

**Umweltdaten der deutschen Zementindustrie
Environmental Data of the German Cement Industry**



2014

Inhalt / Contents

Vorwort / Foreword	3
1 Zementherstellung / Cement manufacture	5
2 Produktions- und Strukturdaten / Production and structural data	7
3 Einsatzstoffe / Input materials	9
3.1 Rohstoffe / Raw materials	9
3.2 Brennstoffe / Fuels	10
4 Energie / Energy	12
5 Emissionen / Emissions	14
5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid / Greenhouse gases / Carbon dioxide	16
5.2 Staub / Dust	17
5.3 Stickstoffoxide / Nitrogen oxides	18
5.4 Schwefeldioxid / Sulphur dioxide	19
5.5 Kohlenstoffmonoxid und organischer Gesamtkohlenstoff / Carbon monoxide and total organic carbon	20
5.6 Dioxine und Furane / Dioxins und Furans	21
5.7 Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls	22
5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / Polycyclic aromatic hydrocarbons	23
5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene	23
5.10 Benzol / Benzene	24
5.11 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds	25
5.12 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds	25
5.13 Spurenelemente / Trace elements	26
5.13.1 Cadmium / Cadmium (Cd)	28
5.13.2 Thallium / Thallium (Tl)	28
5.13.3 Quecksilber / Mercury (Hg)	29
5.13.4 Antimon / Antimony (Sb)	29
5.13.5 Arsen / Arsenic (As)	30
5.13.6 Blei / Lead (Pb)	30
5.13.7 Chrom / Chromium (Cr)	31
5.13.8 Cobalt / Cobalt (Co)	31
5.13.9 Kupfer / Copper (Cu)	32
5.13.10 Mangan / Manganese (Mn)	32
5.13.11 Nickel / Nickel (Ni)	33
5.13.12 Vanadium / Vanadium (V)	33
5.13.13 Zinn / Tin (Sn)	34
5.13.14 Beryllium / Beryllium (Be)	34
5.13.15 Selen / Selenium (Se)	35
5.13.16 Tellur / Tellurium (Te)	35
5.13.17 Zink / Zinc (Zn)	36
Literatur / Literature	37
Impressum / Imprint	39

Anmerkung: Zahlendarstellung in Tabellen und Grafiken entsprechend deutscher Regeln.

Note: Numerical expressions in tables and diagrams are shown using standard German punctuation.

Liebe Leserinnen und Leser,

im September 2000 legte der Verein Deutscher Zementwerke e. V. erstmals die „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“ vor. Die nun vorliegende Ausgabe gibt in bewährter Form einen umfangreichen Überblick über die umweltrelevanten Emissionen sämtlicher Klinker produzierenden Werke in Deutschland. Damit dokumentiert der VDZ die Ergebnisse, die aus kontinuierlichen Emissionsüberwachungen und aus Einzelmessungen von Spurenelementen und organischen Abgasbestandteilen vorliegen.

Mit der Novellierung der siebzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (17. BImSchV) im April 2013 haben sich die emissionsrechtlichen Rahmenbedingungen für die deutschen Zementwerke geändert. Die europäische Industrieemissionsrichtlinie wird damit in nationales Recht überführt. Dabei stellen die künftig in Deutschland gültigen Grenzwerte eine Verschärfung der europäischen Vorgaben dar und stellen die deutschen Zementhersteller im europäischen Vergleich vor große Herausforderungen. Hierzu gehören insbesondere die zukünftigen Grenzwerte für Stickstoffoxide (NO_x) und Ammoniak. Vor diesen Hintergrund wird die deutsche Zementindustrie in den kommenden Jahren in erheblichem Maße in neue Anlagen zur Emissionsminderung investieren.

Mit durchschnittlich 170 Kilogramm Kohlenstoffdioxid ist der spezifische energiebedingte CO_2 -Ausstoß pro hergestellter Tonne Zement im Jahr 2014 erneut gesunken. Neben weiteren verfahrenstechnischen Optimierungen und der Reduzierung des Klinkeranteils im Zement durch andere Hauptbestandteile verhalf vor allem der vermehrte Einsatz alternativer Brennstoffe zur Minderung der CO_2 -Emissionen. Der Anteil der Sekundärbrennstoffe am Brennstoffenergiebedarf lag 2014 bereits bei mehr als 63 Prozent. Verglichen mit dem Einsatz herkömmlicher Steinkohle wurden so etwa 2,2 Millionen Tonnen Kohle weniger verwendet und damit rund 2,1 Millionen Tonnen CO_2 eingespart.

Düsseldorf, im September 2015

Dr. Martin Schneider
Hauptgeschäftsführer
VDZ

Dear readers,

The German Cement Works Association (Verein Deutscher Zementwerke e. V.) presented its „Environmental Data of the German Cement Industry“ for the first time in September 2000. Now, this issue provides a comprehensive overview of environmentally-relevant emissions from all clinker-producing works in Germany in a tried-and-tested format. In it, VDZ documents the results of continual emission monitoring and single measurements of trace elements and organic exhaust gas compounds.

The amendment to the 17th Ordinance on Federal Ambient Pollution Protection (17. BImSchV) in April 2013 has led to a change in the framework conditions for German cement works, with the European Industrial Emissions Directive being transposed into national law. The limit values that will apply in Germany in future represent a tightening of the European specifications, and will pose great challenges for German cement manufacturers as compared with their European counterparts. This particularly concerns the future limit values for nitrogen oxides (NO_x) and ammonia. In light of this, the German cement industry will be investing heavily in new systems for emissions reduction over the coming years.

With an average of 170 kilograms of carbon dioxide, the specific energy-related emission of CO_2 per manufactured tonne of cement dropped again in 2014. Alongside further optimisations in process technology and reductions in the proportion of clinker in cement by using other main constituents, it is primarily increased use of alternative fuels that has helped to reduce CO_2 emissions. The proportion of secondary fuels in the fuel requirement was more than 63 per cent in 2014. Compared with use of traditional hard coal, around 2.2 million fewer tonnes of coal were used – representing a saving around 2.1 million tonnes of CO_2 .

Duesseldorf, September 2015

Dr Martin Schneider
Chief Executive
VDZ

1 Zementherstellung ■

Zement ist ein Baustoff, der infolge chemischer Reaktionen mit Wasser selbstständig erhärtet und danach sowohl an der Luft als auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.

Zement besteht aus fein gemahlenem Portlandzementklinker und Calciumsulfat (natürlicher Gips, Anhydrit oder Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen). Darüber hinaus kann Zement andere Hauptbestandteile wie Hüttensand, natürliche Pozzolane (z. B. Trass), Flugasche, Ölschieferabbrand oder Kalkstein enthalten. Eine schematische Darstellung des Herstellungsprozesses zeigt Bild 1-1.

Der sogenannte Portlandzementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das hauptsächlich Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Tonerde (Al_2O_3)) und Eisenoxid (Fe_2O_3) enthält. Kalkstein, Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, liefern diese chemischen Bestandteile. Kalkstein und Kreide bestehen aus Calciumcarbonat (CaCO_3). Wesentliche Bestandteile des natürlichen Verwitterungsprodukts Ton sind feinkörnige und glimmerartige Minerale sowie in geringer Menge Quarz und Feldspat als Reste des Ausgangsmaterials. Tonminerale und Feldspat sind Verbindungen von Aluminiumoxid und Siliciumdioxid (Alumosilicate) und Alkalien wie Natrium und Kalium. Das für die Bildung der Schmelze erforderliche Eisenoxid ist als Eisenhydroxid Bestandteil der Tonminerale oder wird als Eisenerz zugesetzt. Damit der Zement die vorgegebenen Qualitätsanforderungen erfüllt, ist eine exakt definierte Rohmaterialzusammensetzung erforderlich. Abweichungen können nur in geringem Umfang toleriert werden.

1 Cement manufacture ■

Cement is a construction material that sets automatically as a consequence of chemical reactions with water and subsequently retains its strength and soundness both when exposed to air and submerged in water.

Cement consists of finely ground Portland cement clinker and calcium sulphate (natural gypsum, anhydrite or gypsum from flue gas desulphurisation). In addition, cement may contain other main constituents, such as granulated blastfurnace slag, natural pozzolana (e.g. trass), fly ash, burnt oil shale or limestone. Fig. 1-1 depicts the manufacturing process schematically.

What is known as Portland cement clinker is made from a raw material mix mainly consisting of calcium oxide (CaO), silicon dioxide (SiO_2), aluminium oxide (alumina (Al_2O_3)), and iron oxide (Fe_2O_3). These chemical constituents are supplied by limestone, chalk and clay or their natural blend, lime marl. Limestone and chalk are composed of calcium carbonate (CaCO_3). The major constituents of clay, which is a natural product of weathering processes, are fine-grained mica-like minerals and smaller quantities of quartz and feldspar, which constitute residues of the starting material. Clay minerals and feldspar are compounds of aluminium oxide and silicon dioxide (aluminosilicates) with alkalis, such as sodium and potassium. The iron oxide required for melt formation is either contained in the clay minerals in the form of ferrous hydroxide or it is added in the form of iron ore. For the cement to conform to the quality requirements stipulated, a precisely defined raw material composition must be complied with. Only a small margin of deviation can be tolerated.

