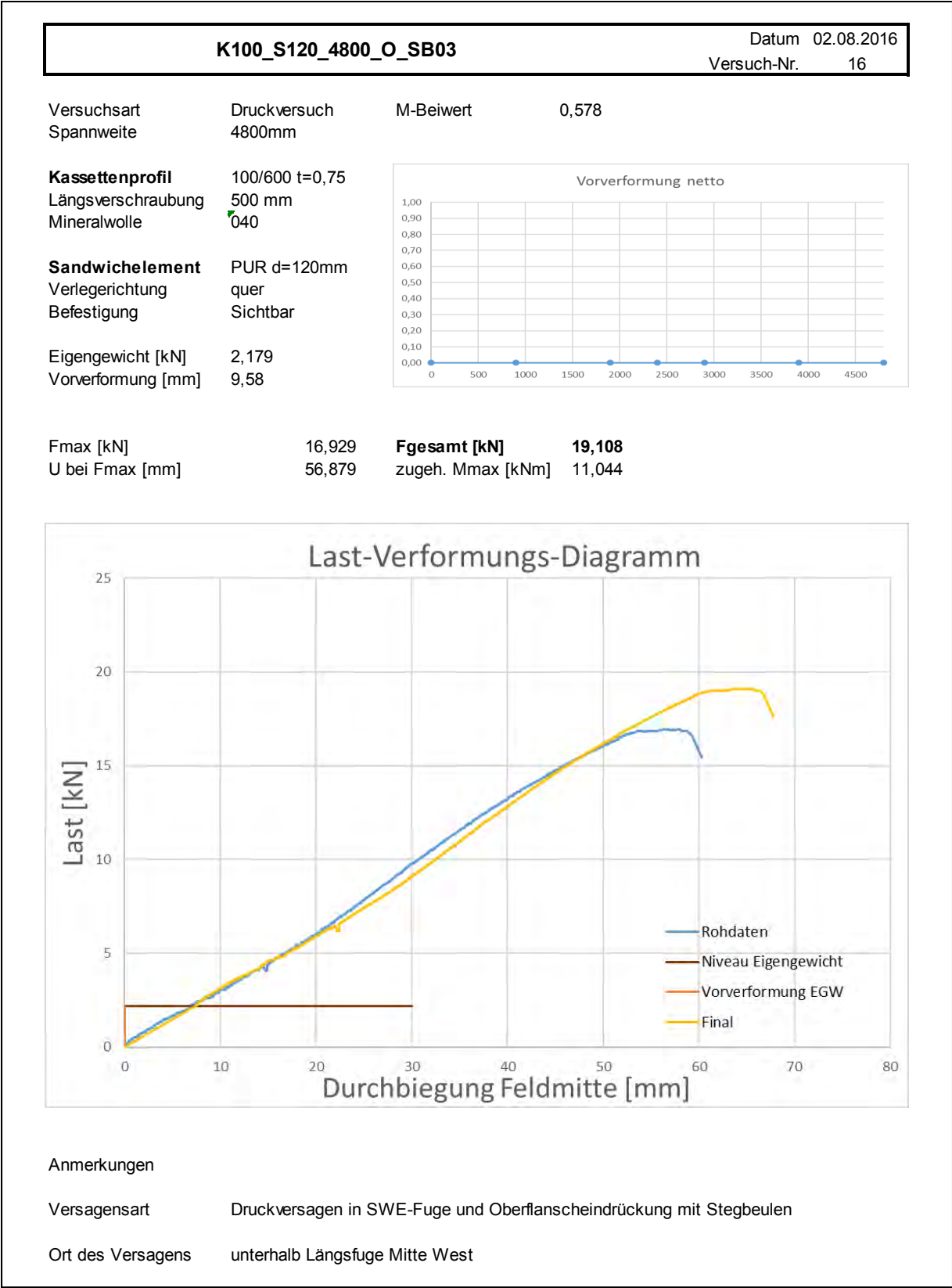
Ort des Versagens unterhalb Längsfuge

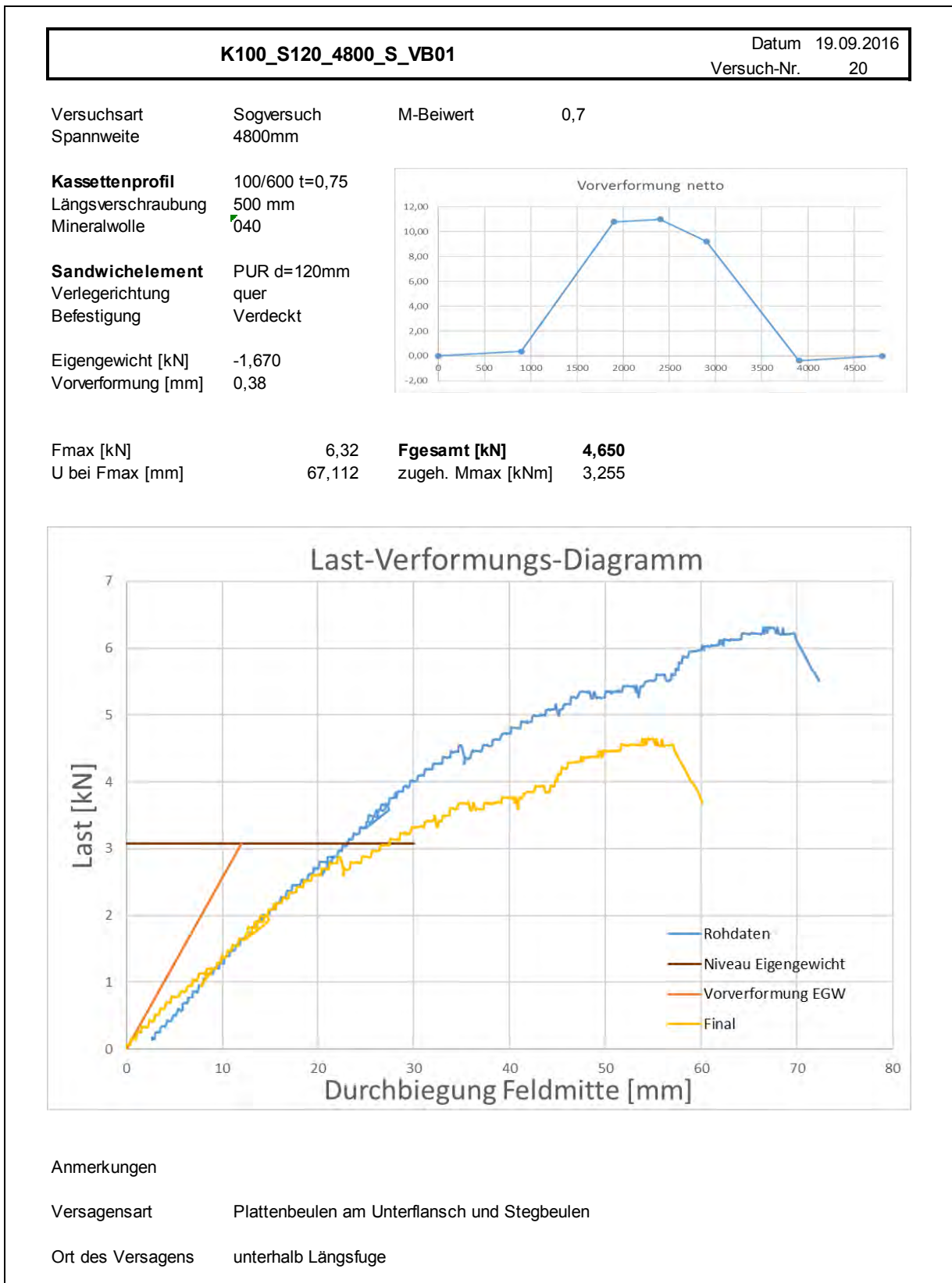












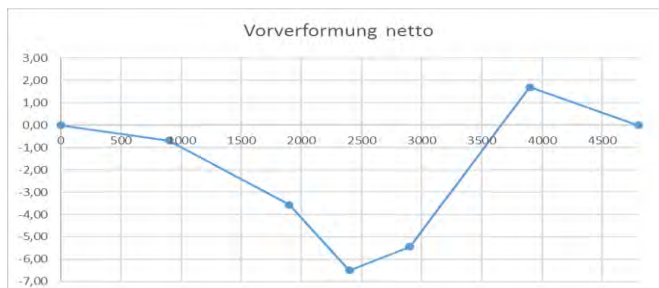
K100_S120_4800_S_VB02		Datum 21.09.2016
		Versuch-Nr. 21

Versuchsart Sogversuch M-Beiwert 0,7
 Spannweite 4800mm

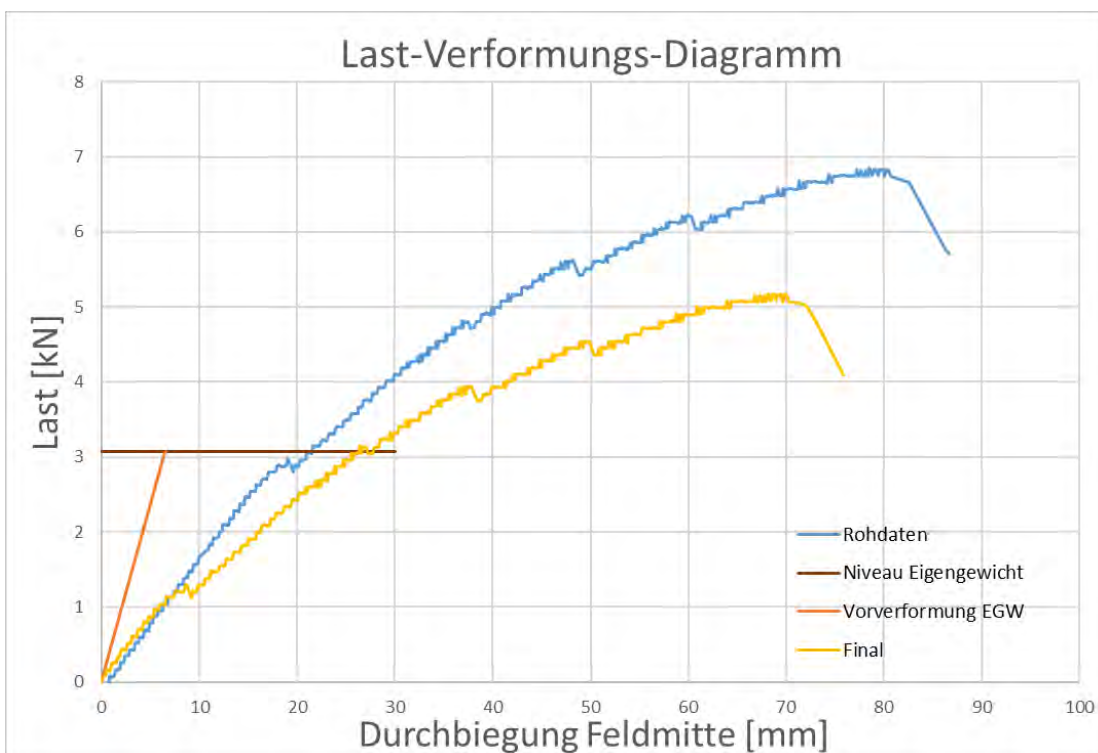
Kassettenprofil 100/600 t=0,75
 Längsschraubung 500 mm
 Mineralwolle 040

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung quer
 Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] -1,670
 Vorverformung [mm] 6,5



Fmax [kN] 6,854 **Fgesamt [kN] 5,184**
 U bei Fmax [mm] 78,51 zugeh. Mmax [kNm] 3,6288



Anmerkungen

Versagensart Plattenbeulen am Unterflansch und Stegbeulen

Ort des Versagens unterhalb Längsfuge

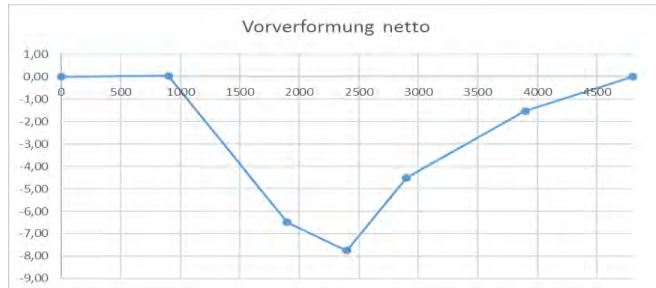
K100_S120_4800_S_VB03	Datum 22.09.2016 Versuch-Nr. 22
------------------------------	------------------------------------

Versuchsart	Sogversuch	M-Beiwert	0,7
Spannweite	4800mm		

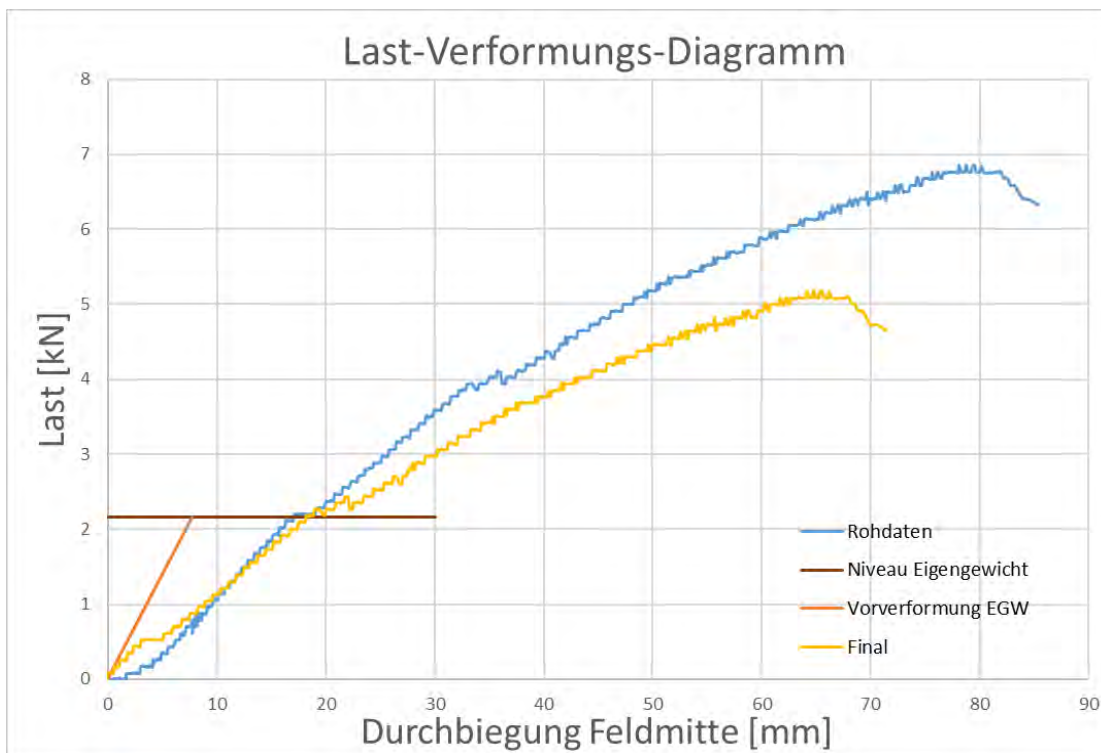
Kassettenprofil	100/600 t=0,75
Längsschraubung	500 mm
Mineralwolle	040

Sandwichelement	PUR d=120mm
Verlegerichtung	quer
Befestigung	Verdeckt

Eigengewicht [kN]	-1,670
Vorverformung [mm]	7,75



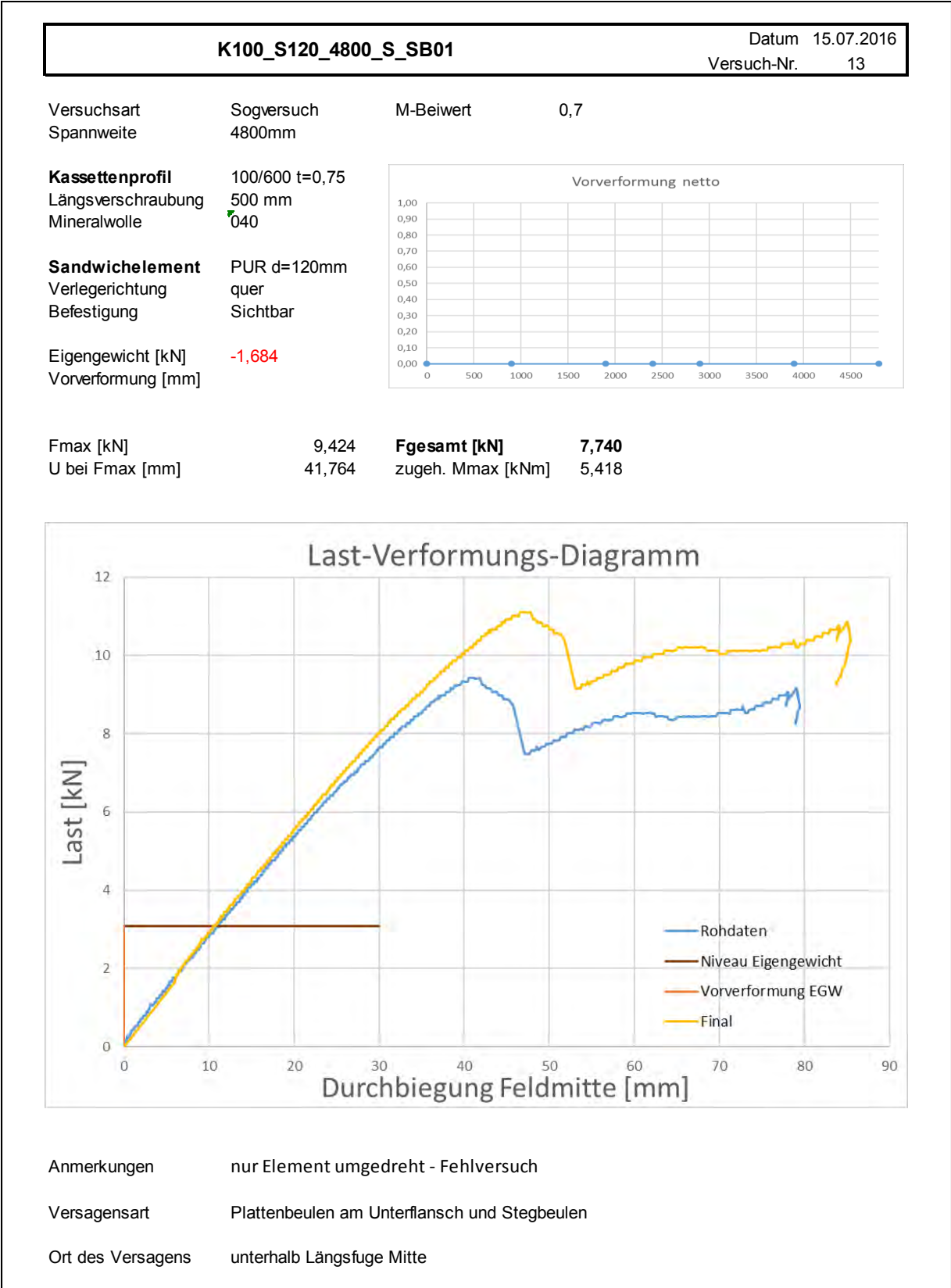
Fmax [kN]	6,854	Fgesamt [kN]	5,184
U bei Fmax [mm]	78,726	zugeh. Mmax [kNm]	3,6288

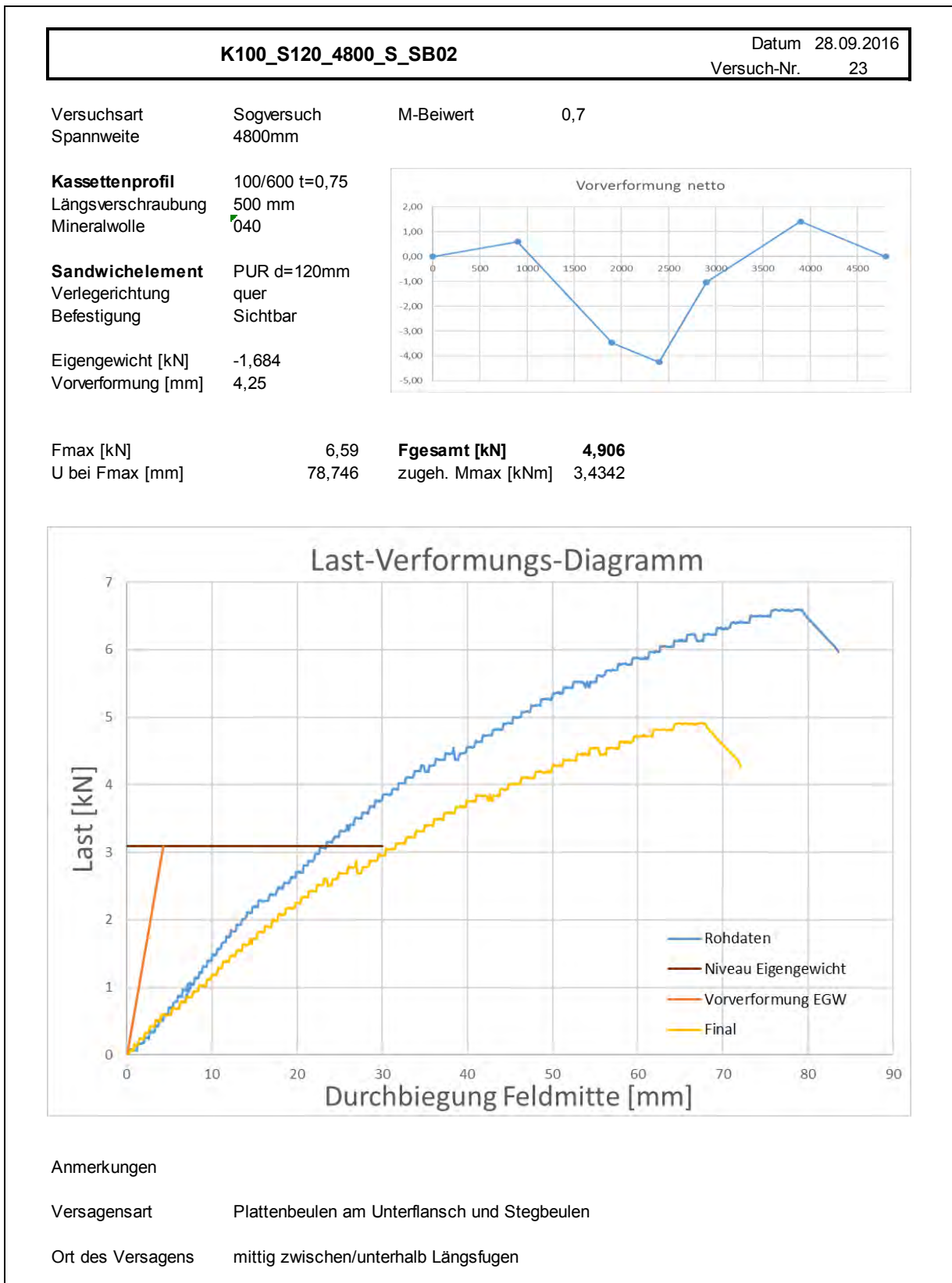


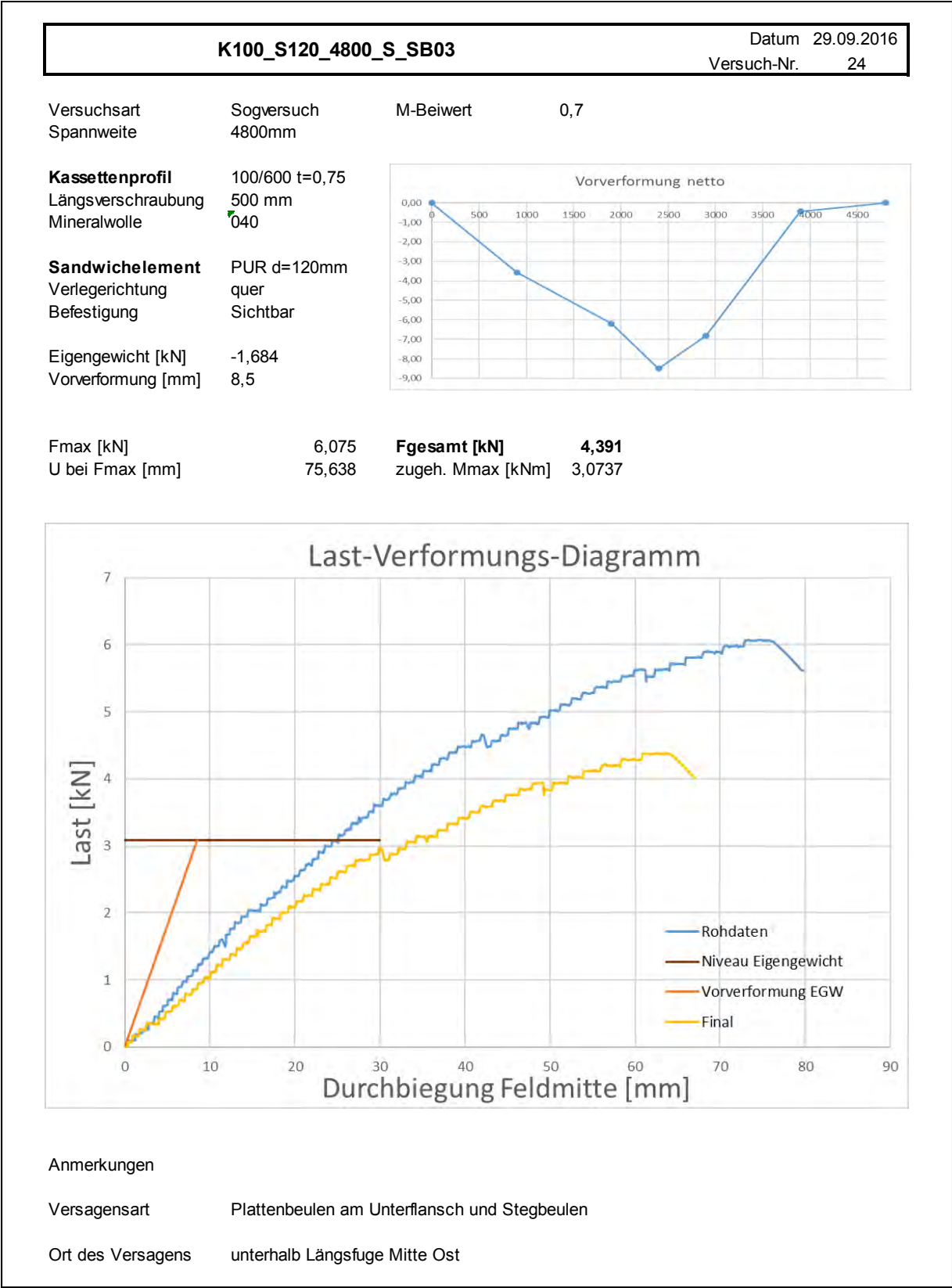
Anmerkungen

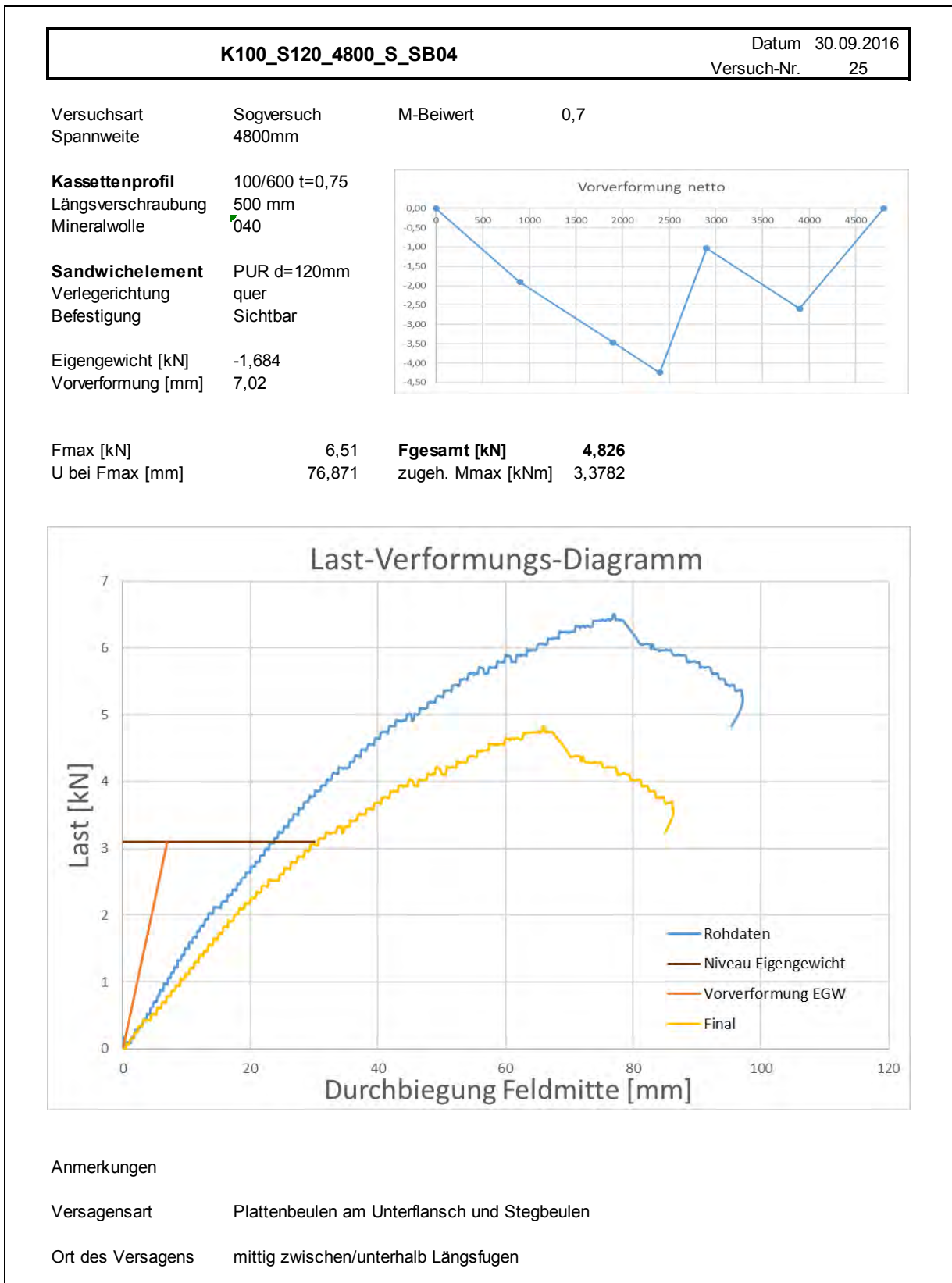
Versagensart Plattenbeulen am Unterflansch und Stegbeulen