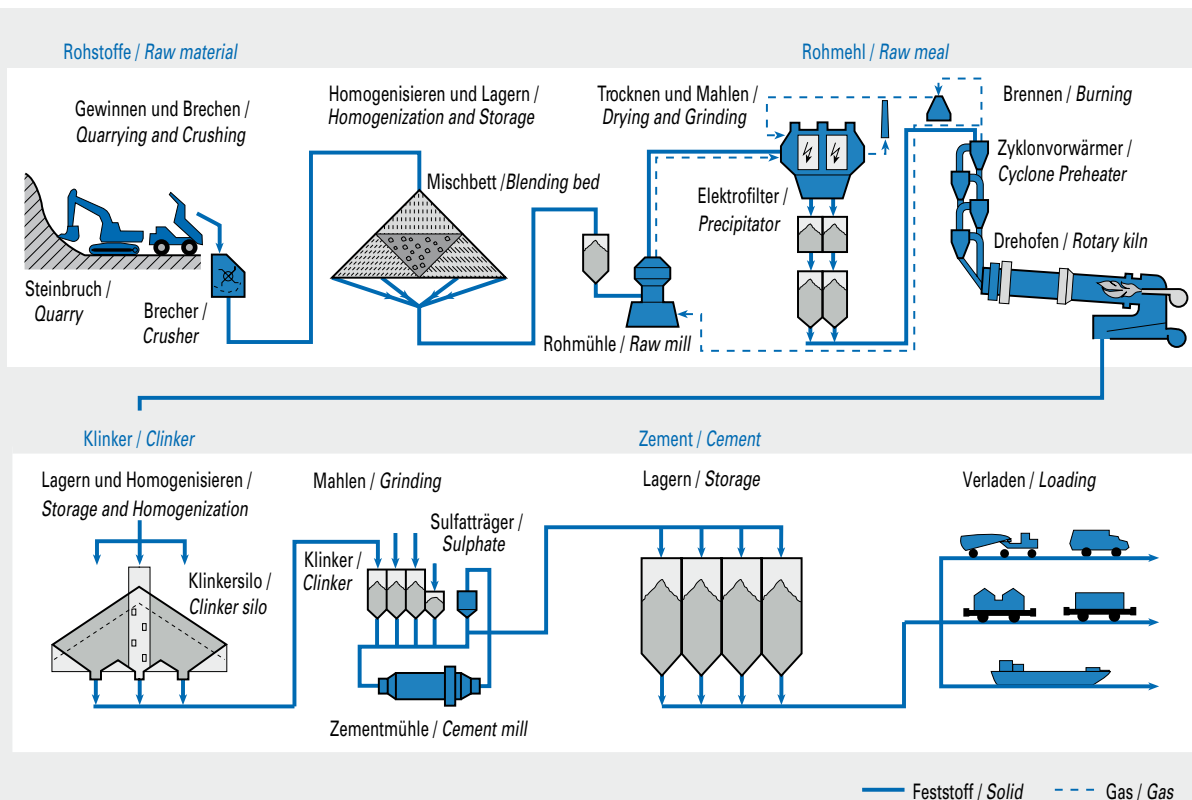


Bild 1-1 Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand.

Fig. 1-1 Schematic representation of the cement manufacturing process from quarry to dispatch.

Das Rohstoffgemisch wird in einem Drehofen bei einer Temperatur von etwa 1.450 °C bis zum Sintern erhitzt. Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei neue Verbindungen, die sogenannten Klinkerphasen.

Das sind bestimmte Calciumsilicate und Calciumaluminat, die dem Zement seine charakteristische Eigenschaft der Erhärtung in Gegenwart von Wasser verleihen.

Der im Drehofen gebrannte Klinker wird anschließend in Zementmühlen unter Zusatz von Calciumsulfat und ggf. weiteren Hauptbestandteilen zu Zement gemahlen. Mit Hilfe des Calciumsulfats wird das Erstarrungsverhalten des Zements gesteuert, damit das Produkt bei der Betonherstellung optimal verarbeitet werden kann.

Die weiteren Hauptbestandteile neben Zementklinker sind silicatische, aluminatische oder kalkhaltige Stoffe. Sie tragen zur Erhärtung des Zements bei oder wirken sich günstig auf die physikalischen Eigenschaften des Betons aus.

The raw material mix is heated up to a temperature of approximately 1,450 °C in a rotary kiln until it starts sintering. This results in the starting materials forming new compounds known as clinker phases.

These are certain calcium silicates and calcium aluminates which confer on the cement its characteristic feature of setting in the presence of water.

The clinker burnt in the rotary kiln is subsequently ground to cement in finish mills with calcium sulphate and, if necessary, with further main constituents being added. The calcium sulphate serves to adjust the setting behaviour of the cement in order to obtain optimum workability of the product during concrete production.

Apart from cement clinker, substances of silicate, aluminate or calcareous nature represent the further main constituents. They contribute to the setting of the cement or have favourable effects on the physical properties of the concrete.

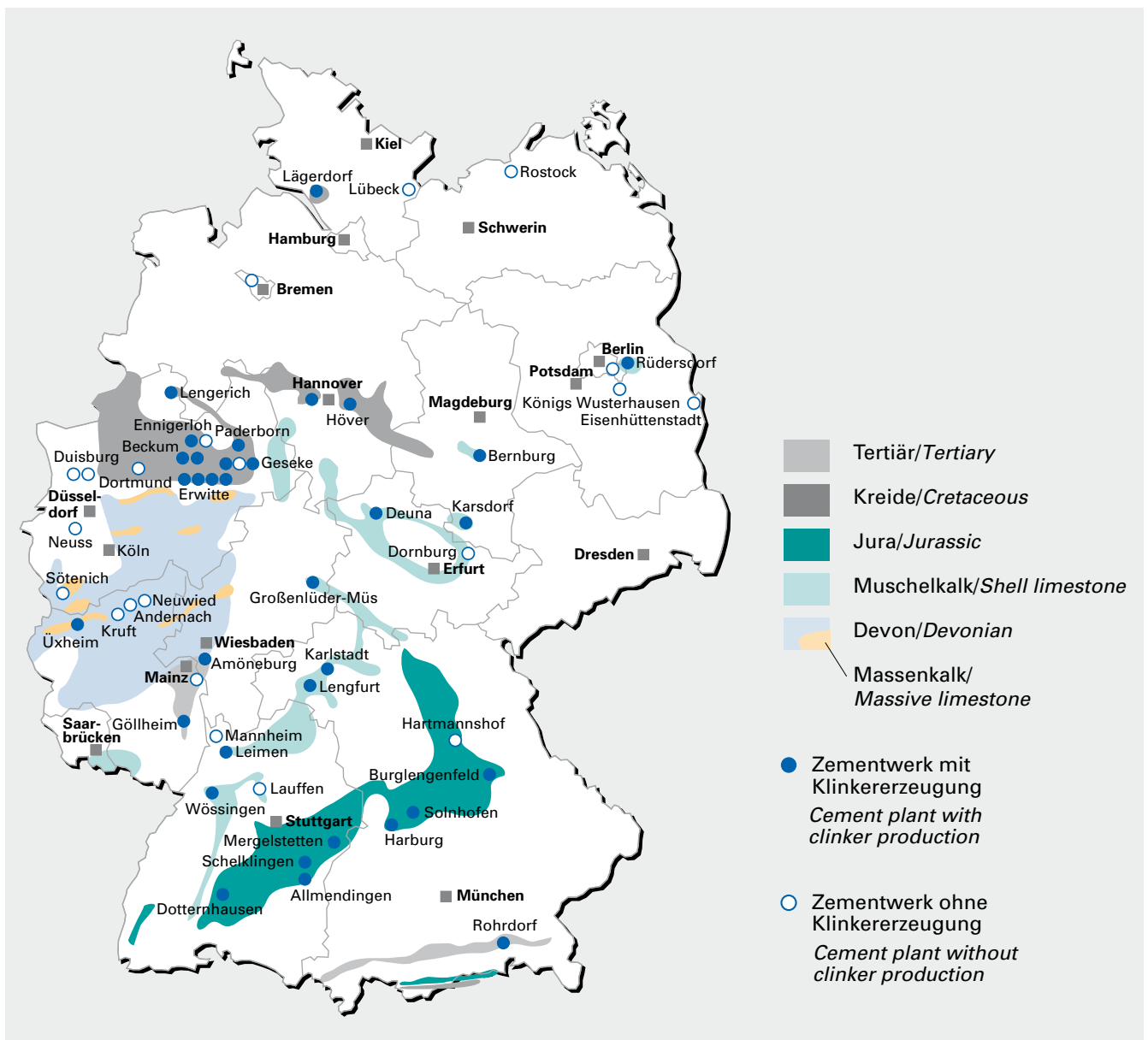


Bild 2-1 Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2015.

Fig. 2-1 Cement works in the Federal Republic of Germany in the year 2015.

2 Produktions- und Strukturdaten ■

Zement ist ein homogenes Massengut, das zu Lande per Lkw transportiert wird und deshalb transportkostenintensiv ist. Zement wird überwiegend zu lokalen Absatzmärkten geliefert. Die Produktionsstandorte sind den Rohstoffvorkommen entsprechend über das Bundesgebiet verteilt und befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den jeweiligen Kalksteinvorkommen. Im Jahr 2014 produzierten 22 Unternehmen in 55 Werken etwa 32,1 Mio. Tonnen Zement [1] (Bild 2-1).

Die Tabellen 2-1 und 2-3 geben einen Überblick über die Klinkerproduktion in Deutschland sowie den daraus hergestellten Zement. Zu den Hauptabnehmern gehören die Transportbetonindustrie mit ca. 55 % sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 24 % des inländischen Zementversandes. Etwa 7 % des Zements wird als Sackzement versandt.

Zementklinker wird heute in Deutschland zum überwiegenden Teil nach dem Trockenverfahren in Drehöfen mit Zyklonvorwärmer hergestellt. Einen deutlich geringeren Anteil an der Produktion haben Öfen mit Rostvorwärmer (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-1 Produktion, Versand, Export und Import.

Table 2-1 Output, deliveries, export and import.

Jahr / Year	Produktion / Production		Zementversand / Cement deliveries			
	Klinker / Clinker	Zement / Cement	Zementversand Inland / Domestic deliveries	Export einschl. Klinker / Cement export (incl. clinker export)	Zementversand gesamt / Total cement deliveries (incl. clinker export)	Zementimport / Cement import
	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t
2005	24.378	31.009	25.615	6.749	32.364	1.427
2006	24.921	33.630	27.428	7.286	34.714	1.492
2007	26.992	33.382	26.064	8.658	34.722	1.288
2008	25.366	33.581	26.274	8.912	35.193	1.317
2009	23.232	30.441	24.057	7.354	31.411	1.199
2010	22.996	29.915	23.406	7.301	30.707	1.285
2011	24.775	33.540	26.767	7.935	34.702	1.305
2012	24.581	32.432	25.492	7.018	32.510	1.277
2013	23.127	31.308	25.201	6.498	31.699	1.344
2014 ¹⁾	23.871	32.099	25.850	6.175	32.025	1.292

¹⁾ Außenhandelsdaten vorläufig / Import/Export data preliminary

Quellen / Sources: VDZ, Destatis

Tabelle 2-2 Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015.

Table 2-2 Number and capacity of kilns with operating permits in the Federal Republic of Germany in the years from 2013 to 2015.

		Stand: 01.01.2013/ As at 01. Jan 2013			Stand: 01.01.2014/ As at 01. Jan 2014			Stand: 01.01.2015/ As at 01. Jan 2015		
		Anzahl/ Number	Kapazität/ Capacity		Anzahl/ Number	Kapazität/ Capacity		Anzahl/ Number	Kapazität/ Capacity	
			t/d	%		t/d	%		t/d	%
Ofen mit Zyklonvorwärmer/ Kilns with cyclone preheaters		39	100.460	93,8	39	100.460	93,8	39	100.460	93,8
Ofen mit Rostvorwärmer/ Kilns with grate preheaters		6	5.500	5,1	6	5.500	5,1	6	5.500	5,1
Schachtöfen / Shaft kilns		8	1.200	1,1	8	1.200	1,1	8	1.200	1,1
Summe / Total		53	107.160	100	53	107.160	100	53	107.160	100
mittlere Ofenkapazität in t/d / Average kiln capacity in t/d	Drehöfen / Rotary kilns			2.355			2.355			2.355
	Schachtöfen / Shaft kilns			150			150			150

Quelle / Source: VDZ

2 Production and structural data ■

Cement is a homogeneous bulk commodity that, given the high cost of road transport by truck is mainly delivered to local markets. Production facilities of the German cement industry are spread over the Federal Republic of Germany according to the appropriate mineral resources and located in the immediate vicinity of the respective limestone deposits. In 2014, 22 companies with their 55 works produced about 32.1 million t of cement in Germany [1] (Fig. 2-1).

Tables 2-1 and 2-3 give an overview of the clinker output in Germany and the cement made from it. The ready-mixed concrete industry (55 % of domestic cement deliveries) and the manufacturers of concrete elements (24 % of domestic cement deliveries) are among the principal buyers of cement. 7 % of the cement is dispatched as bagged cement.

In Germany most of the cement clinker is nowadays produced in rotary kilns with cyclone preheaters applying the dry process. Kilns equipped with grate preheaters account for a significantly lower share of output (Table 2-2).

Tabelle 2-3 Inlandsversand der Verbandsmitglieder nach Zementarten.**Table 2-3** Domestic deliveries classified by cement types.

Jahr/ Year	CEM											
	I	II	Darunter/ <i>Among</i>					III	IV	V	Sonst./ <i>Others</i>	Gesamt/ <i>Total</i>
			II/S	II/P	II/V	II/T+ II/LL	II/M					
1.000 t												
2004	13.728	7.163	3.296	50	0	3.772	45	2.438	4	0	212	23.545
2005 ¹⁾	13.226	8.055	3.701	34	5	3.878	437	3.621	8	0	185	25.095
2006	11.189	10.628	5.170	32	0	3.946	1.480	4.764	8	0	255	26.843
2007	8.932	11.299	5.229	30	0	3.837	2.203	4.883	8	0	278	25.399
2008	7.710	12.514	5.681	29	0	4.271	2.530	5.289	8	0	243	25.764
2009	8.031	11.122	3.051	24	0	5.584	2.463	4.212	8	0	215	23.588
2010	7.694	10.550	2.911	39	67	5.577	1.956	4.549	7	0	172	22.972
2011	8.286	12.000	3.812	64	111	5.573	2.440	5.664	7	0	261	26.218
2012 ¹⁾	7.404	12.060	4.328	62	245	5.075	2.350	5.530	6	0	246	25.246
2013 ¹⁾	7.130	11.851	4.216	50	162	5.356	2.067	5.498	6	0	235	24.720
2014	7.554	11.826	4.296	36	124	5.477	1.893	5.677	6	10	263	25.336

Anmerkung/Note:

CEM I = Portlandzement; CEM II/S = Portlandhüttenzement; CEM II/P = Portlandpuzzolanazement; CEM II/V = Portlandflugaschezement;
 CEM II/T = Portlandschieferzement; CEM II/LL = Portlandkalksteinzement; CEM II/M = Portlandkompositzement; CEM III = Hochofenzement;
 CEM IV = Puzzolanazement; CEM V = Kompositzement; Sonstige = sonstige bauaufsichtlich zugelassene Zemente, Boden- und Tragschichtbinder
 (Festigkeit $\geq 32,5$ N/mm²), Klinkermehl

CEM I = Portland cement; CEM II/S = Portland-slag cement; CEM II/P = Portland pozzolana cement; CEM II/V = Portland-fly ash cement;
 CEM II/T = Portland-burnt shale cement; CEM II/LL = Portland-limestone cement; CEM II/M = Portland-composite cement; CEM III = blastfurnace cement;
 CEM IV = pozzolana cement; CEM V = composite cement; Other = other cements approved by the building supervisory authorities, road binders
 (strength ≥ 32.5 N/mm²), clinker meal

¹⁾ Werte wegen Änderung des Berichtskreises mit den Vorjahren nicht vergleichbar/ Reporting different from that of the previous year.

Quelle / Source: VDZ

3 Einsatzstoffe ■

3.1 Rohstoffe

Die wichtigsten Ausgangsstoffe zur Herstellung des Portlandzementklinkers sind Kalkstein oder Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel. In Abhängigkeit von der Rohstoffsituation am Standort des Zementwerks kann es erforderlich sein, der Rohstoffmischung reinen Kalkstein, Eisenerz, Sand oder andere Korrekturstoffe zuzusetzen, um fehlende chemische Bestandteile auszugleichen. Neben natürlichen Rohstoffen können auch alternative Rohstoffe, wie z. B. Kalkschlämme, Gießereialsande und Flugaschen, eingesetzt werden. Sie enthalten als Hauptbestandteile ebenfalls Siliciumdioxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid und/oder Calciumoxid und werden mit den Rohstoffen mengenmäßig so kombiniert, dass die Anforderungen an die vorgegebene Klinkerzusammensetzung erfüllt werden. Die Voraussetzungen, die die stoffliche Zusammensetzung eines alternativen Rohstoffs erfüllen muss, hängen in erster Linie von der vorgegebenen Rohstoffsituation eines Zementwerkes, d. h. der Zusammensetzung des Kalkstein- bzw. Mergelvorkommens ab.

In Tabelle 3-1 werden die im Jahr 2014 eingesetzten Rohstoffe aufgeführt. Ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechend lassen sie sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Der Einsatz erfolgt hauptsächlich als Rohmaterialkomponente beim Klinkerbrennprozess. Hüttensand, ein geringer Teil des Kalksteins, Ölschiefer (in gebrannter Form) sowie Trass werden als Hauptbestandteil im Zement verwendet.

Die Zementindustrie bemüht sich, den Anteil anderer Bestandteile neben Klinker im Zement zu erhöhen. So können die Qualität des Produkts gezielt verändert, die Wirtschaftlichkeit der Herstellung verbessert, natürliche Ressourcen geschont sowie Stoffe aus anderen Prozessen im Sinne des deutschen Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sinnvoll verwertet werden.

Als Stoffe, die Zementklinker im Zement ersetzen können, sind in Deutschland in erster Linie Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) und daneben Kalkstein von technischer Bedeutung. Hüttensand ist ein Produkt der Roheisenherstellung und wird zur Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet.

Der Bedarf an Sulfatträgern, mit denen die Verarbeitungseigenschaften der Zemente gesteuert werden, wird zu ca. 75 % durch natürlichen Gips und/oder Anhydrit gedeckt. Bei dem restlichen Anteil handelt es sich um Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen.

Tabelle 3-1 Rohstoffeinsatz 2014.

Table 3-1 Raw materials input in 2014.

Gruppe / Group	Rohstoff / Raw material	Einsatz / Input quantity 1.000 t/a
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide / Limestone / Marl / Chalk	37.912
	Sonstige, wie: / Others, such as: - Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung / Lime sludge from drinking water and sewage treatment - Kalkhydrat / Hydrated lime - Porenbetongranulat / Foam concrete granulates - Calciumfluorid / Calcium fluoride	75
Si	Sand / Sand	1.139
	Gießereialsand / Used foundry sand	174
Si-Al	Ton / Clay	1.295
	Bentonit / Kaolinit / Bentonite / Kaolinite	35
Fe	Eisenerz / Iron ore	126
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie, wie: / Other input materials from the iron and steel industries, such as: - Kiesabbrand / Roasted pyrite - verunreinigtes Erz / Contaminated ore - Eisenoxid/Flugasche-Gemisch / Iron oxide/fly ash blends - Stahlwerksstäube / Dusts from steel plants - Walzzunder / Mill scale	103
Si-Al-Ca	Hüttensand / Granulated blastfurnace slag	6.948
	Flugasche / Fly ash	313
	Ölschiefer / Oil shale	118
	Trass / Trass	31
	Sonstige, wie: / Others, such as: - Papierreststoffe / Paper residuals - Aschen aus Verbrennungsprozessen / Ashes from incineration processes - Mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden / Mineral residuals, e. g. soil contaminated by oil	46
S	Natürlicher Gips / Natural gypsum	808
	Natürlicher Anhydrit / Natural anhydrite	477
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung / Gypsum from flue gas desulphurisation	321
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie, wie: / Input materials from the metal industry, such as: - Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken / Residues from reprocessing salt slag - Aluminiumhydroxid / Aluminium hydroxide	60

Quellen / Sources: VDZ, Fachverband Eisenhüttenschlacken

3.2 Brennstoffe

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. In geringem Umfang wird thermische Energie auch für die Trocknung von Rohstoffen und weiteren Zement-Hauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, eingesetzt. Die traditionellen Brennstoffe in der deutschen Zementindustrie sind seit Mitte der 70er-Jahre Steinkohle und Braunkohle, in geringem Umfang auch schweres Heizöl. Seit 1990 wird ein nennenswerter Teil der Kohle durch Petrolkoks ersetzt. Petrolkoks ist eine kohleähnliche Fraktion des Mineralöls, die bei der Rohölaufbereitung entsteht. Zum Anfahren des Ofens sowie für Trocknungsprozesse werden darüber hinaus leichtes und schweres Heizöl sowie Gas verwendet. Die Gesamtaufstellung der in der Zementindustrie eingesetzten Energieträger zeigt Tabelle 3-2 [1, 2].

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage in hohem Maße alternative Brennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementindustrie betrug über 63 % im Jahr 2014. Eine Aufstellung der eingesetzten alternativen Brennstoffe sowie deren durchschnittliche Heizwerte enthält Tabelle 3-3.