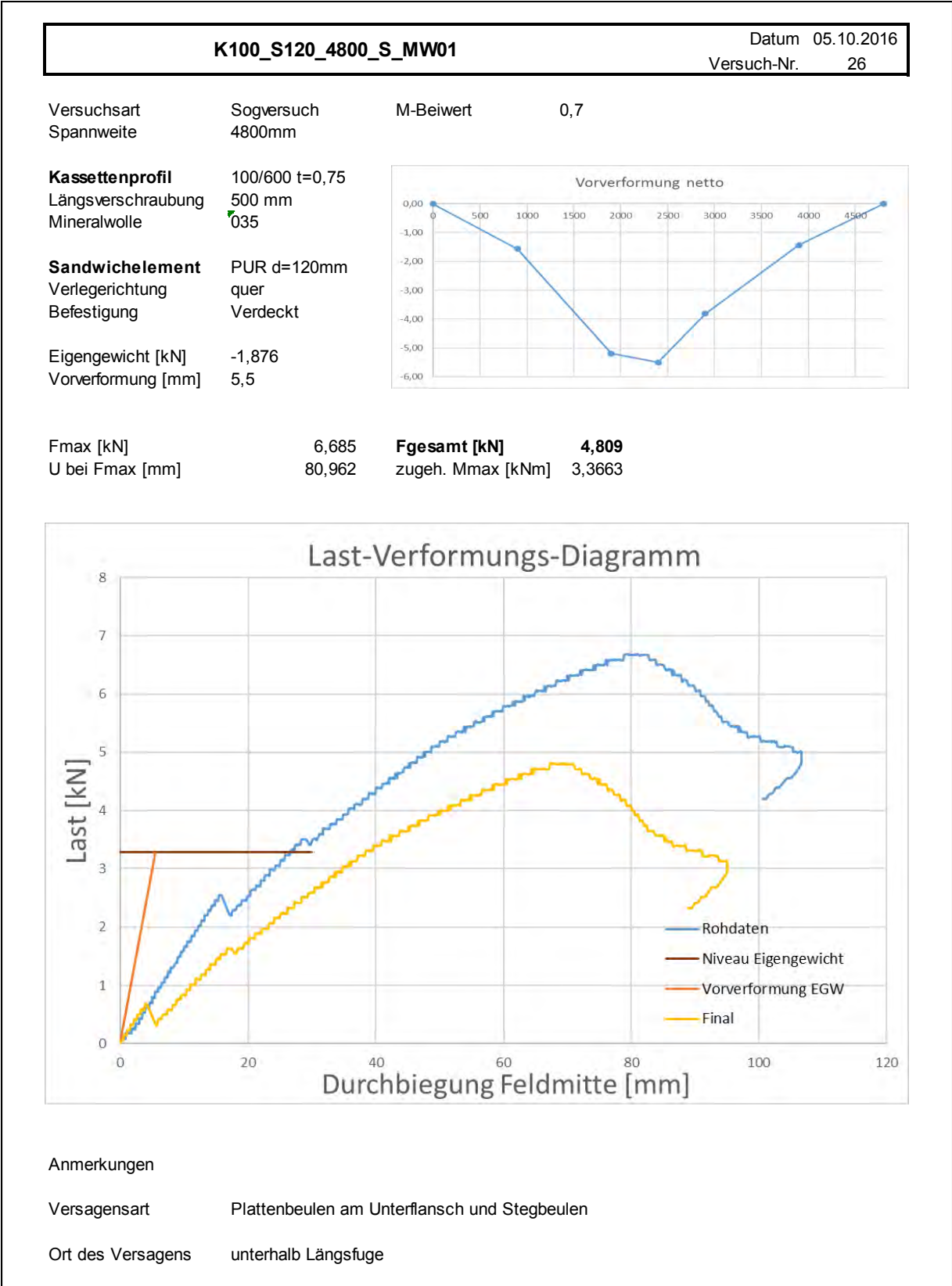
Ort des Versagens unterhalb Längsfuge leicht versetzt











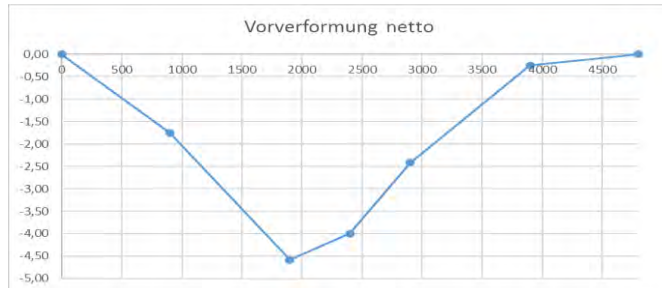
K100_S120_4800_S_MW02	Datum 05.10.2016 Versuch-Nr. 27
------------------------------	------------------------------------

Versuchsart	Sogversuch	M-Beiwert	0,7
Spannweite	4800mm		

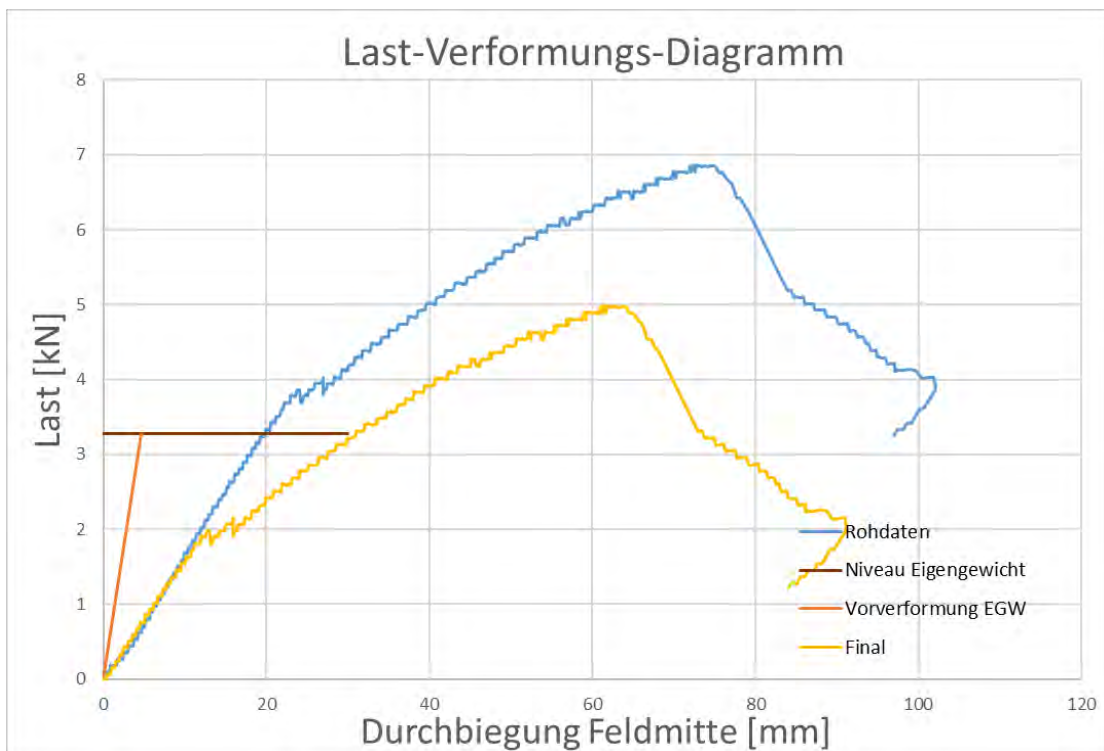
Kassettenprofil	100/600 t=0,75
Längsschraubung	500 mm
Mineralwolle	035

Sandwichelement	PUR d=120mm
Verlegerichtung	quer
Befestigung	Verdeckt

Eigengewicht [kN]	-1,876
Vorverformung [mm]	4,58



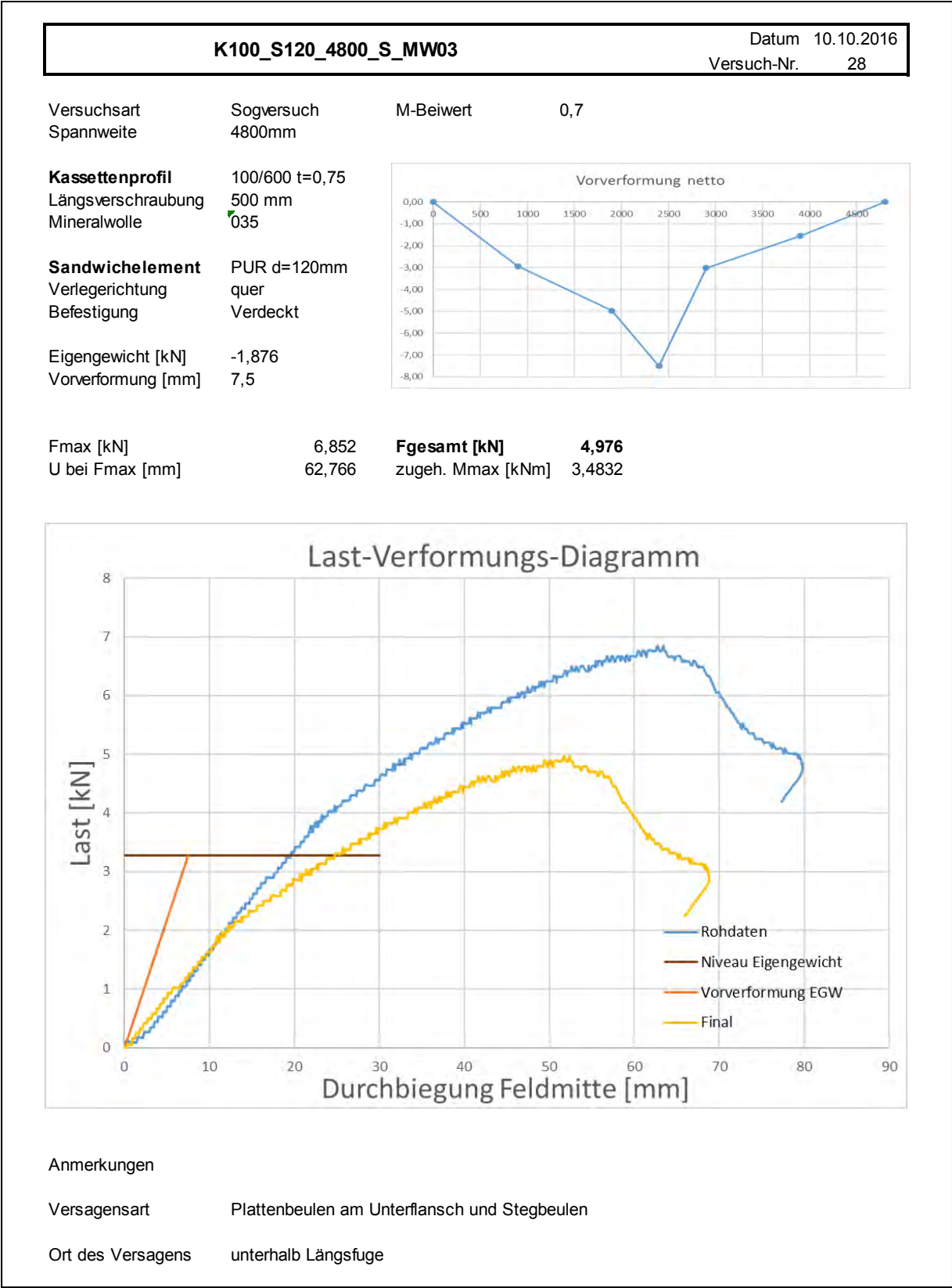
Fmax [kN]	6,867	Fgesamt [kN]	4,991
U bei Fmax [mm]	72,435	zugeh. Mmax [kNm]	3,4937