3 Input materials ■

3.1 Raw materials

Limestone or chalk and clay or their natural blend – lime marl – constitute the most important raw materials for the production of Portland cement clinker. Depending on the raw material situation at the location of a cement works, it may be necessary to add pure limestone, iron ore, sand or other corrective substances to the raw material mix in order to compensate for the lack of certain chemical constituents. Apart from natural raw materials, also alternative raw materials can be utilised, such as lime sludge, used foundry sand and fly ash. They contain silicon dioxide, aluminium oxide, iron oxide and/or calcium oxide as main constituents as well and are combined with the raw materials in quantities apt to ensure compliance with the clinker composition specified. The preconditions to be met by the material composition of an alternative raw material primarily depend on the raw material situation prevailing at a cement works, i.e. the composition of the limestone and marl deposits, respectively.

Table 3-1 lists the raw materials utilised in the year 2014. They can be classified into different groups, according to their chemical composition. Most of them are utilised as raw material components in the clinker burning process. Blastfurnace slag, a small proportion of the limestone, oil shale (burnt) and trass are used as main constituents of cement.

Tabelle 3-2 Brennstoffenergieeinsatz nach Energieträgern.

Table 3-2 Fuel energy consumption classified by energy sources.

Brennstoff / Fuel		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Steinkohle / Coal	Mio. GJ/a / million GJ/a	8,7	11,4	13,9	13,9	10,2	9,0	10	9,8	7,8	8,9
	Anteil % / share %	9,8	12,4	13,5	14,5	11,6	10,2	10,6	10,4	8,7	9,6
Braunkohle / Lignite	Mio. GJ/a / million GJ/a	29,1	27,6	25,2	23,1	20,0	20,7	23,7	22,3	19,7	19,5
	Anteil % / share %	32,8	30,0	23,1	24,1	22,7	23,5	25,1	23,7	21,8	21,1
Petrolkoks / Petcoke	Mio. GJ/a / million GJ/a	4,2	4,4	5,6	4,9	4,4	3,3	2,1	3,2	3,2	4,1
	Anteil % / share %	4,7	4,7	5,6	5,1	5,0	3,8	2,2	3,4	3,5	4,4
Heizöl S / Heavy fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	2,2	1,9	2,1	0,9	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
	Anteil % / share %	2,5	2,0	2,1	0,9	1,2	0,6	0,5	0,4	0,2	0,2
Heizöl EL / Fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,7	1,2	0,7
	Anteil % / share %	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,7	1,3	0,8
Erdgas u.a. Gase / Natural gas and other gases	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5
	Anteil % / share %	0,6	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,4	0,5
Sonstige fossile Brennstoffe / Other fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,5	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,1	0,1	1,4	0,0
	Anteil % / share %	0,6	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,1	0,2	1,6	0,0
Fossile Brennstoffe gesamt / Total fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	45,4	46	47,3	43,7	36,7	34,4	36,7	36,6	33,8	33,9
	Anteil % / share %	51,2	50,0	47,5	45,6	41,6	39,0	38,9	39,0	37,5	36,6
Alternative Brennstoffe gesamt / Total alternative fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	43,3	46,1	52,2	52,1	51,5	53,7	57,7	57,3	56,6	58,6
	Anteil % / share %	48,8	50,0	52,2	54,4	58,4	61,0	61,1	61,0	62,5	63,4
Thermische Energie gesamt / Total thermal energy consumption	Mio. GJ/a / million GJ/a	88,7	92,1	99,5	95,8	88,2	88,1	94,4	93,9	90,4	92,5
	Anteil % / share %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabelle 3-3 Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe 2014.**Table 3-3** Used quantity and average calorific value of alternative fuels in 2014.

Alternative Brennstoffe / Alternative fuel	1.000 t/a	MJ/kg
Altreifen / Waste tyres	217	28
Altöl / Waste oil	52	26
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbe- abfällen / Fractions of industrial and commercial waste:		
- Zellstoff, Papier und Pappe / Pulp, paper and cardboard	92	5
- Kunststoff / Plastics	665	23
- Verpackungen / Packaging	–	–
- Abfälle aus der Textilindustrie / Wastes from the textile industry	–	–
- Sonstige / Others	1.138	21
Tiermehle und -fette / Meat and bone meal and animal fat	151	18
Aufbereitete Fraktionen aus Sied- lungsabfällen / Mixed fractions of municipal waste	308	16
Altholz / Waste wood	3	13
Lösungsmittel / Solvents	96	23
Bleicherde / Fuller's earth	–	–
Klärschlamm / Sewage sludge	348	3
Sonstige, wie: / Others, such as:	60	11
- Ölschlamm / Oil sludge		
- Organische Destillations- rückstände / Organic distillation residues		

Quelle / Source: VDZ

The cement industry is making efforts to increase the share in the cement of constituents other than clinker. This allows to modify the quality of the product purposefully, to improve the economic efficiency of the manufacturing process, to conserve natural resources, and to utilise materials generated by other processes in a useful manner, as stipulated by the German Waste Management and Recycling Act.

The materials, having industrial importance as potential substitutes for cement clinker in the cement in Germany, are chiefly (granulated) blastfurnace slag and also limestone. Blastfurnace slag is a spin-off of pig iron production and is used in the manufacture of Portland slag and blastfurnace cements.

Natural gypsum and/or anhydrite cover about 75 % of the demand for sulphate agents, which serve to adjust the working properties of the cements. Gypsum from flue gas desulphurisation accounts for the remaining share.

3.2 Fuels

Cement clinker burning uses up most of the fuel energy consumed in cement manufacture. To a lesser extent thermal energy is also used for drying raw materials and other major cement constituents, such as granulated blastfurnace slag. Since the mid-1970ies, the traditional fuels of the German cement industry have been coal and lignite and, on a smaller scale, also heavy fuel oil. A significant portion of coal has been replaced by petcoke since the 1990ies. Petcoke is a coal-like fraction of mineral oil generated in crude oil processing. In addition to that, light and heavy fuel oil and gas are used for kiln start-up and drying processes. Table 3-2 lists all the energy sources exploited in the German cement industry [1, 2].

Apart from fossil fuels, the use of alternative fuels in the clinker burning process is gaining in importance nowadays. Alternative fuels accounted over 63 % of the total fuel energy demand of the German cement industry in 2014. Table 3-3 lists the alternative fuels utilised and their average calorific values.

4 Energie ■

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurden in Deutschland 2014 durchschnittlich 2.849 MJ Brennstoffenergie und 110,0 kWh elektrische Energie eingesetzt (Tabellen 4-1 und 4-2). Brennstoffenergie wird im Wesentlichen für das Brennen des Klinkers benötigt; elektrische Energie wird vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 35 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 22 %) und für die Mahlung der Zemente (ca. 38 %) verwendet.

Die Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes in der Zementindustrie ist in Bild 4-1 dargestellt.

Nach 1990 hat u.a. die Modernisierung der Zementwerke in den neuen Bundesländern zu einer Abnahme des spezifischen Brennstoffenergieeinsatzes beigetragen. Bezogen auf die Tonne Zement liegt er seit vielen Jahren zwischen 2.700 und 3.000 MJ.

Der Anteil der alternativen Brennstoffe am Energieeinsatz konnte in den letzten 20 Jahren deutlich gesteigert werden. Dadurch nahm der Einsatz wertvoller fossiler Brennstoffe, wie vor allem Stein- und Braunkohle, stetig ab und macht heute nur noch weniger als 40 % des Brennstoffenergieeinsatzes aus. Die hohe Energieeffizienz des Zementherstellungsprozesses wurde dadurch nicht beeinflusst [3, 5, 6].

Höhere Anforderungen an die Produktqualität sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes waren die wesentlichen Ursachen für den tendenziell steigenden elektrischen Energieeinsatz der letzten Jahrzehnte (Bild 4-2). Nach einigen Jahren der Stabilisierung, zu der u. a. Verbesserungen in der Mahltechnik beitrugen, stieg der spezifische elektrische Energiebedarf in den letzten Jahren wieder an. Wesentlicher Grund hierfür ist der gestiegene Bedarf an fein aufgemahlenen leistungsstarken Zementen in der Baustoffindustrie.

Tabelle 4-1 Absoluter und spezifischer thermischer Brennstoffenergieeinsatz.

Table 4-1 Absolute and specific thermal fuel energy consumption.

Jahr / Year	Thermischer Brennstoffenergieeinsatz Thermal fuel energy consumption	
	absolut in Mio. GJ/a Absolute in million GJ/a	spezifisch in MJ/t Zement Specific in MJ/t cement
1990	109,5	3.200
1992	–	–
1993	–	–
1994	102,9	3.000
1995	102,8	3.000
1996	97,6	2.995
1997	99,3	2.975
1998	100,7	2.905
1999	102,3	2.800
2000	99,3	2.835
2001	89,8	2.790
2002	85,8	2.790
2003	91,3	2.740
2004	94,9	2.920
2005	88,7	2.785
2006	92,1	2.674
2007	99,5	2.915
2008	95,8	2.764
2009	88,2	2.848
2010	88,1	2.874
2011	94,4	2.759
2012	93,9	2.866
2013	90,4	2.857
2014	92,5	2.849

Quelle / Source: VDZ

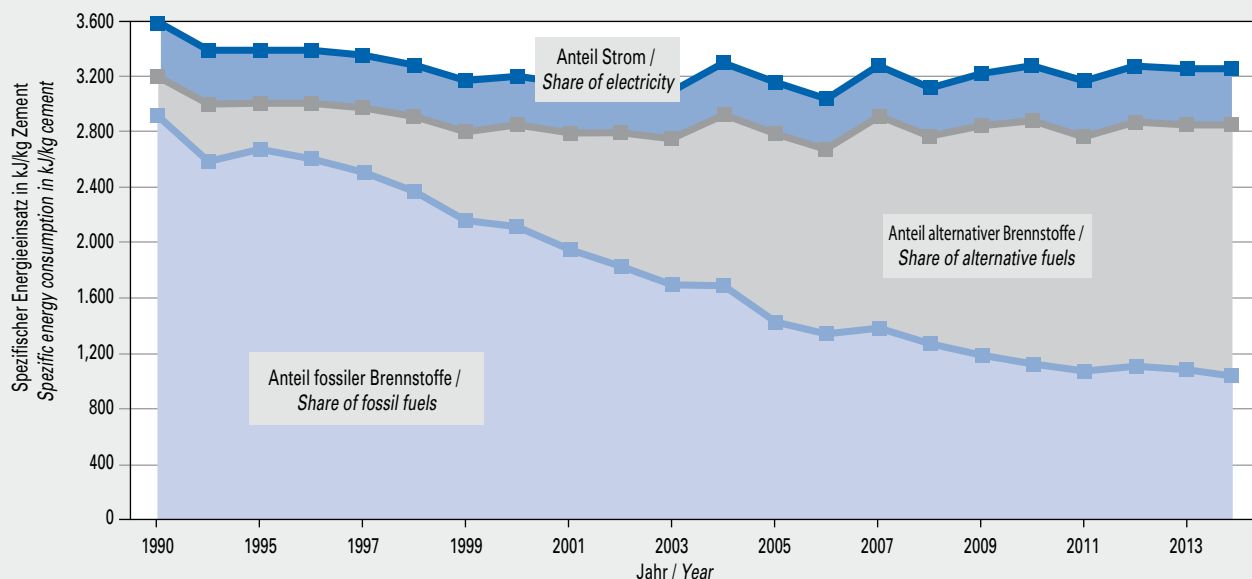


Bild 4-1 Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes.

Fig. 4-1 Development of the specific fuel energy consumption.

Tabelle 4-2 Absoluter und spezifischer elektrischer Energieeinsatz.
Table 4-2 Absolute and specific electrical power consumption.

Jahr / Year	Elektrischer Energieeinsatz Electrical power consumption	
	absolut in Mio. MWh/a Absolute in million MWh/a	spezifisch in kWh/t Zement Specific in kWh/t cement
1990	3,67	107,4
1992	–	–
1993	–	–
1994	3,72	107,8
1995	3,64	106,5
1996	3,50	107,4
1997	3,47	103,9
1998	3,63	104,7
1999	3,73	102,0
2000	3,55	101,5
2001	3,21	99,8
2002	3,17	103,0
2003	3,32	99,5
2004	3,32	102,1
2005	3,24	101,9
2006	3,42	99,4
2007	3,40	99,7
2008	3,43	99,0
2009	3,15	101,8
2010	3,37	109,8
2011	3,74	109,4
2012	3,63	110,8
2013	3,49	110,0
2014	3,57	110,0

Quelle / Source: VDZ

4 Energy ■

In Germany, the production of one tonne of cement consumed an average of 2,849 MJ fuel energy and 110.0 kWh electrical energy in 2014 (Tables 4-1 and 4-2). Fuel energy is primarily required for clinker burning, while electrical energy is chiefly used for raw material pre-treatment (about 35 %), for burning and cooling the clinker (about 22 %) and for cement grinding (about 38 %).

The development of the specific energy consumption in the cement industry is shown in Figure 4.1

After 1990 inter alia the modernisation of the cement works in the newly formed German States resulted in a decrease in specific fuel energy consumption. After that the cement specific fuel energy consumption was stabilized in the range of 2,700 to 3,000 MJ/t cement.

During the last 20 years the use of alternative fuels could be increased significantly. Therefore, the use of fossil fuels, especially hard coal and lignite, decreased continuously. As a result only 40% of the fuel energy consumption is covered by fossil fuels today. The high energy efficiency of the cement production process was not affected by this substitution [3, 5, 6].

More demanding specifications for product quality and measures aimed at improving environmental protection were the major causes for the upward tendency in electrical power demand over the past decades (Fig. 4-2). After several years of stabilization, in particular due to improvements in grinding technologies, in the last years a noticeable increase of the specific electrical energy demand has been observed. The major reason for that is the increased demand of finely ground high performance cements within the building and construction industry.

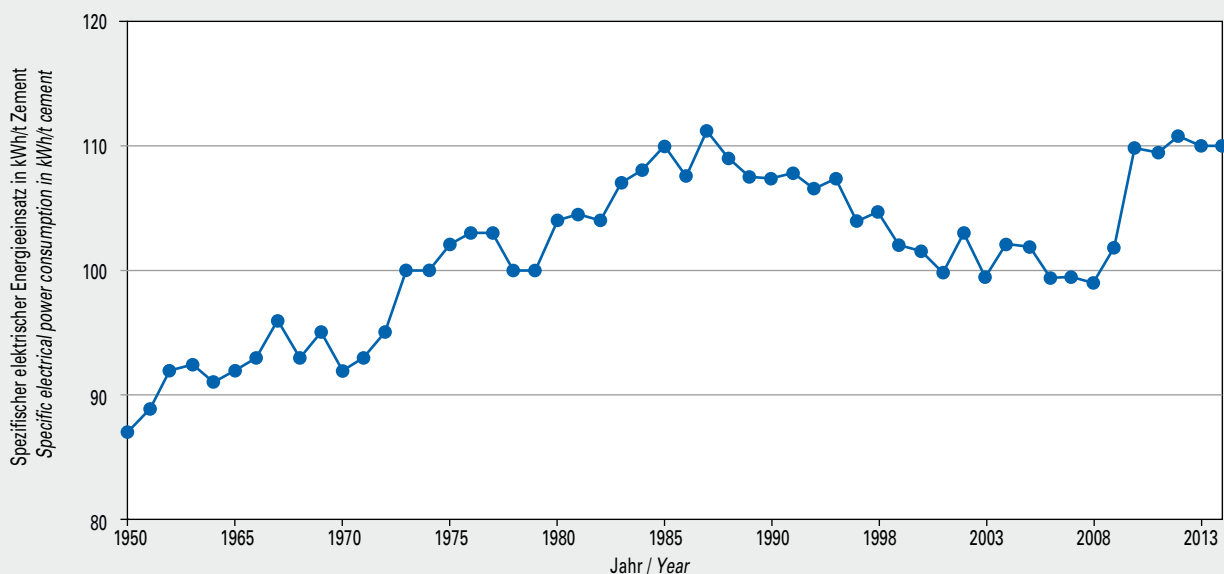


Bild 4-2 Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes (Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987).
Fig. 4-2 Development of the specific electrical power consumption (New Federal States included since 1987).

5 Emissionen ■

In Deutschland unterliegen die Errichtung und der Betrieb von Zementwerken den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach Brennstoffeinsatz werden unterschiedliche Anforderungen an die einzuhaltenden Emissionskonzentrationen gestellt. Falls ausschließlich Regelbrennstoffe eingesetzt werden, sind die Regelungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA) maßgeblich. Wird ein Teil der Regelbrennstoffe durch Abfälle als alternative Brennstoffe ersetzt, so gelten zusätzlich die Bestimmungen der 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (17. BImSchV). Auf dieser gesetzlichen Basis kann die zuständige Behörde sowohl Messungen aus besonderem Anlass als auch erstmalige und wiederkehrende Messungen anordnen, die nur von zugelassenen Messstellen durchgeführt werden dürfen.

Zur Bestimmung der Emissionen von Zementwerken stehen dabei sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Messverfahren zur Verfügung, die in entsprechenden VDI-Richtlinien und DIN-Normen beschrieben sind (Tabelle 5-1). Kontinuierlich werden hauptsächlich Staub, Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2) sowie vermehrt Quecksilber (HG), Ammoniak (NH_3) und die Summe organischer Verbindungen gemessen; die anderen immissionsrechtlich relevanten Parameter werden in der Regel diskontinuierlich auf der Basis von Einzelmessungen bestimmt.

Die in diesem Kapitel dargestellten Messergebnisse [3] beruhen auf den gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsmessungen an Drehofenanlagen der deutschen Zementindustrie. Kontinuierlich gemessene Emissionen wurden dabei in Jahresmittelwerte umgerechnet. Im Fall von diskontinuierlich gemessenen Emissionen werden Werte aus den jeweiligen Einzelmessungen angegeben. Sämtliche Messwerte sind auf ein Kubikmeter (m^3) trockenes Abgas im Normzustand mit einem Sauerstoffgehalt von 10 % bezogen.

5 Emissions ■

In Germany, the erection and operation of cement works are subject to the provisions of the Federal Ambient Pollution Protection Act. Depending on the type of fuel utilised, different specifications for the emission concentrations to be complied with are laid down. If standard fuels are used exclusively, the regulations of the Clean Air Act (TA Luft) are decisive. If a proportion of the standard fuels is replaced by waste used as alternative fuels, the provisions of the German regulation on waste incineration (17th BImSchV) apply additionally. Proceeding from this legal basis, the competent authorities can order both measurements for special reasons and first-time and recurrent measurements to be carried out by accredited measuring bodies only.

Emissions from cement works can be determined both by continuous and discontinuous measuring methods, which are described in corresponding VDI guidelines and DIN standards (Table 5-1). Continuous measurement is primarily used for dust, NO_x , SO_2 as well as more and more Hg, NH_3 and total organic carbon (TOC), while the remaining parameters relevant to ambient pollution legislation are usually determined discontinuously by individual measurements.

The measurement results [3] presented in this chapter are based on the emission measurements at the rotary kiln plants of the German cement industry required by law. The emissions measured continuously were converted to annual averages. In the case of emissions measured discontinuously, the values are derived from the respective individual measurements. All measured values relate to 1 m^3 of dry gas under standard conditions with an oxygen content of 10 %.

In some of the figures the ranges for detection limits are marked in grey to facilitate assessment. Detection limits depend on sampling,

Tabelle 5-1 Messverfahren für Emissionen.

Table 5-1 Emission measuring methods.

Messobjekt / Object of measurement	Norm, Richtlinie / Standard, guideline
Gesamtstaub / Total dust	DIN EN 13284-1
Schwermetalle / Heavy metals	DIN EN 13211, 14385
Schwefeldioxid / Sulphur dioxide	DIN EN 14791
Stickstoffoxide / Nitrogen oxides	DIN EN 14792
Kohlenstoffmonoxid / Carbon monoxide	DIN EN 15058
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds	DIN EN 1911, Teil 1 - 3
Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds	VDI 2470, Blatt 1
Dioxine, Furane / Dioxins, furans	
- Probenahme / Sampling	DIN EN 1948, Teil 1
- Analyse / Analysis	DIN EN 1948, Teil 2 - 3
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / Polycyclic aromatic hydrocarbons	DIN EN 1948 Teil 1 VDI 3873, Blatt 1
Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls	DIN EN 1948, Teil 4
Organisch gebundener Kohlenstoff / Total gaseous organic carbon	DIN EN 12619
Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene	DIN EN 13649

In einigen Bildern sind als Beurteilungshilfe Bereiche für Nachweisgrenzen grau hinterlegt. Nachweisgrenzen sind von Probenahme, Probeaufbereitung und Analyseverfahren abhängig und somit nicht für alle Messverfahren bzw. -komponenten gleich. Die in den Diagrammen angegebenen Bereiche wurden u. a. in Anlehnung an Verfahrenskenngrößen der jeweiligen Fachnormen bestimmt. Zwar werden in Messberichten zum Teil auch deutlich niedrigere Nachweisgrenzen genannt; sie beziehen sich dann jedoch im Allgemeinen nur auf den analytischen Teil des Prüfverfahrens.