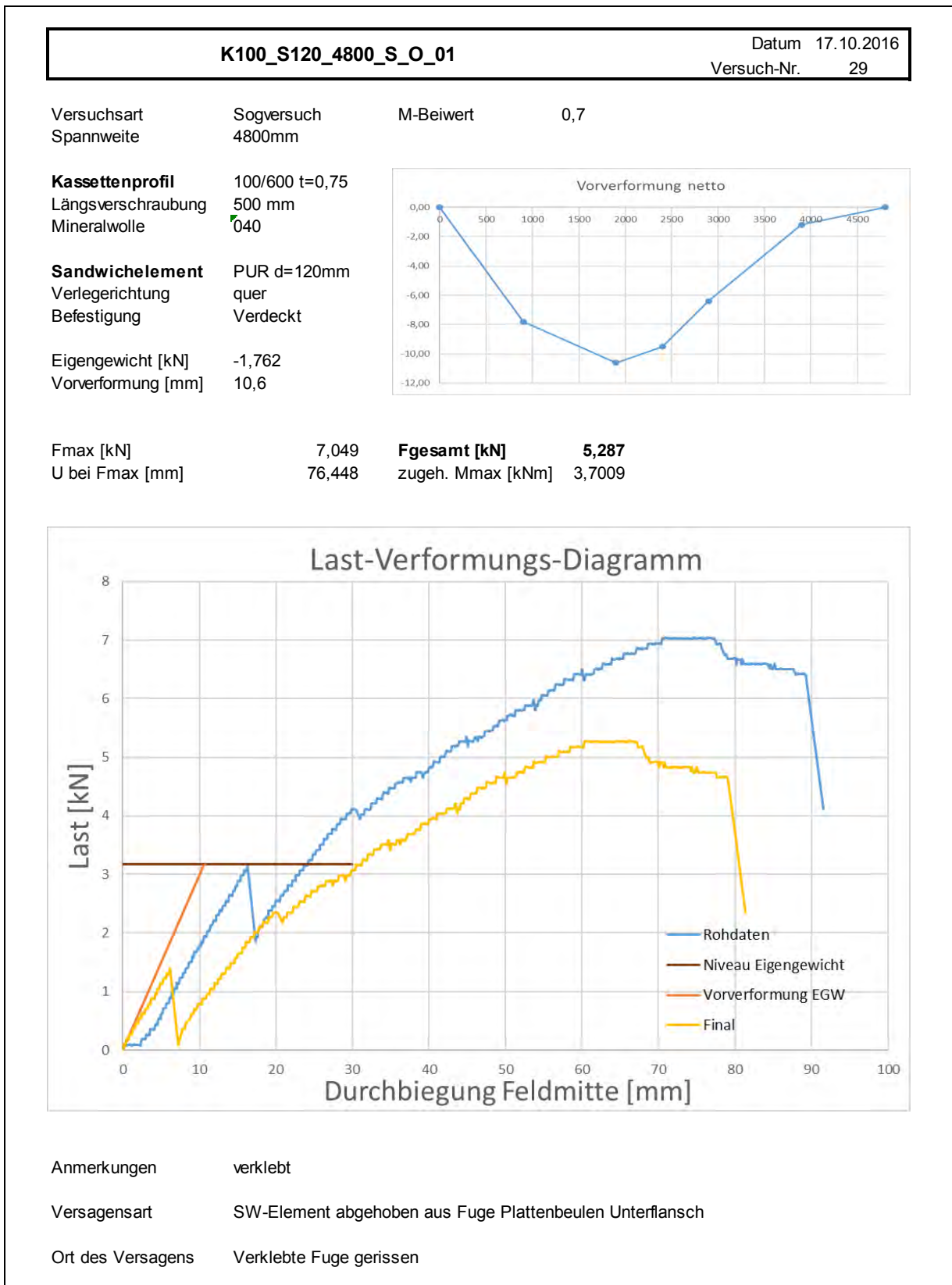


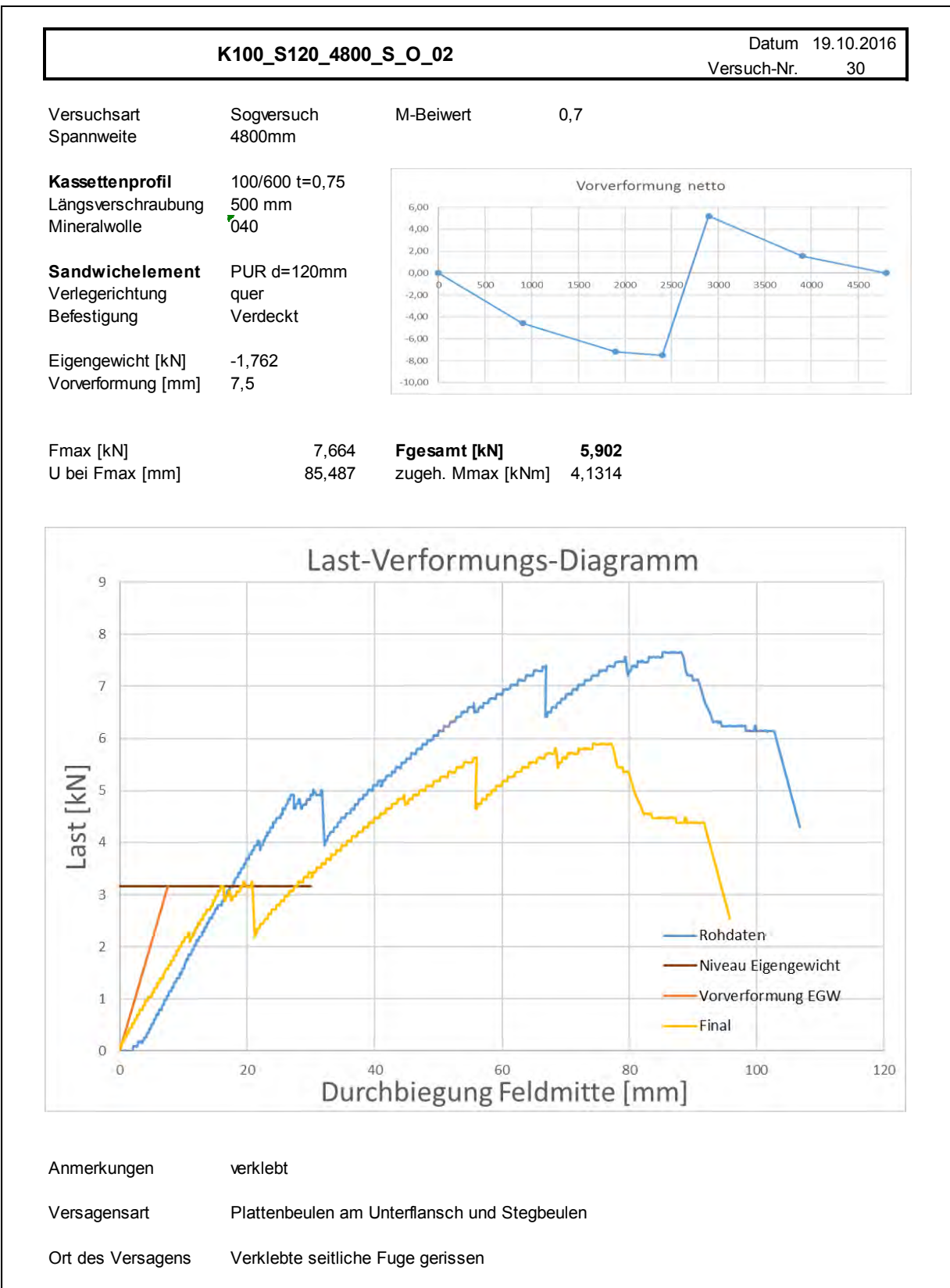
Anmerkungen

Versagensart Plattenbeulen am Unterflansch und Stegbeulen

Ort des Versagens unterhalb Längsfuge







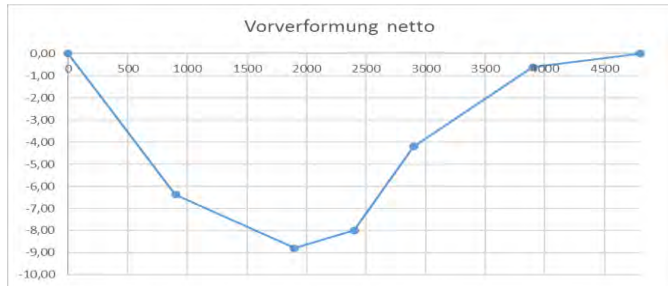
K100_S120_4800_S_O_03	Datum 19.10.2016
	Versuch-Nr. 31

Versuchsart	Sogversuch	M-Beiwert	0,7
Spannweite	4800mm		

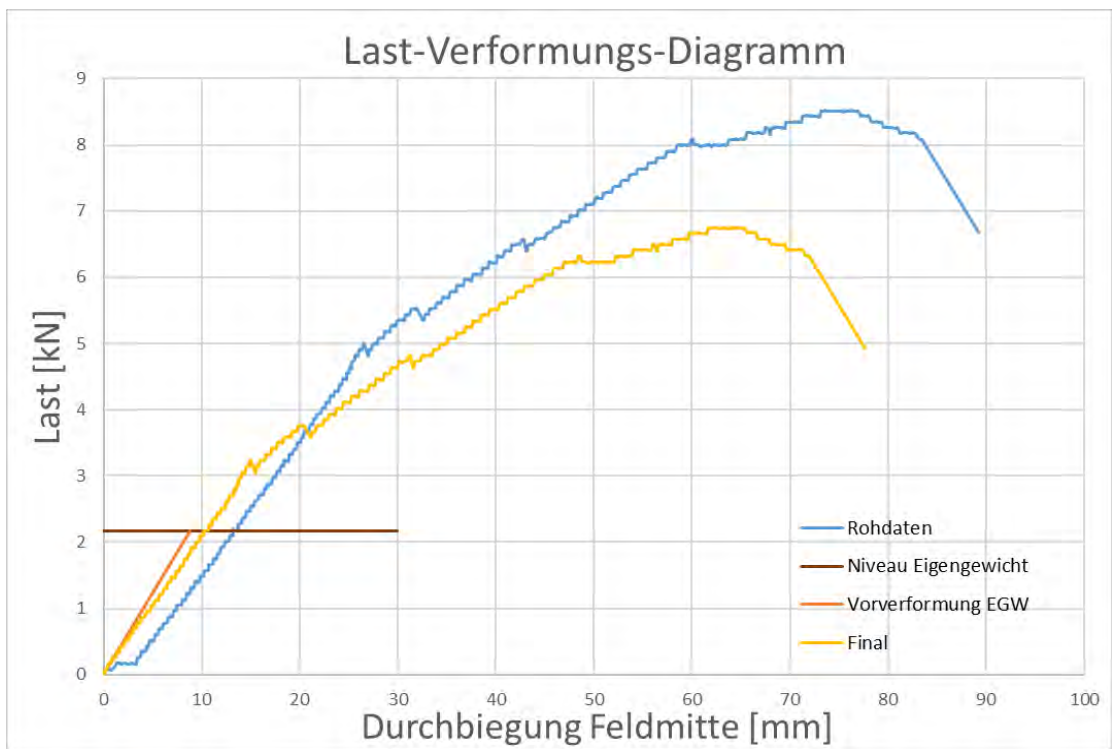
Kassettenprofil	100/600 t=0,75
Längsverschraubung	500 mm
Mineralwolle	040

Sandwichelement	PUR d=120mm
Verlegerichtung	quer
Befestigung	Verdeckt

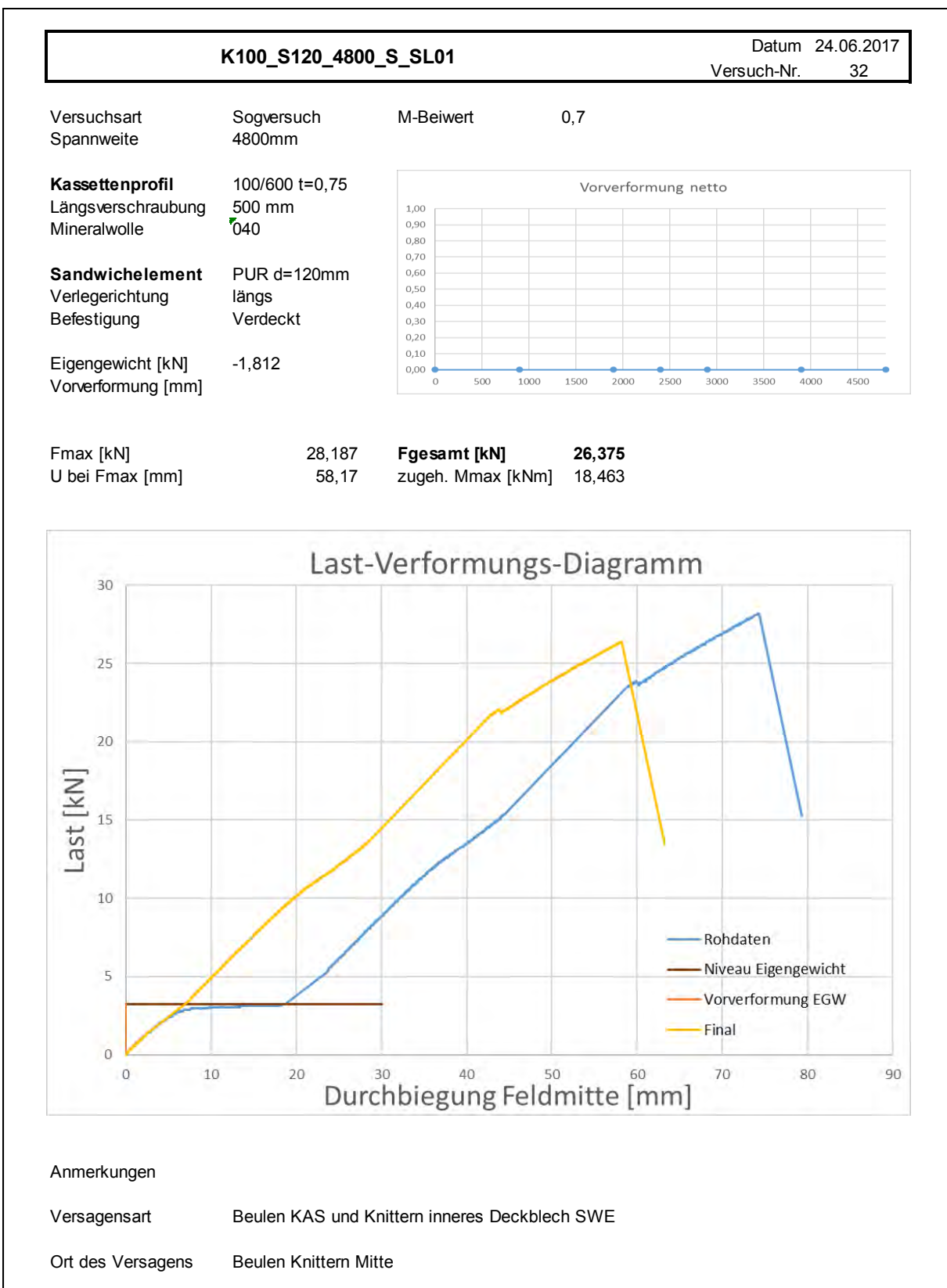
Eigengewicht [kN]	-1,762
Vorverformung [mm]	8,79