In zunehmendem Maße bestimmt die Europäische Union die Umweltpolitik. So trat am 28. Juli 2001 die Entscheidung 2000/479/EG der Kommission über den Aufbau eines europäischen Schadstoffemissionsregisters (EPER: European Pollutant Emission Register) in Kraft. Die ersten Berichte der Mitgliedstaaten mit dem Referenzjahr 2001 mussten bis Juni 2003 an die Kommission übermittelt werden. In Deutschland wurden hierzu die Emissionserklärungen des Jahres 2000 herangezogen. Im Jahr 2007 wurde das EPER-System von dem noch umfassenderen PRTR-System (PRTR: Pollutant Release and Transfer Register) abgelöst. Darin sind 26 Luftschadstoffe als für die Zementindustrie relevant gekennzeichnet.

Das Register umfasst die Emissionsdaten von etwa 20.000 Industrieanlagen in der Europäischen Union. Die Daten werden anlagenspezifisch erhoben, nicht anonymisiert und regelmäßig im Internet veröffentlicht, wenn die festgelegten Schwellenwerte überschritten werden. Hiervon sind auch sämtliche europäischen Zementwerke mit einer Leistung von mehr als 500 Tonnen Klinker pro Tag betroffen.

sample preparation and analysis methods and are thus not identical for all measurements methods and components. The ranges indicated in the charts were determined, among other things, applying the performance characteristics given in the pertinent technical standards. Although significantly lower detection limits are cited in measurement reports in some cases, these generally refer to the analytical part of the measuring method only.

In the last years, the European Union has increasingly set the course in environmental policy. For example, Commission decision 2000/479/EC instituting European Pollutant Emission Register (EPER) came into force on July 28, 2001. The first reports by member states on the reference year 2001 had to be submitted to the Commission by June 2003. In Germany, these reports have been established on the basis of the emission declarations filed for 2000. In 2007 the EPER system was substituted by the even more complex PRTR system (PRTR: Pollutant Release and Transfer Register). Therein, 26 air pollutants are listed as relevant for the cement industry.

The register is to comprise the emission data emitted by about 20,000 industrial plants in the European Union. The data will be compiled specifically for each plant and published on the internet regularly, with the plant name being quoted if the threshold values are exceeded. This compilation also covers all European cement plants having an output of more than 500 t clinker per day.

The figures supplied for the register refer to quantities emitted, i.e. the quantity of a certain substance that an industrial plant emits annually (kg/year). In order to record significant sources only, emissions below certain threshold values (Table 5-2) need not be indicated.

Tabelle 5-2 Schwellenwerte zur Berichtspflicht für 19 relevante Luftschadstoffe des europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters
Table 5-2 Threshold values for mandatory reporting on 19 relevant air pollutants covered by the European Pollutant Release and Transfer Register

Abgaskomponente / Pollutant	Schwellenwert / Threshold value kg/Jahr / kg/year
Kohlenstoffmonoxid (CO) / Carbon monoxide (CO)	500.000
Kohlenstoffdioxid (CO ₂) / Carbon dioxide (CO ₂)	100.000.000
Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) / Non-methane volatile organic compounds (NMVOC)	100.000
Stickstoffoxide (NO _x) / Nitrogen oxides (NO _x)	100.000
Schwefeloxide (SO _x / SO ₂) / Sulphur oxides (SO _x / SO ₂)	150.000
Arsen (As) / Arsenic (As)	20
Cadmium (Cd) / Cadmium (Cd)	10
Chrom (Cr) / Chromium (Cr)	100
Kupfer (Cu) / Copper (Cu)	100
Quecksilber (Hg) / Mercury (Hg)	10
Nickel (Ni) / Nickel (Ni)	50
Blei (Pb) / Lead (Pb)	200
Zink (Zn) / Zinc (Zn)	200
Dioxine und Furane (PCDD/F) / Dioxins and furans (PCDD/F)	0,001
Benzol / Benzene	1.000
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) / Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	50
Chlor und anorganische Chlorverbindungen (HCl) / Chlorine and inorganic chlorine compounds (HCl)	10.000
Fluor und anorganische Fluorverbindungen (HF) / Fluorine and inorganic fluorine compounds (HF)	5.000
Feinstaub (PM ₁₀) / Particulate matter (PM ₁₀)	50.000

Die Angaben für das Register beziehen sich auf Frachten, d. h. auf die von einer Betriebsstätte in einem Jahr emittierte Menge eines Stoffs (kg/Jahr). Um ausschließlich signifikante Quellen zu erfassen, sind Emissionen unterhalb bestimmter Schwellenwerte (Tabelle 5-2) nicht anzugeben.

Im Folgenden wird zusätzlich zur mittleren Konzentration eines Schadstoffs im Reingas der Drehofenanlagen in einem weiteren Bild auch die hiermit verbundene Emissionsfracht aufgeführt. Sie errechnet sich aus dem in einem Jahr emittierten Reingasvolumenstrom (m^3/Jahr) und der Konzentration des darin enthaltenen Stoffs (g/m^3). Wenn der Stoff im Reingas bestimmbar war, sind eindeutige Angaben möglich, deren Genauigkeit z. B. durch die Messunsicherheit beschrieben werden kann. Ist dies jedoch nicht der Fall (z. B. nicht abgesicherte Werte oder Messungen unterhalb der Nachweisgrenze), kann lediglich eine theoretische Obergrenze für die emittierte Fracht angegeben werden. Sie errechnet sich unter der Annahme, dass die Konzentration des Stoffs im Reingas die Nachweisgrenze erreicht. Die tatsächlich emittierte Fracht ist jedoch niedriger und der Bereich der möglichen Werte wird in den Bildern mit Hilfe einer Linie dargestellt.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass die Emissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie die Schwellenwerte für eine Berichtspflicht gemäß PRTR z. T. deutlich unterschreiten.

5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid (CO_2)

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Zum weit überwiegenden Teil ist dies CO_2 . Andere klimarelevante Gase, wie z. B. Distickstoffmonoxid (N_2O) oder Methan (CH_4), werden nur in sehr geringem Maße emittiert. CO_2 -Emissionen sind sowohl rohstoff- als auch energiebedingt. Rohstoffbedingte CO_2 -Emissionen entstehen bei der Entsäuerung des Kalksteins und haben einen Anteil von etwa 60 % an den CO_2 -Gesamtemissionen.

In the following, the average concentration of a pollutant in the clean gas of rotary kiln systems is supplemented by the associated emission quantity, which is presented in an additional figure. It is calculated on the basis of the clean gas volume flow emitted per year (m^3/year) and the pollutant concentration it contains (g/m^3). If the pollutant is detectable in the clean gas, it is possible to supply definite figures, the accuracy of which can be described by the measuring uncertainty, for example. If, however, this is not the case (e.g. values not secured or measurements below the detection limit), only a theoretical upper limit for the emissions released can be indicated. It is calculated on the basis of the assumption that the pollutant concentration in the clean gas reaches the detection limit. The quantity actually emitted, however, is lower. In the figures, the range of possible values is represented by a broken line.

Evaluation of the measurement results shows that emissions from rotary kiln plants in the cement industry undershoot the thresholds for mandatory reporting pursuant to PRTR, in some cases even significantly so.

5.1 Greenhouse gases / carbon dioxide (CO_2)

During the clinker burning process greenhouse gases are emitted. CO_2 accounts for the main share of these gases. Other greenhouse gases, such as dinitrogen monoxide (N_2O) or methane (CH_4), are emitted in very small quantities only.

CO_2 emissions are both raw material-related and energy-related. Raw material-related emissions are produced during limestone decarbonation (CaCO_3) and account for about 60 % of total CO_2 emissions. Energy-related emissions are generated both directly through fuel combustion and indirectly through the use of electrical power. Table 5-3 lists the proportions of CO_2 emissions accordingly.

Tabelle 5-3 CO_2 -Emissionen der Zementindustrie. / **Table 5-3** CO_2 emissions by the cement industry.

Spezifische CO_2 -Emissionen in t CO_2 /t Zement / Specific CO_2 emissions in t CO_2 /t Zement					
Jahr / Year	Thermisch bedingt ¹⁾ / Thermal energy-related ¹⁾	Elektrisch bedingt / Electrical energy-related	Rohstoff-bedingt / Raw-material-related	Summe / Total	Veränderung in % / Rate of change in %
1998	0,218	0,070	0,444	0,732	-2,9
1999	0,199	0,068	0,427	0,694	-5,2
2000	0,195	0,068	0,431	0,694	0,0
2001	0,179	0,067	0,415	0,661	-4,8
2002	0,168	0,069	0,413	0,650	-1,7
2003	0,156	0,067	0,401	0,624	-4,0
2004	0,155	0,068	0,428	0,651	4,3
2005	0,132	0,068	0,406	0,606	-6,9
2006	0,123	0,067	0,383	0,573	-5,4
2007	0,128	0,067	0,419	0,614	7,2
2008	0,117	0,066	0,388	0,571	-4,3
2009	0,110	0,068	0,398	0,575	0,7
2010	0,104	0,074	0,398	0,575	0,0
2011	0,100	0,073	0,383	0,556	-1,9
2012	0,103	0,074	0,398	0,576	3,6
2013	0,099	0,074	0,387	0,559	-3,0
2014	0,096	0,074	0,390	0,560	0,2

¹⁾ nur Regelbrennstoffe / only regular fuels

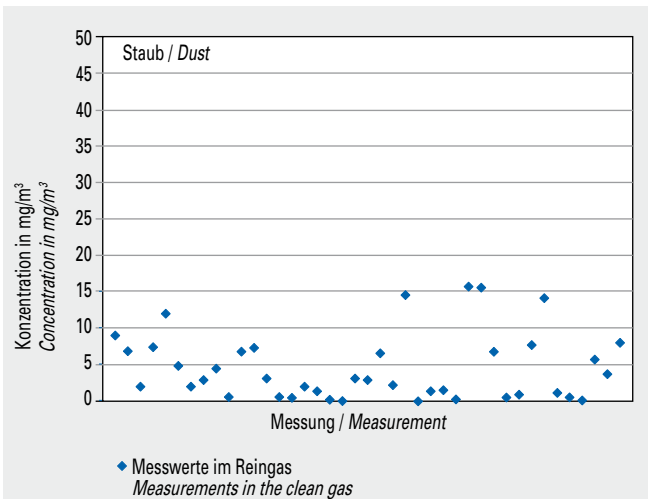


Bild 5-1 Mittelwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Staub im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

Fig. 5-1 Average (year 2014) dust concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns.