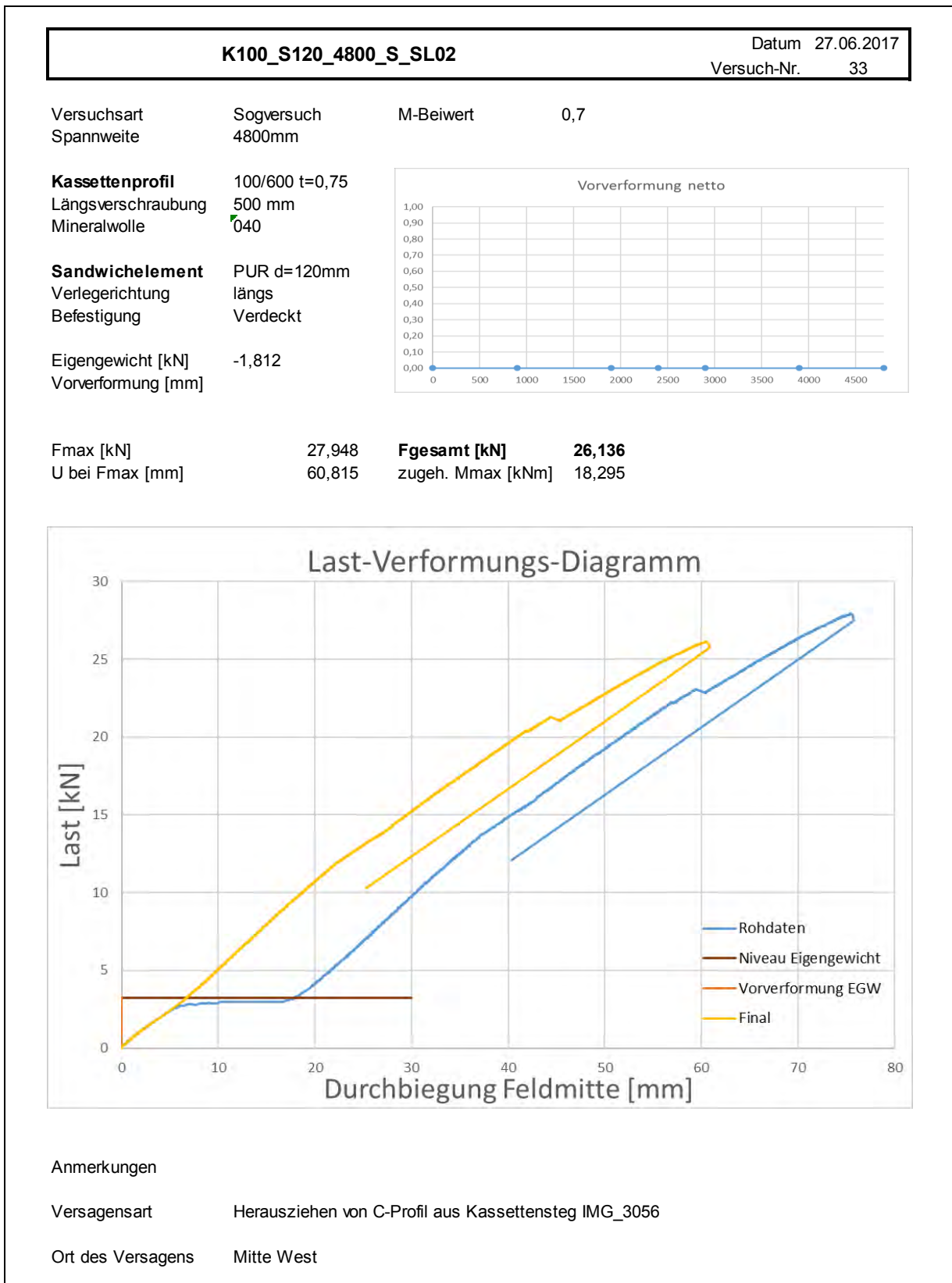


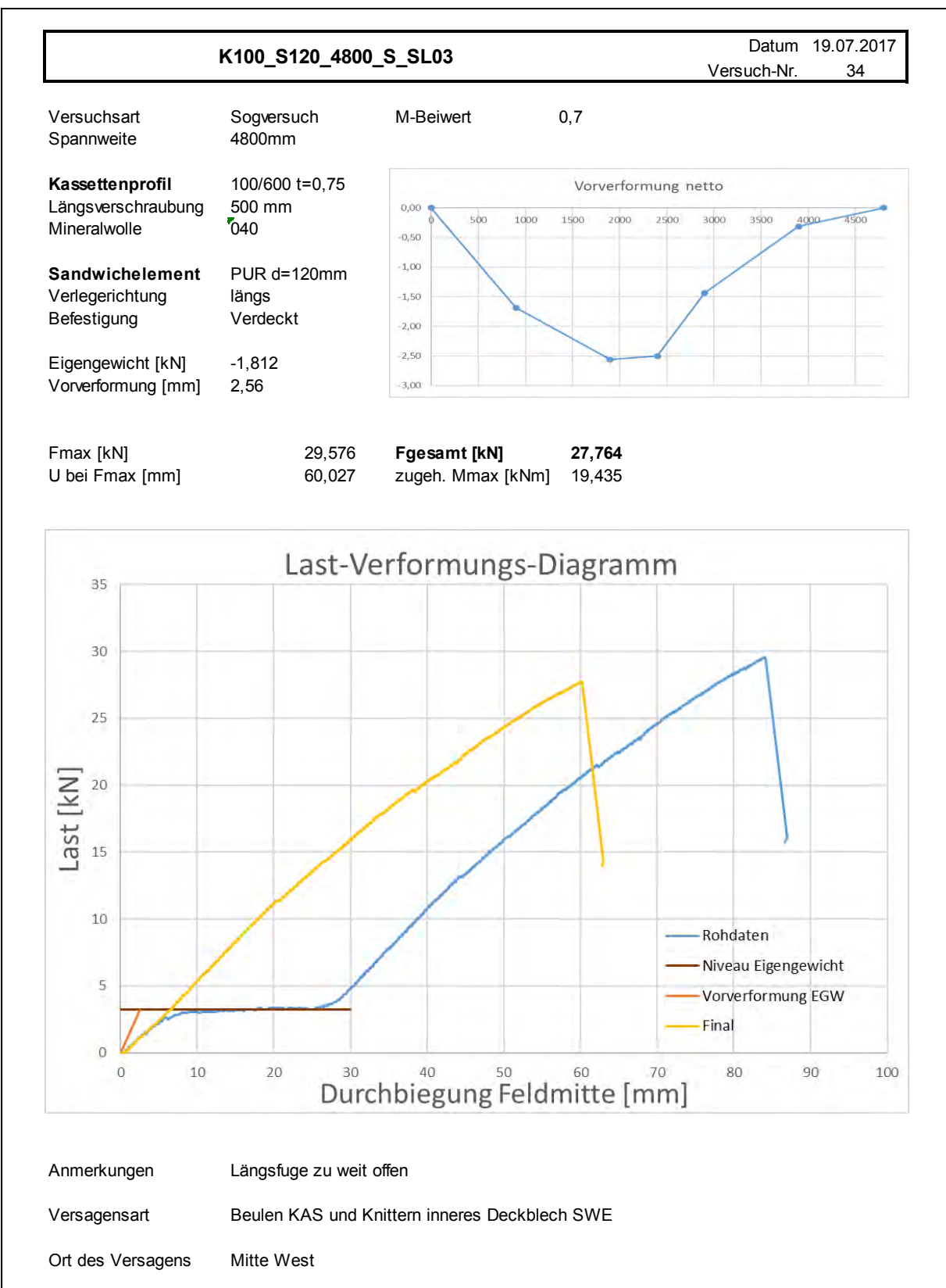
Fmax [kN]	21,11	Fgesamt [kN]	19,348
U bei Fmax [mm]		zugeh. Mmax [kNm]	13,659

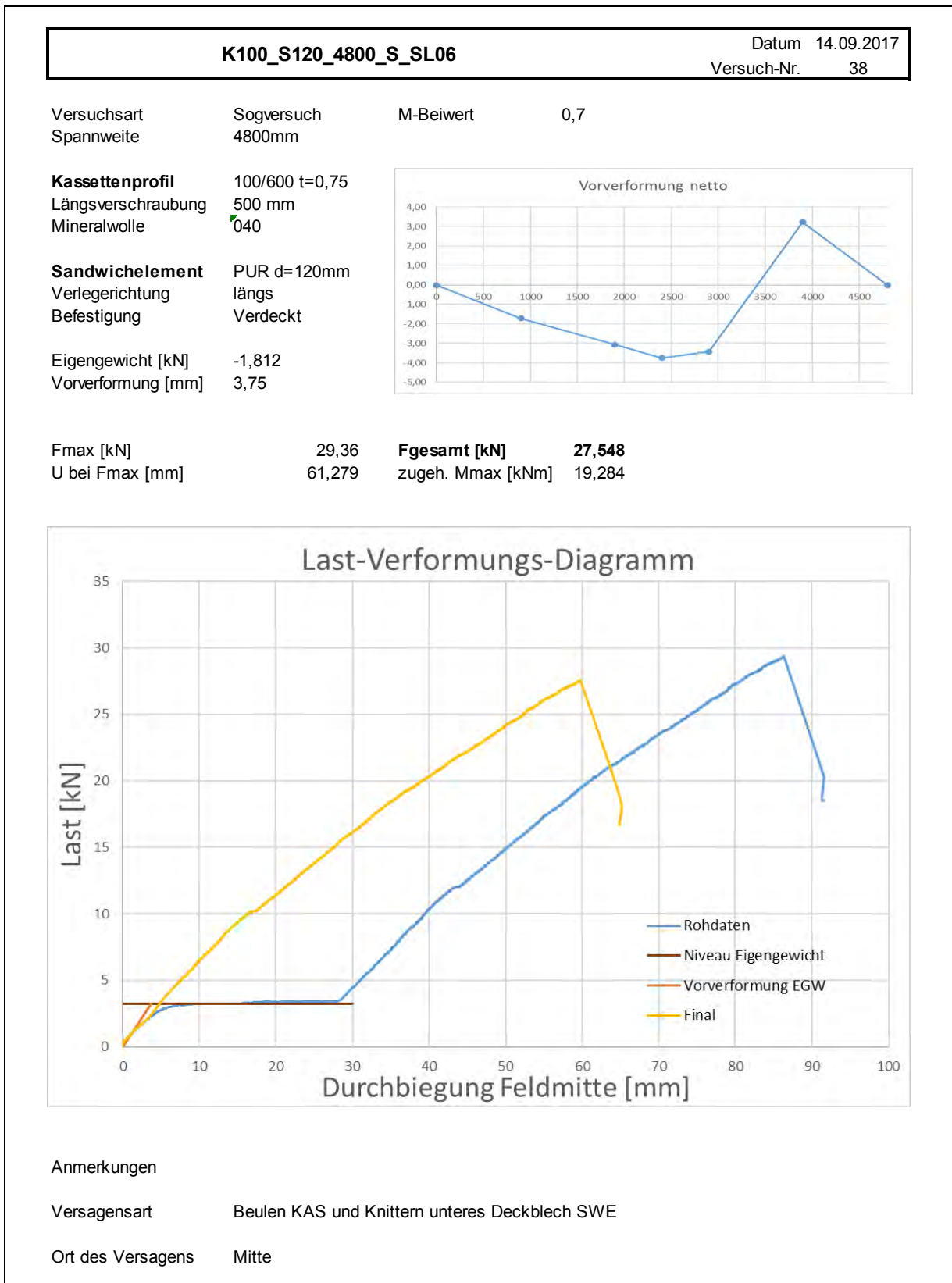


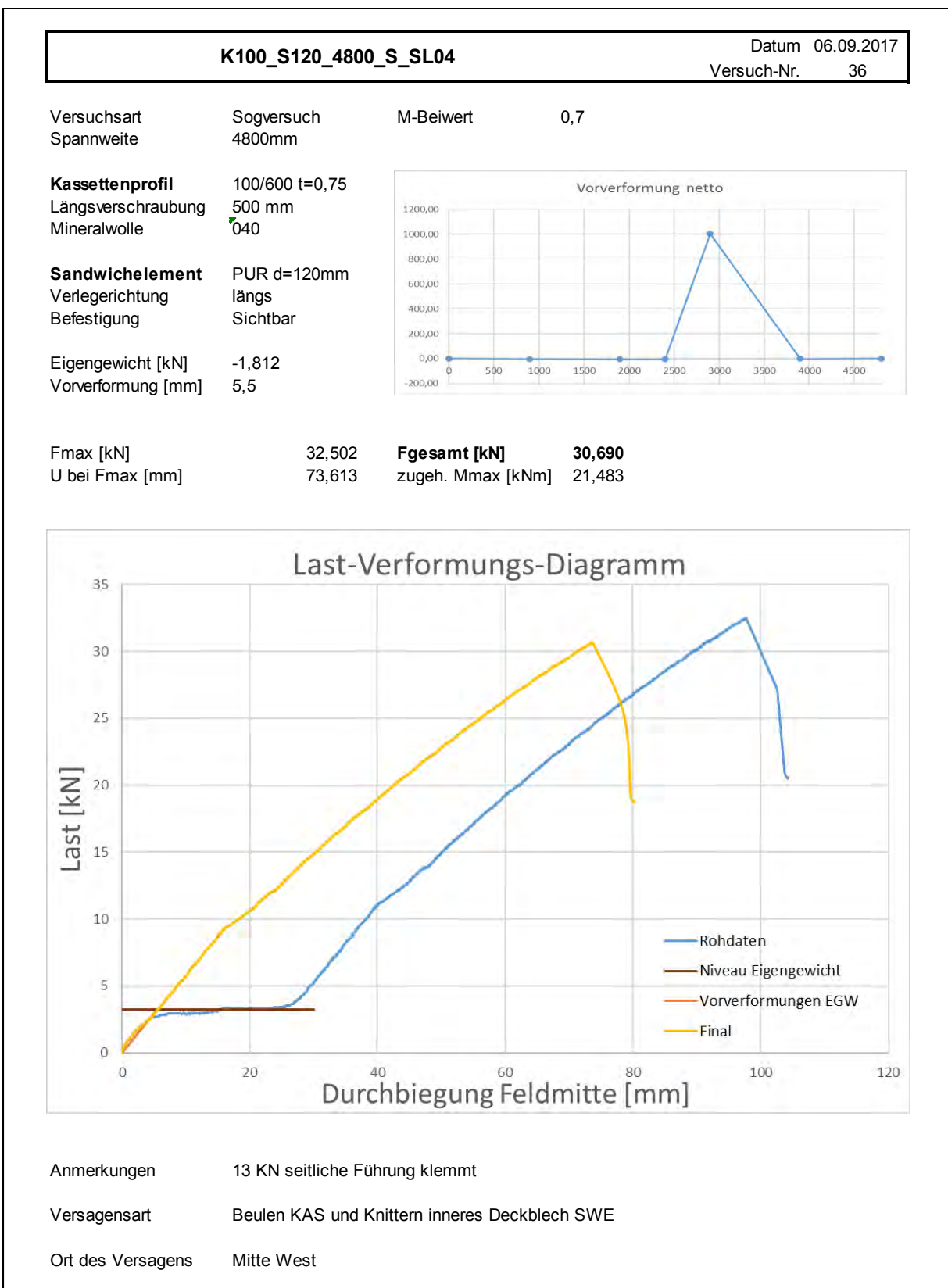
Anmerkungen	Streifen verschraubt
Versagensart	Plattenbeulen am Unterflansch und Stegbeulen
Ort des Versagens	Beulen im breiten Gurt

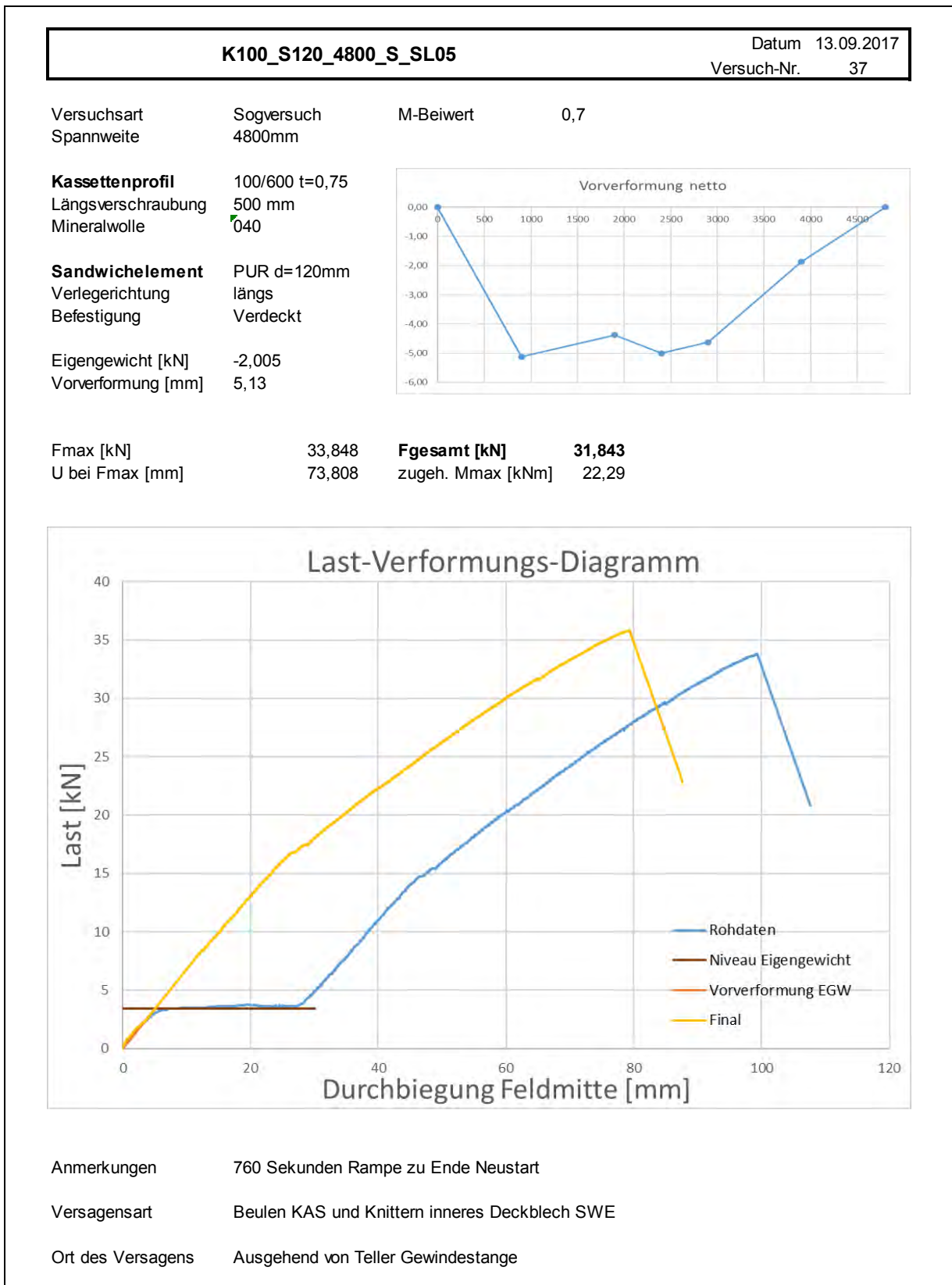










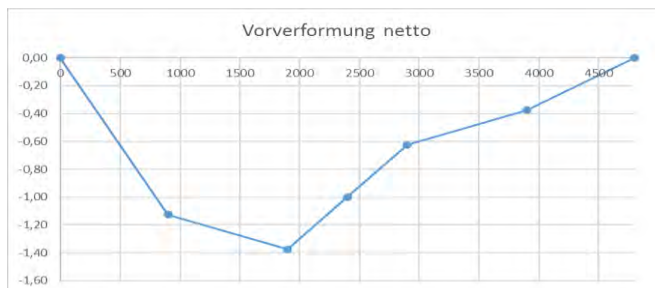


S120_4800_S_80_01	Datum 25.07.2017
	Versuch-Nr. 35

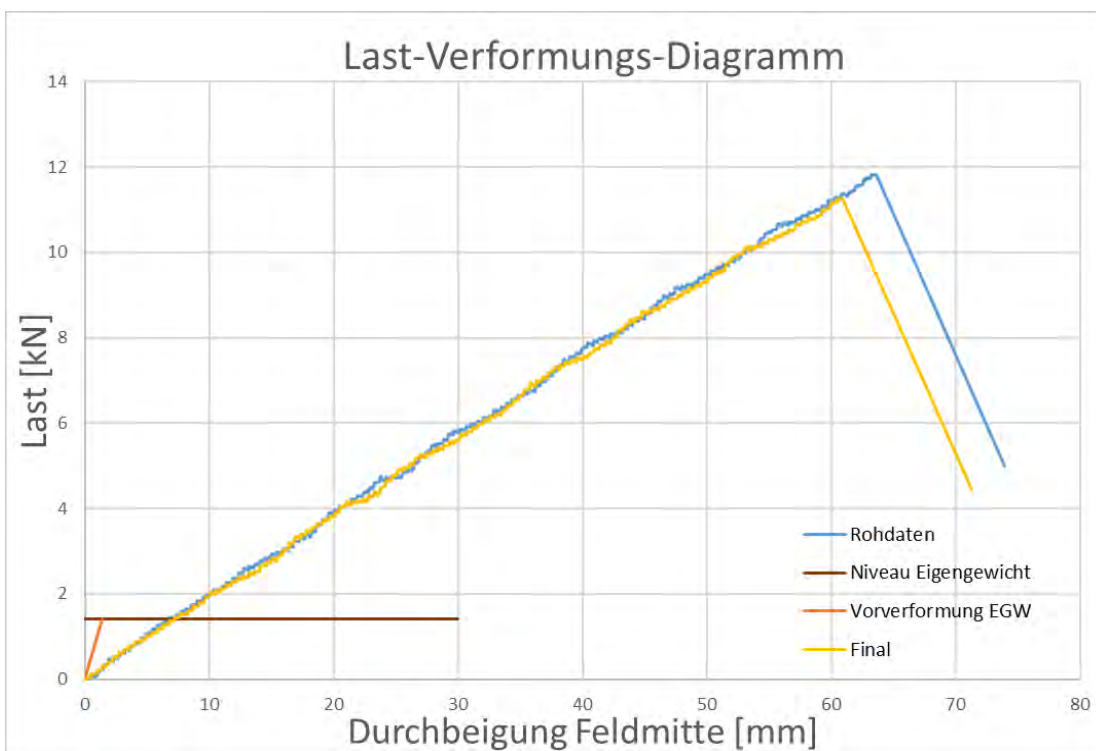
Versuchsart Sogversuch M-Beiwert 0,7
 Spannweite 4800mm

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung längs
 Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] -0,563
 Vorverformung [mm] 1,38



Fmax [kN] 11,834 **Fgesamt [kN] 11,271**
 U bei Fmax [mm] zugeh. Mmax [kNm] 7,8897



Anmerkungen

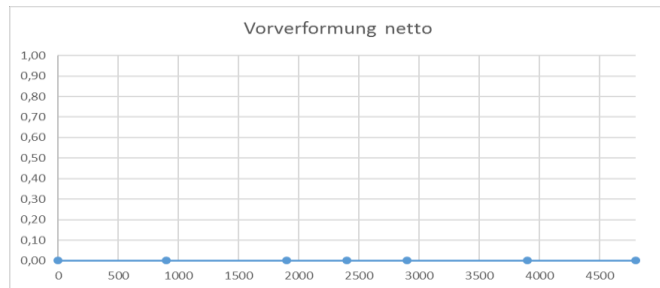
Versagensart Knittem
 Ort des Versagens zwischen Tellern Mitte

S120_4800_S_80_02	Datum 20.09.2017
	Versuch-Nr. 39

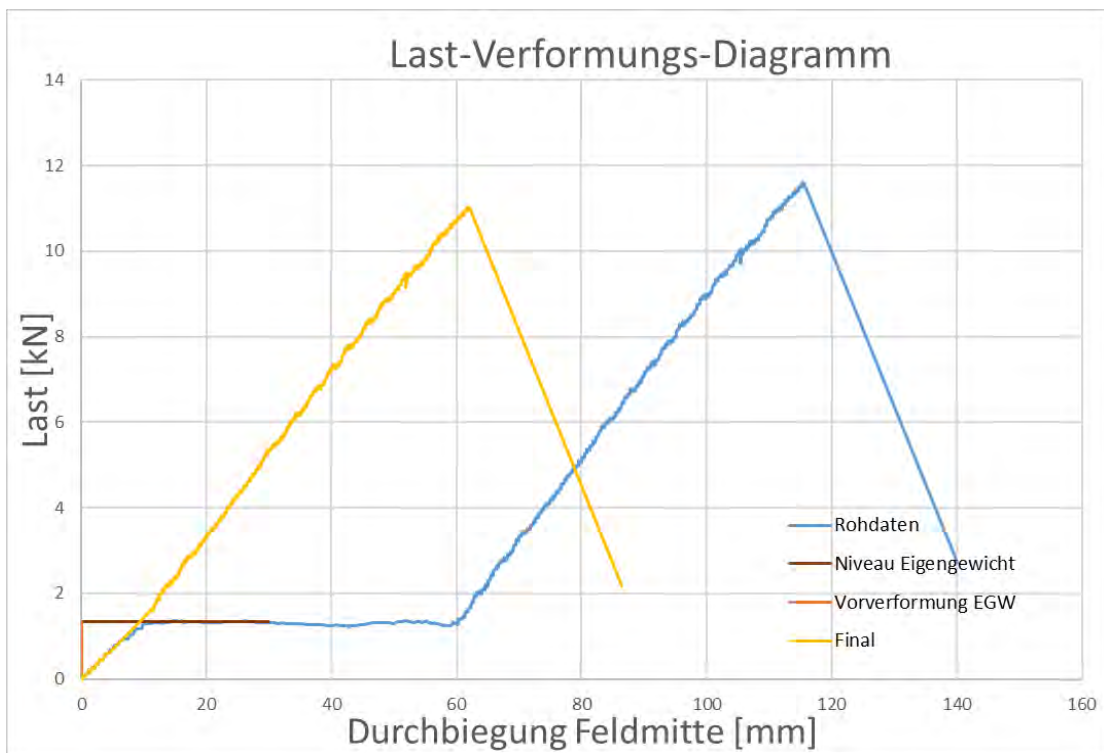
Versuchsart	Sogversuch	M-Beiwert	0,7
Spannweite	4800mm		

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung längs
 Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] -0,563
 Vorverformung [mm]



Fmax [kN]	11,6	Fgesamt [kN]	11,037
U bei Fmax [mm]		zugeh. Mmax [kNm]	7,7259



Anmerkungen

Versagensart Knittern

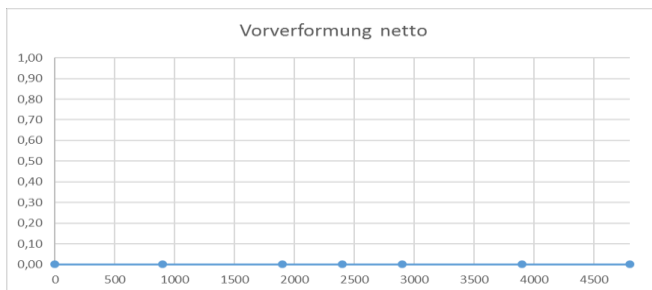
Ort des Versagens Teller Mitte

S120_4800_S_80_03	Datum 25.09.2017
	Versuch-Nr. 40

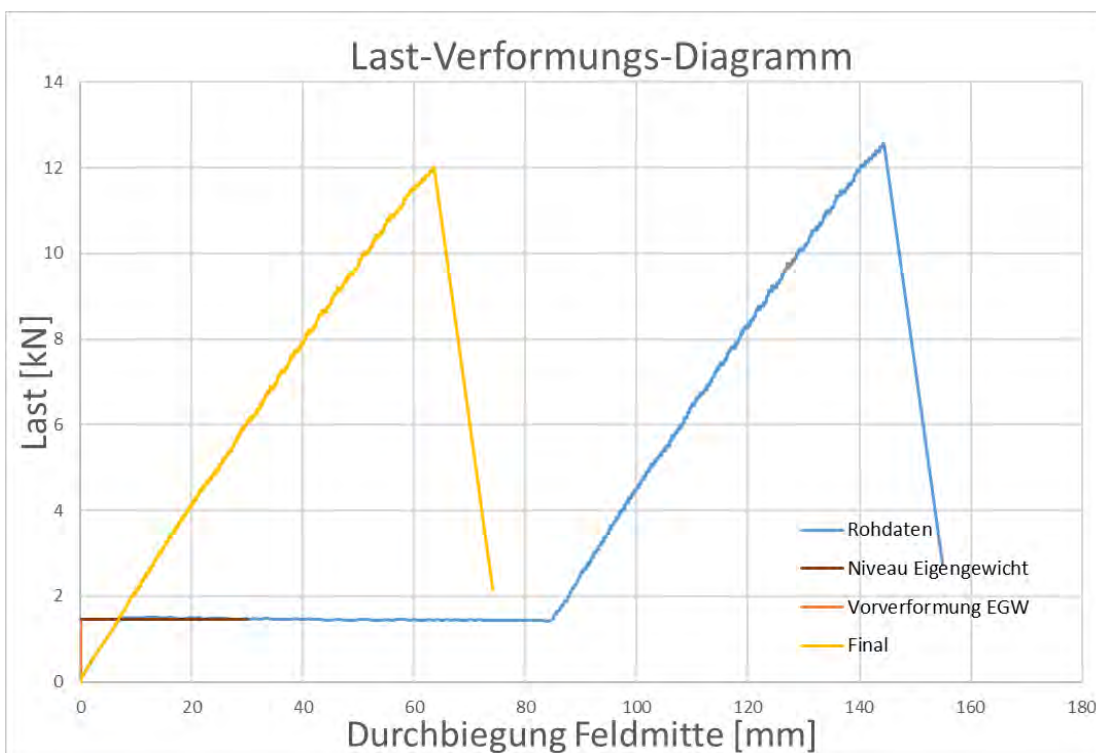
Versuchsart Sogversuch M-Beiwert 0,7
 Spannweite 4800mm

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung längs
 Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] -0,563
 Vorverformung [mm]



Fmax [kN] 12,574 **Fgesamt [kN] 12,011**
 U bei Fmax [mm] zugeh. Mmax [kNm] 8,4077



Anmerkungen

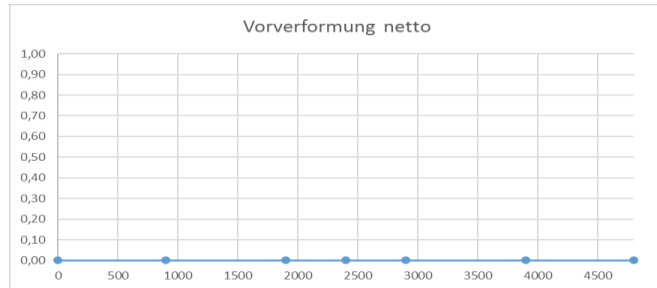
Versagensart Knittem

Ort des Versagens Teller Mitte

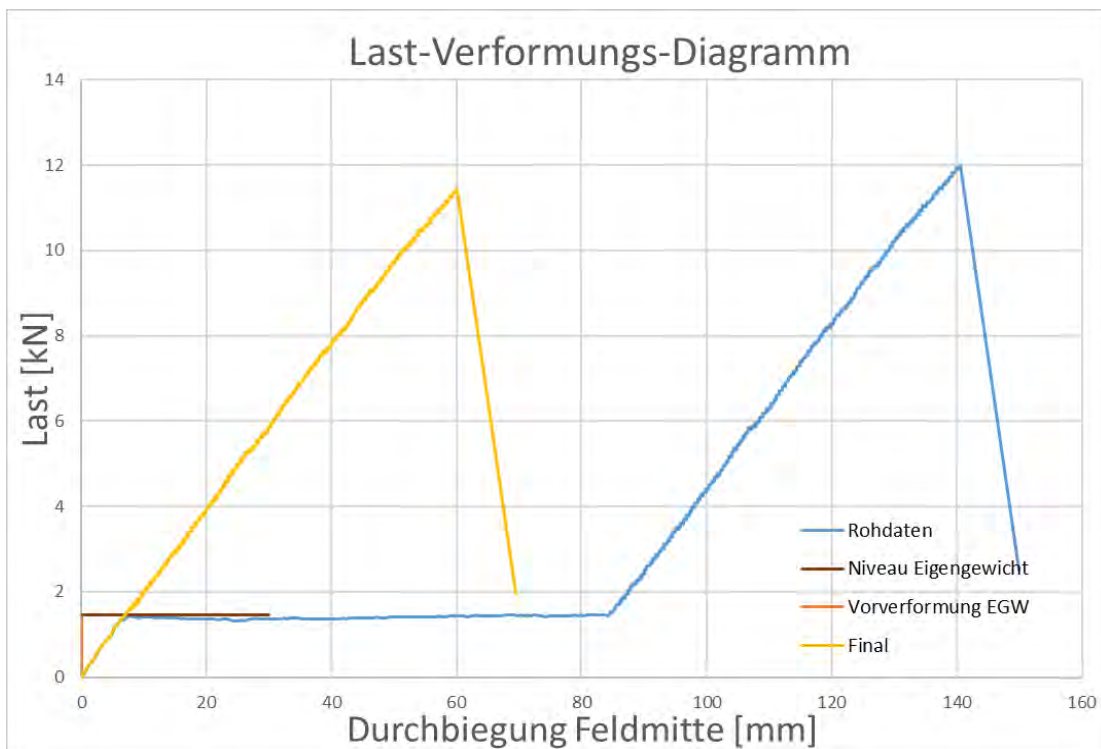
S120_4800_S_80_04	Datum 26.09.2017 Versuch-Nr. 41
--------------------------	------------------------------------

Versuchsart: Sogversuch
 Spannweite: 4800mm
 M-Beiwert: 0,7

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung: längs
 Befestigung: Verdeckt
 Eigengewicht [kN]: -0,563
 Vorverformung [mm]: 0