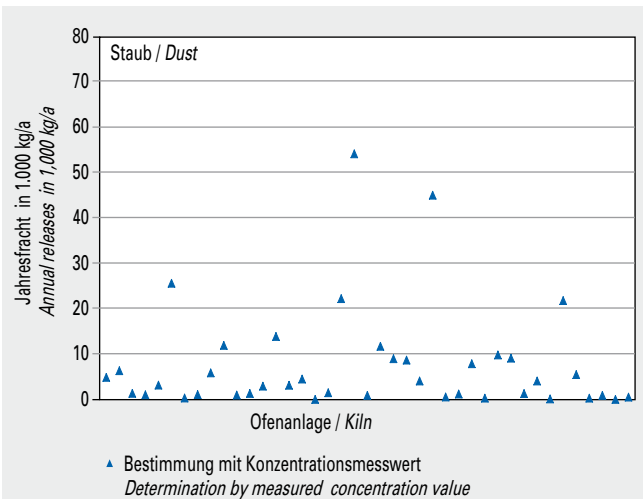


Bild 5-2 Emissionen von Staub (Jahresfracht 2014) von 41 Drehofenanlagen.

Fig. 5-2 Dust emissions (annual releases in 2014) of 41 rotary kilns.

Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Tabelle 5-3 werden die CO_2 -Emissionen diesen Anteilen entsprechend aufgeführt.

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie verpflichtet, ihren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und den spezifischen Brennstoffenergiebedarf von 1987 bis 2005 um 20 % zu senken. Diese Verpflichtung wurde weiterentwickelt und sieht seit dem 9. November 2000 eine 28%ige Minderung der energiebedingten spezifischen CO_2 -Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2008/2012 vor. Die deutsche Zementindustrie hatte ihr Ziel im Jahr 2012 erfüllt.

Am 01.01.2005 wurde in der EU ein Handelssystem für CO_2 -Emissionen eingeführt. Der Emissionshandel erstreckt sich auf die direkten CO_2 -Emissionen aus der Verbrennung aller Brennstoffe (ohne biogene Anteile) und der Entsäuerung des Kalksteins. Die Selbstverpflichtung der Zementindustrie umfasste dagegen auch indirekte Emissionen aus dem elektrischen Energieverbrauch. Die CO_2 -Emissionen aus alternativen Brennstoffen wurden hierbei nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe ersetzen und somit zu einer CO_2 -Minderung an anderer Stelle führen. Da sich der Emissionshandel weiterhin nur auf den Klinkerbrennprozess bezieht, die Selbstverpflichtung aber auf die gesamte Zementherstellung, ergeben sich unterschiedliche Emissionsmengen in den entsprechenden Berichtssystemen.

5.2 Staub

Für die Erzeugung von 1 Tonne Portlandzement müssen während der Produktion ca. 1,5 bis 1,7 Tonnen Rohmaterialien, bis zu 0,15 Tonnen Kohle sowie 0,95 Tonnen Klinker staubfein gemahlen werden. Wesentliche Emissionsquellen für die staubförmigen Komponenten liegen dabei in den Bereichen der Aufbereitung des Rohmaterials und der Brennstoffe, des Klinkerbrennprozesses sowie der Zementmahlung. Während es in den 1950er-Jahren am Kamin von Drehofenanlagen noch zu Staubemissionen von bis zu $3.000 \text{ mg}/\text{m}^3$ kam, können diese heute auf $10\text{--}20 \text{ mg}/\text{m}^3$ begrenzt werden. Bild 5-1 zeigt Mittelwerte der Konzentration von Staub aus Messungen im Reingas von 41 Drehofenanlagen. Bild 5-2 zeigt die Emissionen (Jahresfracht) von Staub von 41 Drehofenanlagen.

In the year 1995, the German cement industry committed itself to make its contribution to global warming prevention and lower its specific fuel energy demand by 20 % between 1987 and 2005. This commitment has been updated into a negotiated agreement and, since November 9, 2000, has provided for a 28 % reduction in energy-related specific CO_2 emissions from 1990 to 2008/2012. 2012, the German cement industry had achieved this target.

On January 1, 2005 a trading system for CO_2 emissions was introduced in the EU. Direct CO_2 emissions from the combustion of all fuels (without biogenous compounds) and decarbonation of limestone are covered by this trading system. In contrast the negotiated agreement of the cement industry also contained emissions deriving from the electrical energy demand. CO_2 emissions from the combustion of alternative fuels have not been taken into account, because they substitute fossil fuels and thereby reduce CO_2 emissions elsewhere. Since the emissions trading scheme further on refers only to the clinker burning process, but the agreement to the whole cement production, different emission values occur in the corresponding reporting systems.

5.2 Dust

To manufacture 1 t of Portland cement, about 1.5 to 1.7 t raw materials, up to 0.15 t coal and 0.95 t clinker must be ground to dust fineness during production. In this process, the steps of raw material preparatory processing, fuel preparation, clinker burning and cement grinding constitute major emission sources for particulate components. While particulate emissions of up to $3,000 \text{ mg}/\text{m}^3$ were measured at the stack of cement rotary kiln plants as recently as in the 1950ies, these can be limited to $10\text{--}20 \text{ mg}/\text{m}^3$ today.

Figure 5-1 shows average values of dust concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns. Figure 5-2 shows the dust emissions (annual releases) of 41 rotary kilns.

5.3 Stickstoffoxide (NO_x)

Der Klinkerbrennprozess ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem Stickstoffoxide (NO_x) entstehen. Im Abgas von Drehofenanlagen liegen sie zu einem Anteil von etwa 95 % in Form von Stickstoffmonoxid (NO) und zu etwa 5 % als Stickstoffdioxid (NO₂) vor. Da NO in der Atmosphäre weitgehend zu NO₂ umgewandelt wird, werden die Emissionen als NO₂ pro m³ Abgas angegeben.

Die prozessbedingten NO_x-Gehalte im Abgas von Drehofenanlagen würden ohne Minderungsmaßnahmen in den meisten Fällen die heute gültige Vorgabe der europäischen Industrieemissionsrichtlinie von 0,50 g/m³ deutlich übersteigen.

Primäre Minderungsmaßnahmen betreffen eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Darüber hinaus wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um auf verschiedene Weise die anspruchsvollen NO_x-Grenzwerte einhalten zu können. In 2014 wurden zehn Anlagen mit gestufter Verbrennung und 38 Anlagen mit SNCR-Verfahren betrieben. Weiterhin sind zwei Anlagen mit SCR-Technologie in Betrieb.

Um das Rohstoffgemisch in Portlandzementklinker umzuwandeln, sind hohe Prozesstemperaturen erforderlich. In der Sinterzone des Drehofens betragen die Brennguttemperaturen etwa 1.450 °C. Um sie zu erreichen, sind Flammentemperaturen von ca. 2.000 °C erforderlich.

Aus Gründen der Klinkerqualität findet der Brennvorgang unter oxidierenden Bedingungen statt. Unter diesen Voraussetzungen überwiegt die partielle Oxidation des molekularen Stickstoffs der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid, die auch als thermische NO-Bildung bezeichnet wird.

Die thermische NO-Bildung ist bei den niedrigeren Temperaturen in einer Ofeneinlauf- oder Calcinatorfeuerung hingegen kaum von Bedeutung: Hier kann der im Brennstoff gebundene Stickstoff zum so genannten brennstoffbedingten NO führen.

Bild 5-3 zeigt Mittelwerte der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO_x) aus Messungen im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

Bild 5-4 zeigt die Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) von 41 Drehofenanlagen (Jahresfracht).

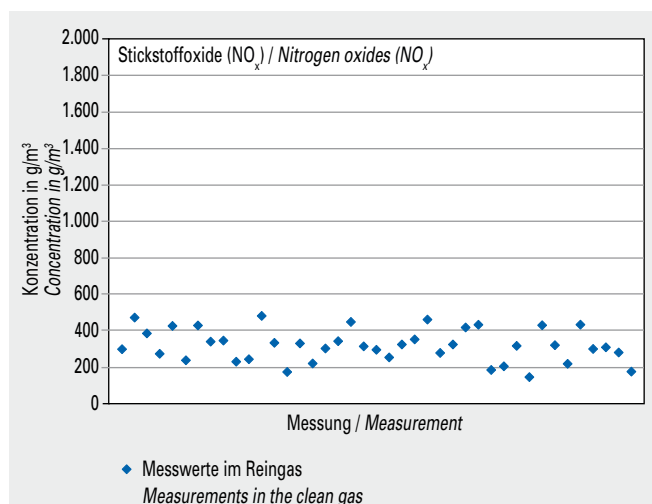


Bild 5-3 Mittelwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO_x) im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

Fig. 5-3 Average nitrogen oxides (NO_x) concentrations (year 2014) in the clean gas of 41 rotary kilns.

5.3 Nitrogen oxides (NO_x)

The clinker burning process is a high-temperature process resulting in the formation of nitrogen oxides (NO_x). Nitrogen monoxide (NO) accounts for about 95 %, and nitrogen dioxide (NO₂) for about 5 % of this compound present in the exhaust gas of rotary kiln plants. As most of the NO is converted to NO₂ in the atmosphere, emissions are given as NO₂ per m³ exhaust gas.

Without reduction measures, process-related NO_x contents in the exhaust gas of rotary kiln plants would considerably exceed the current specifications of the European Industry Emissions Directive of 0.50 g/m³.

Primary reduction measures are aimed at smoothing and optimising plant operation. Furthermore, considerable efforts were made to achieve compliance with the demanding NO_x values in different ways. In 2014, ten plants were equipped with staged combustion, and the SNCR technique was applied at about 38 plants. Furthermore two plants with SCR technology are in operation.