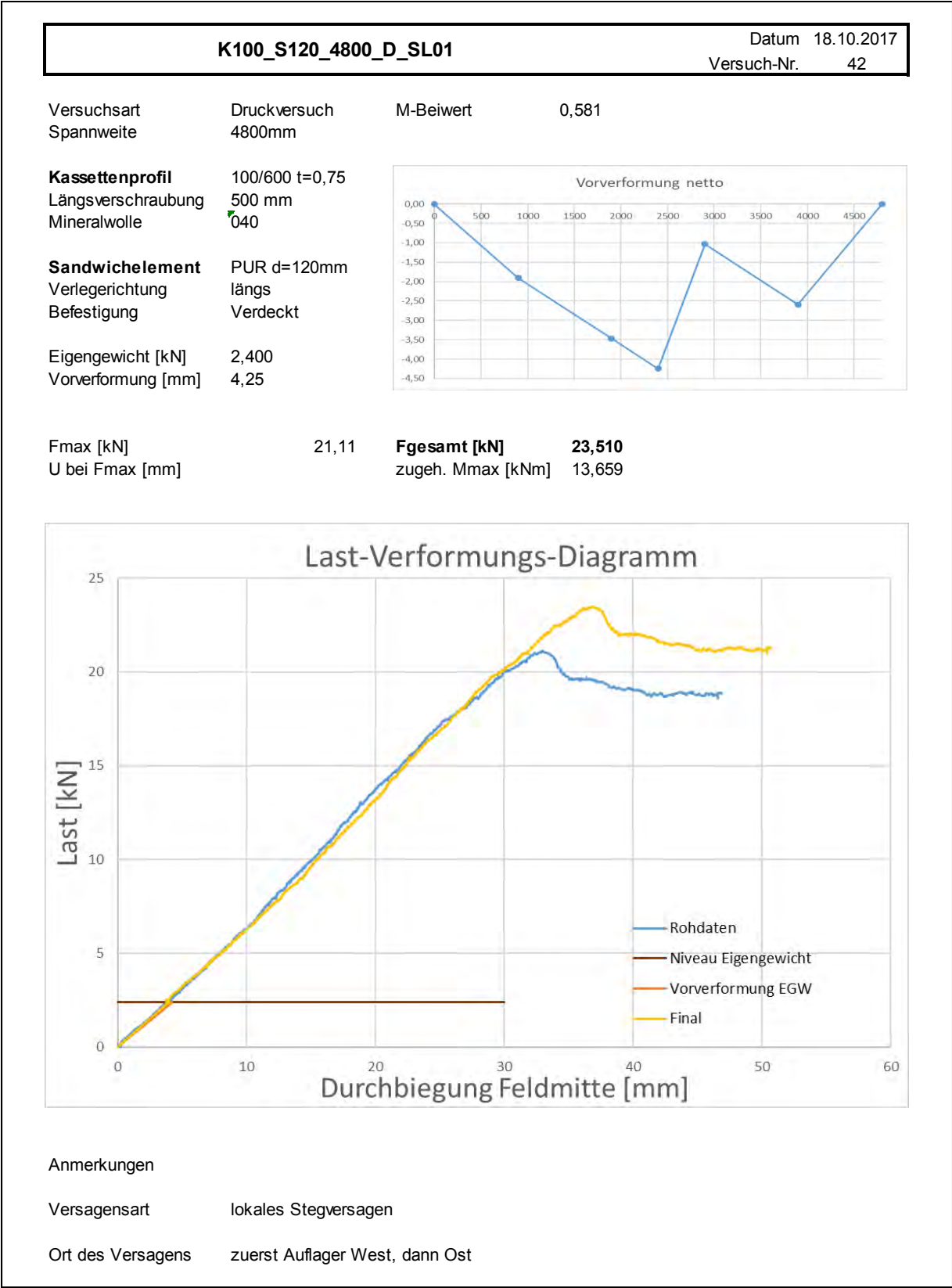
Fmax [kN]: 12,001
 U bei Fmax [mm]:
Fgesamt [kN]: 11,438
 zugeh. Mmax [kNm]: 8,0066

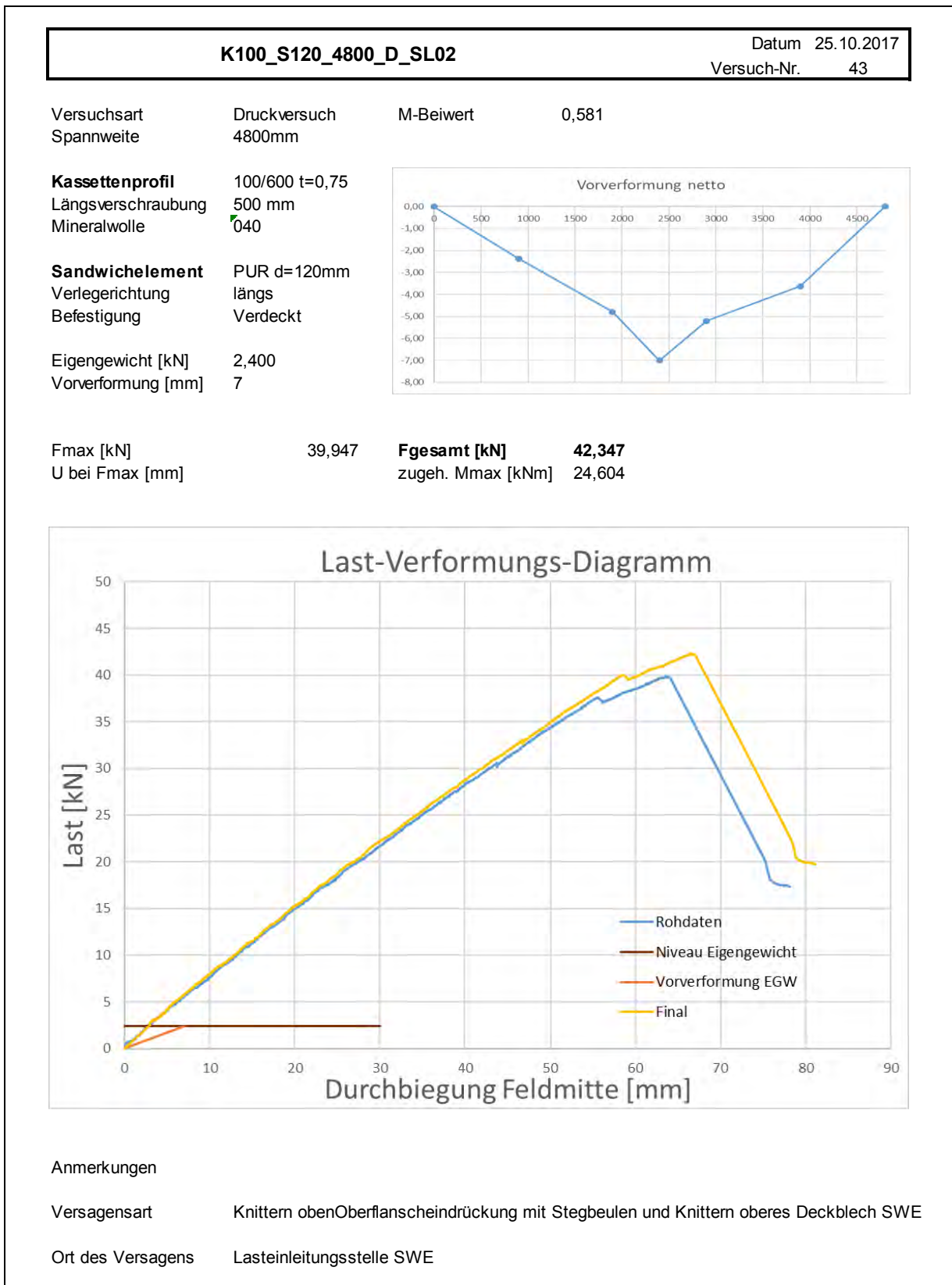


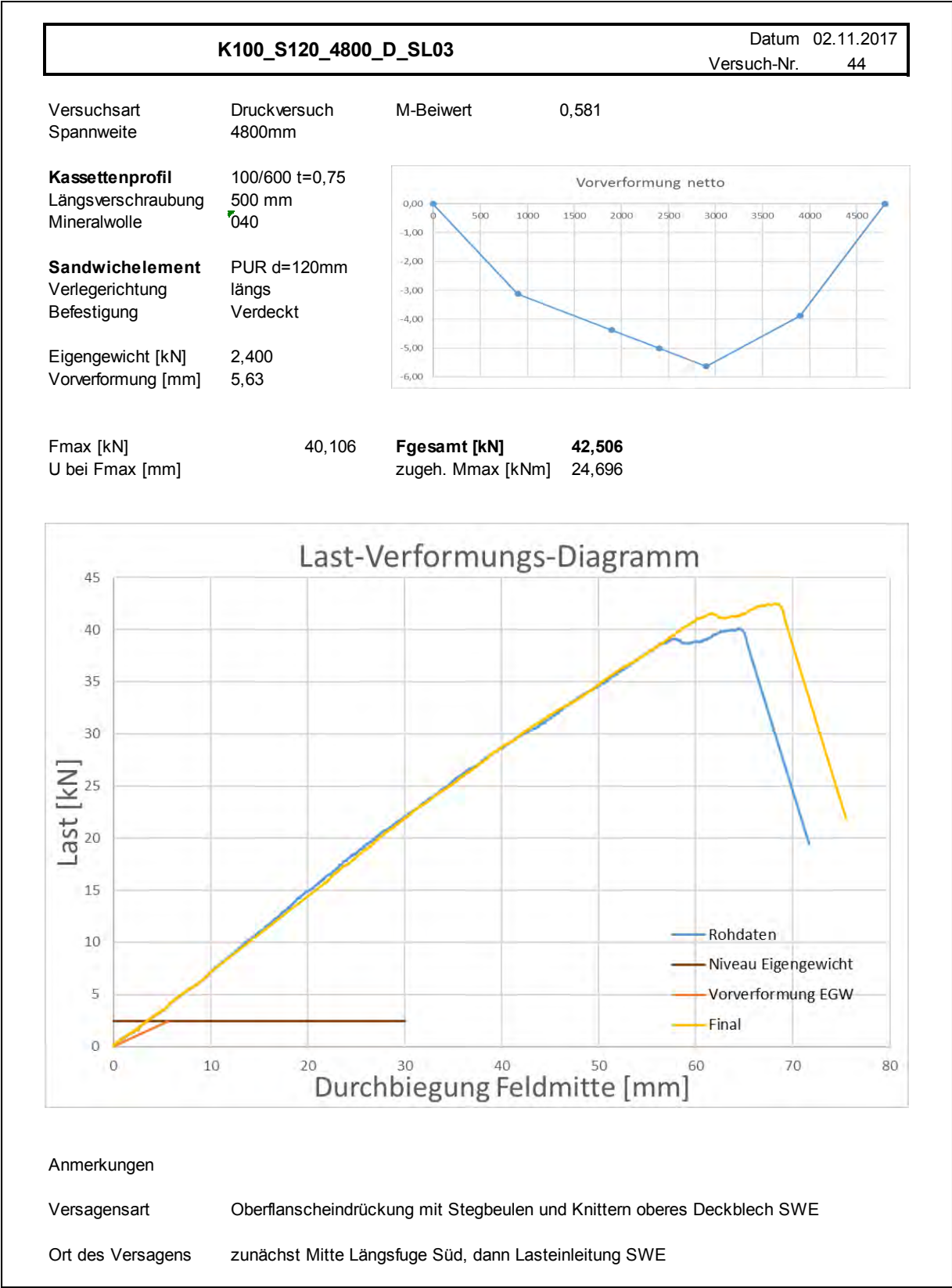
Anmerkungen

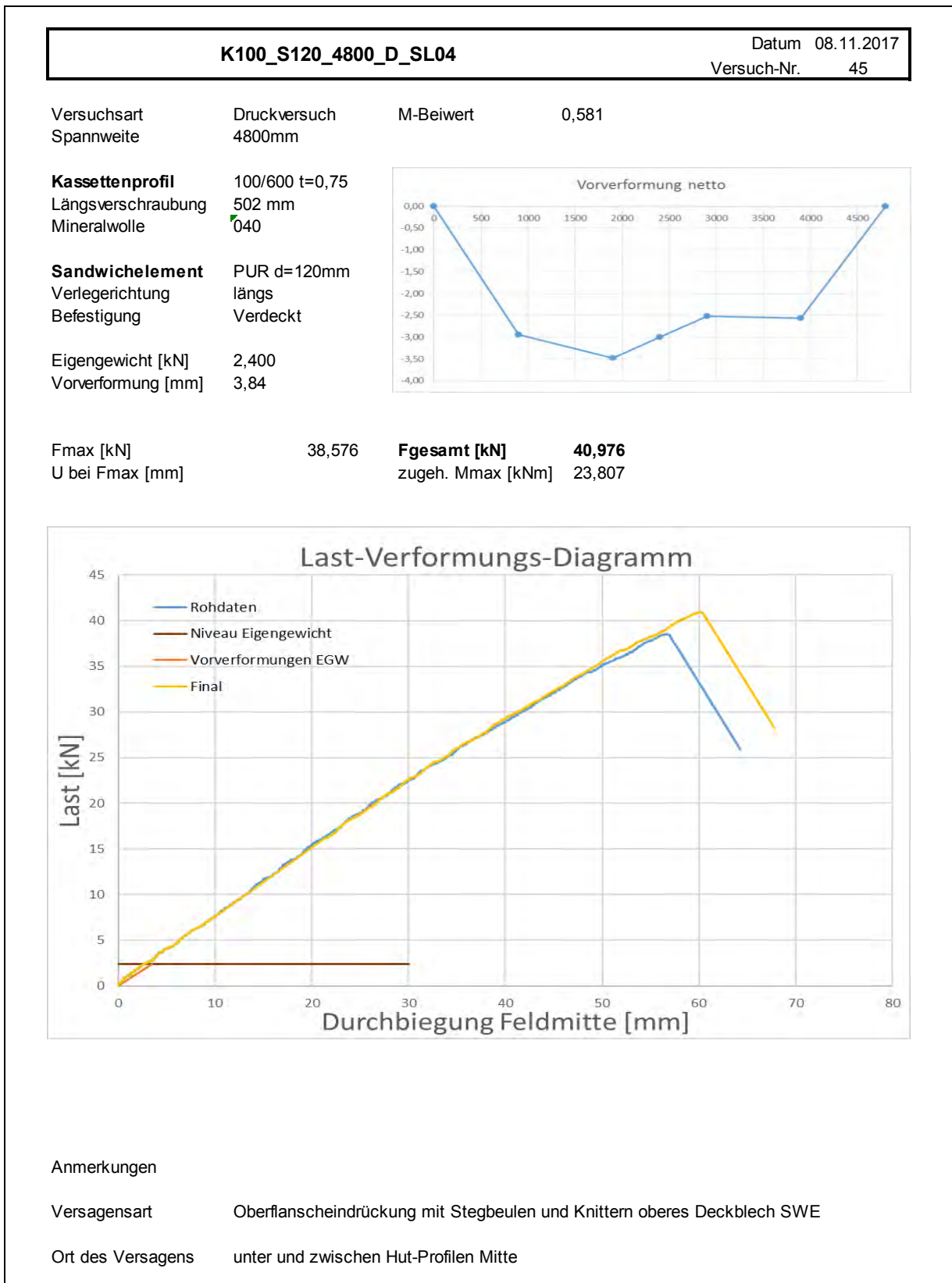
Versagensart: Knittern

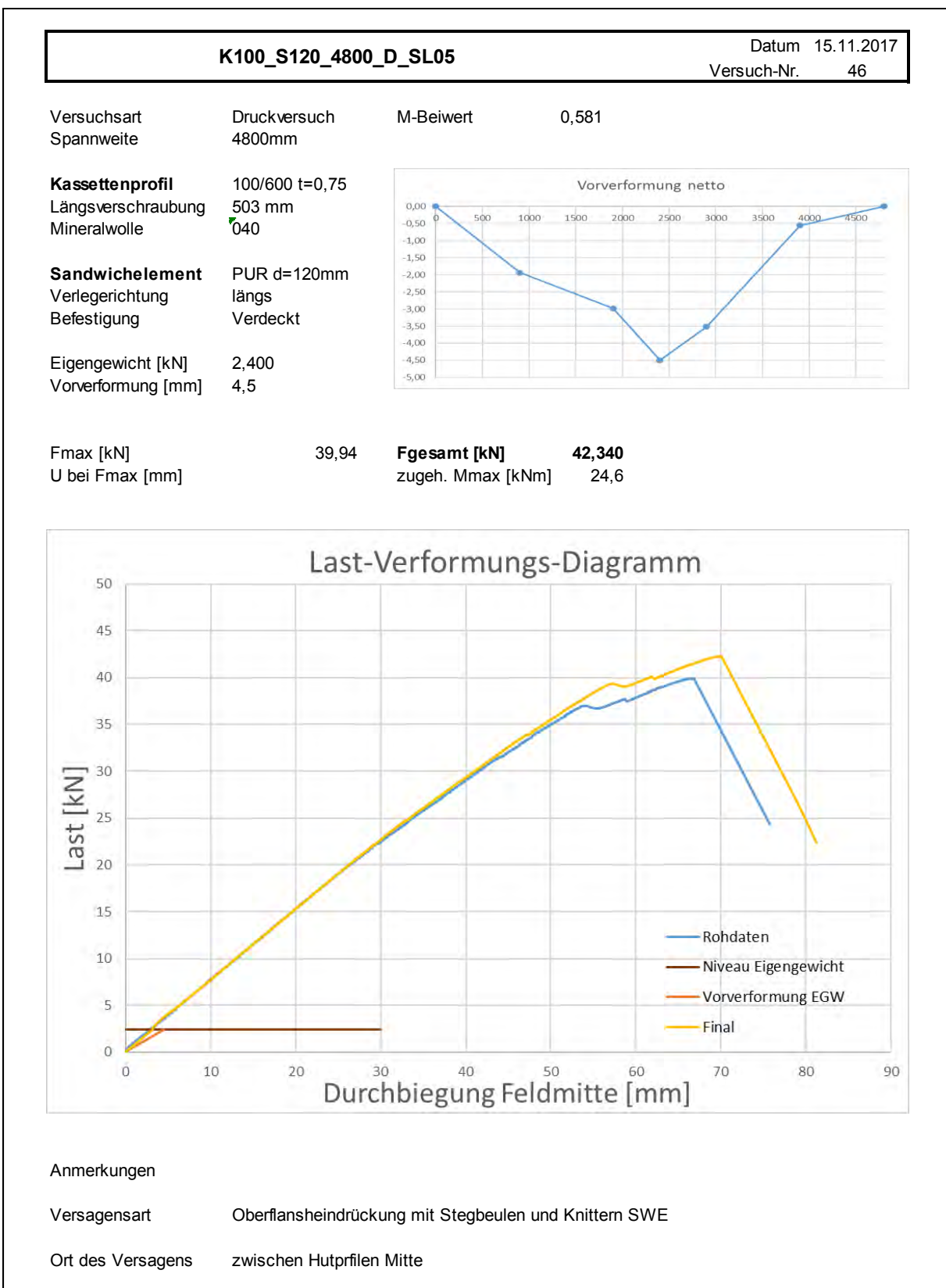
Ort des Versagens









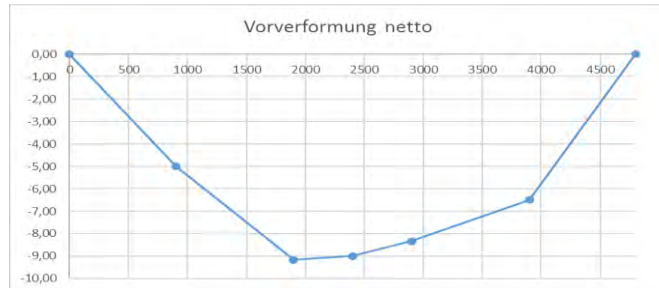


S120_4800_D_80_01	Datum 16.11.2017
	Versuch-Nr. 47

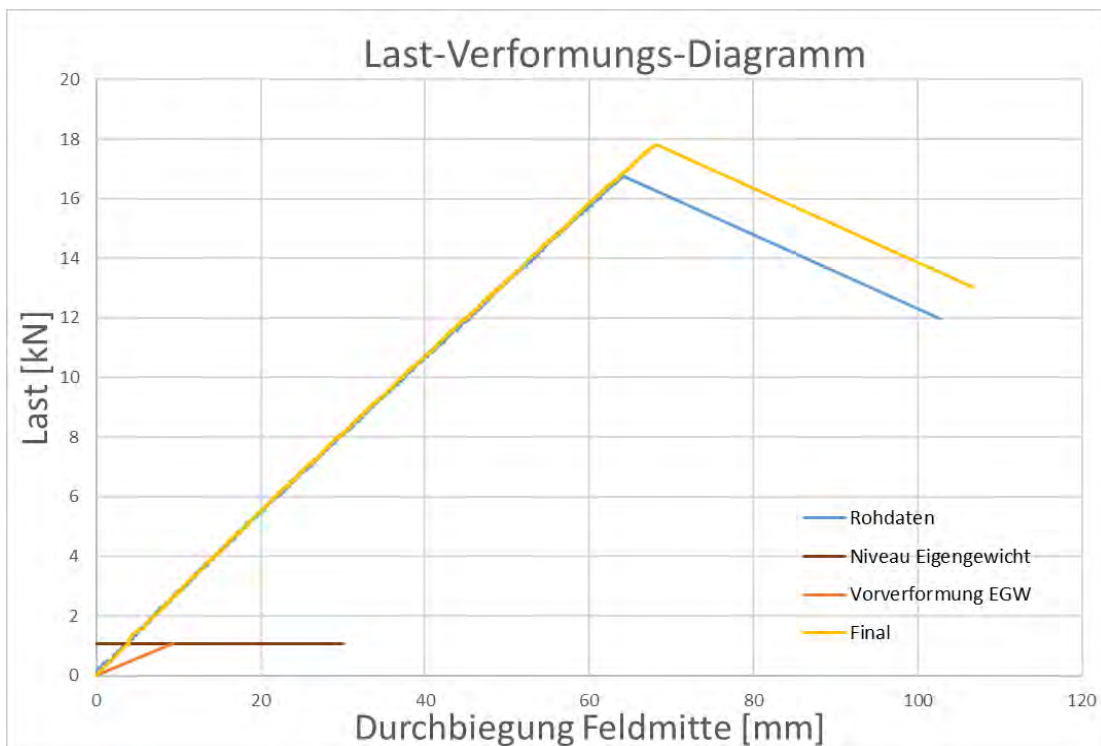
Versuchsart Druckversuch M-Beiwert 0,581
 Spannweite 4800mm

Sandwichelement PUR d=120mm
 Verlegerichtung längs
 Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] 1,072
 Vorverformung [mm] 9,17



Fmax [kN] 16,745 **Fgesamt [kN] 17,817**
 U bei Fmax [mm] zugeh. Mmax [kNm] 10,352



Anmerkungen

Versagensart

Ort des Versagens Lasteinleitungsbalken Mitte West

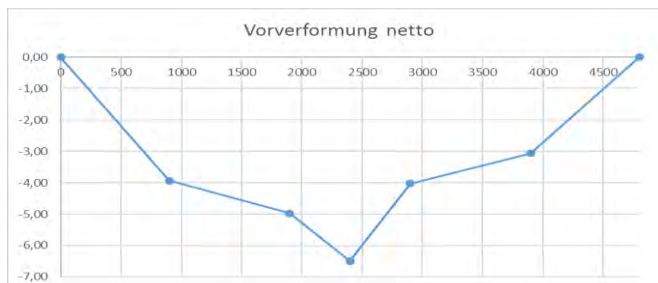
S120_4800_D_80_02

Datum 16.11.2017
Versuch-Nr. 48

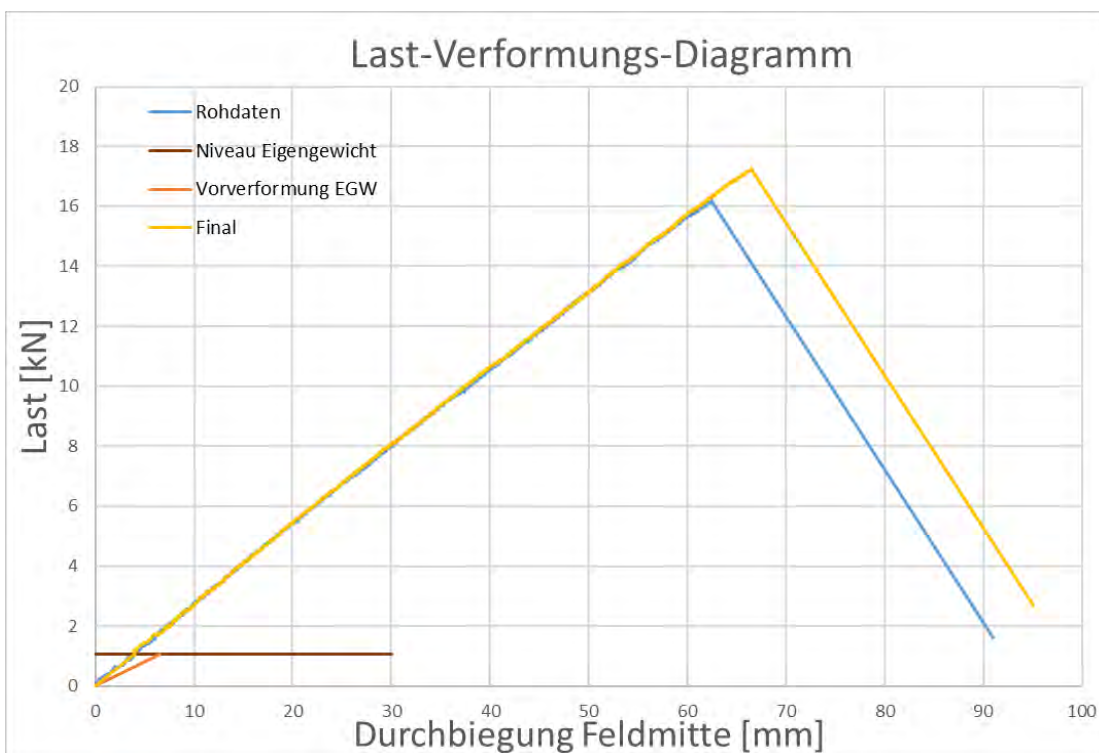
Versuchsart Druckversuch M-Beiwert 0,581
Spannweite 4800mm

Sandwichelement PUR d=120mm
Verlegerichtung längs
Befestigung Verdeckt

Eigengewicht [kN] 1,072
Vorverformung [mm] 6,5



Fmax [kN] 16,214 **Fgesamt [kN] 17,286**
U bei Fmax [mm] zugeh. Mmax [kNm] 10,043



Anmerkungen

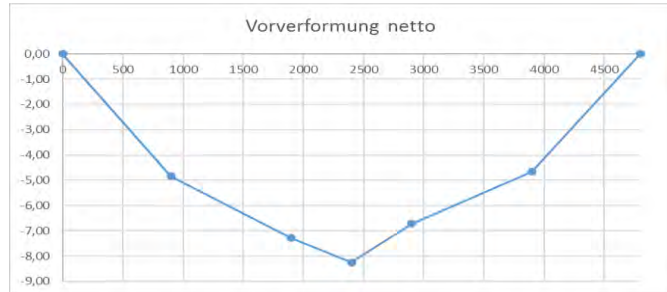
Versagensart

Ort des Versagens Lasteinleitungsstelle Mitte West

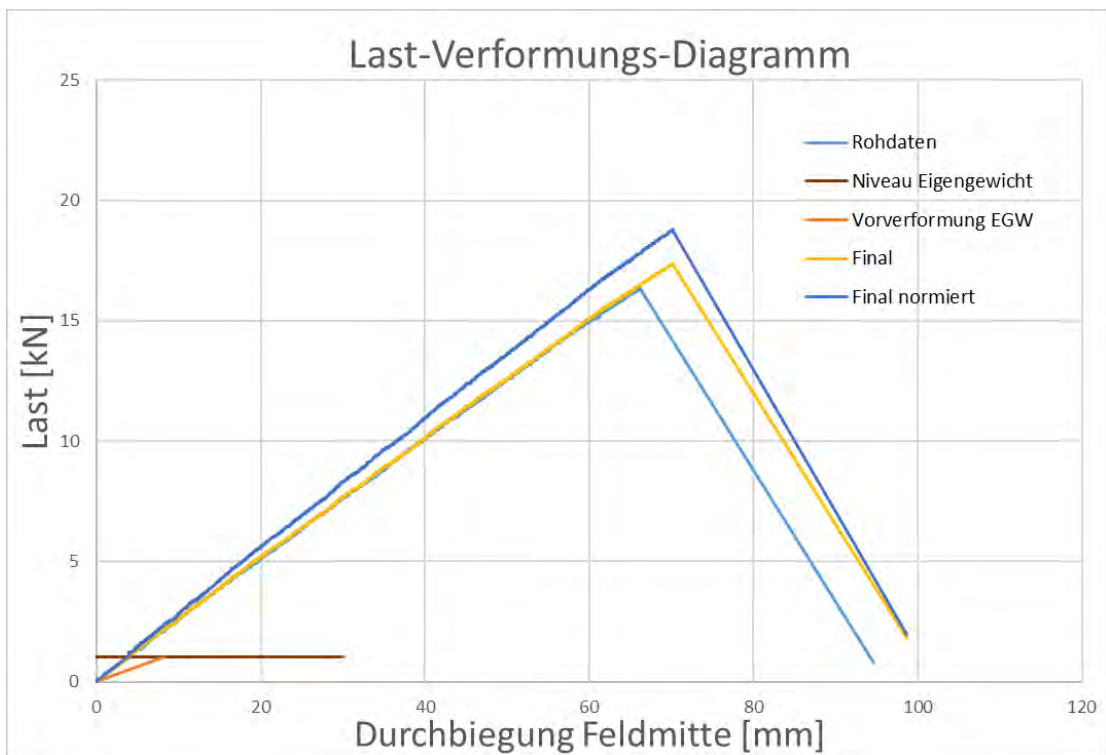
S120_4800_D_74_03	Datum 16.11.2017
	Versuch-Nr. 49

Versuchsart	Druckversuch	M-Beiwert	0,581
Spannweite	4800mm		

Sandwichelement	PUR d=120mm
Verlegerichtung	längs
Befestigung	Verdeckt
Eigengewicht [kN]	1,029
Vorverformung [mm]	8,25



Fmax [kN]	16,367	Fgesamt [kN]	17,396
U bei Fmax [mm]		zugeh. Mmax [kNm]	10,107



Anmerkungen

Versagensart

Ort des Versagens Lasteinleitungsstelle Mitte Ost