High process temperatures are required to convert the raw material mix to Portland cement clinker. Kiln charge temperatures in the sintering zone of rotary kilns range at around 1.450 °C. To reach these flame temperatures about 2.000 °C are necessary.

For reasons of clinker quality the burning process takes place under oxidising conditions under which the partial oxidation of the molecular nitrogen in the combustion air resulting in the formation of nitrogen monoxide dominates. This reaction is also called thermal NO formation.

At the lower temperatures prevailing in a kiln inlet or calciner firing unit, however, thermal NO formation is negligible: here the nitrogen bound in the fuel can result in the formation of what is known as fuel-related NO.

Figure 5-3 shows average values of nitrogen oxides (NO_x) concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns.

Figure 5-4 shows the nitrogen oxides NO_x emissions (annual releases) of 41 rotary kilns

5.4 Sulphur dioxide (SO₂)

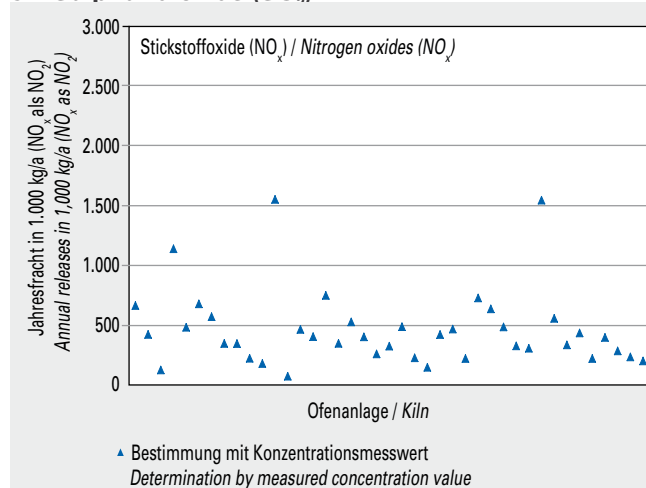


Bild 5-4 Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) von 41 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-4 Nitrogen oxides NO_x emissions (annual releases in 2014) of 41 rotary kilns.

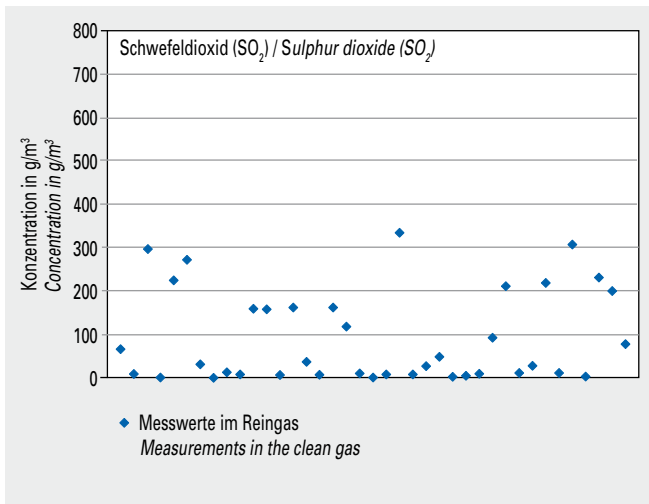


Bild 5-5 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Schwefeldioxid (SO_2) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.

Fig. 5-5 Sulphur dioxide (SO_2) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

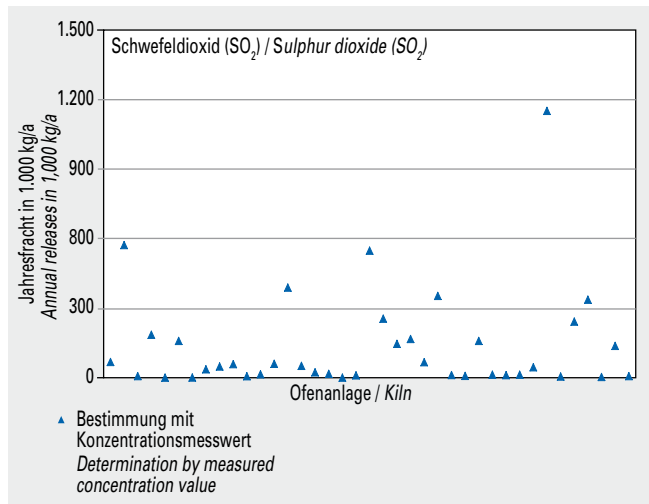


Bild 5-6 Emissionen von Schwefeldioxid (SO_2) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-6 Sulphur dioxide (SO_2) emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns.

5.4 Schwefeldioxid (SO_2)

Schwefel wird dem Klinkerprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen. Ursache für höhere SO_2 -Emissionen von den Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370 °C und ca. 420 °C zu SO_2 oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor. Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die SO_2 -Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu 1,2 g/m³ betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO_2 -Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11 Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der SO_2 -Emissionen eingesetzt.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung im Drehofen vollständig zu SO_2 umgewandelt. Dieses SO_2 reagiert im Vorwärmer- und Ofenbereich zu Alkalisulfaten, die überwiegend im Klinker gebunden werden.

Bild 5-5 zeigt 39 Jahresmittelwerte aus kontinuierlicher Überwachung an 39 Ofenanlagen.

Bild 5-6 zeigt die SO_2 -Emissionen (Jahresfracht 2014) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 2 mg/m³ berechnet wurde.

Sulphur is fed into the clinker burning process via raw materials and fuels. Depending on their respective deposits, the raw material so may contain sulphur bound as sulphide or sulphate. Higher SO_2 emissions by rotary kiln systems of the cement industry might be attributable to the sulphides contained in the raw material, which become oxidised to form SO_2 at temperatures between 370 °C and 420 °C prevailing during the kiln feed preheating process. Most of the sulphides are pyrite or marcasite contained in the raw materials. Given the sulphide concentrations found in German raw material deposits, SO_2 emission concentrations can total up to 1.2 g/m³ depending on the site location. The cement industry has made great efforts to reduce SO_2 emissions. For example, lime hydrate is utilised at 11 kiln systems to lower SO_2 emissions.

The sulphur input with the fuels is completely converted to SO_2 during combustion in the rotary kiln. In the area of the preheater and the kiln, this SO_2 reacts to form alkali sulphates, which are predominantly bound in the clinker.

Figure 5-5 shows 39 annual average values from continuous monitoring at 39 rotary kilns.

Figure 5-6 shows the SO_2 emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 2 mg/m³.

5.5 Carbon monoxide (CO) and total organic carbon

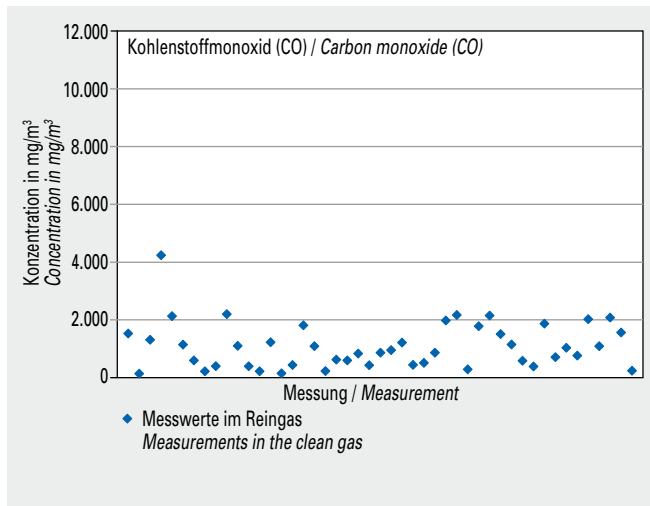


Bild 5-7 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid (CO) im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

Fig. 5-7 Carbon monoxide (CO) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 34 rotary kilns.

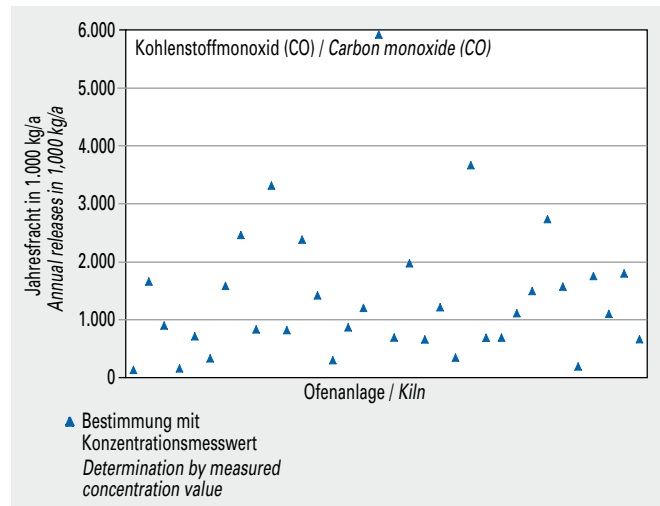


Bild 5-8 Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO) von 34 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-8 Carbon monoxide (CO) emissions (annual releases in 2014) of 34 rotary kilns.

5.5 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC)

Die Abgaskonzentrationen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff sind bei Energieumwandlungsanlagen, wie z.B. Kraftwerken, ein Maß für den Ausbrand der eingesetzten Brennstoffe. Der Klinkerbrennprozess ist dagegen ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Gründen der Klinkerqualität stets mit Luftüberschuss betrieben werden muss. In Verbindung mit den langen Verweilzeiten bei hohen Temperaturen führt dieses praktisch zu einem vollständigen Brennstoffausbrand. Die thermische Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer führt zu den entsprechenden rohmaterialbedingten Emissionen an Kohlenstoffmonoxid und organischem Gesamtkohlenstoff.

Ursache der Emissionen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff beim Klinkerbrennprozess sind vor allem die mit den natürlichen Rohstoffen in geringen Mengen zugeführten organischen Bestandteile (Überreste von Organismen und Pflanzen, die im Laufe der Erdgeschichte im Gestein eingebaut wurden). Sie werden beim Vorwärmen des Brennguts umgesetzt und weitgehend zu CO und CO₂ oxidiert. Ein sehr geringer verbleibender Anteil organischer Spurengase (organischer Gesamtkohlenstoff) wird emittiert. Der im Reingas vorliegende Gehalt an CO und organischen Spurengasen lässt beim Klinkerbrennprozess somit keinen Rückschluss auf die Verbrennungsbedingungen zu.

Bild 5-7 zeigt 47 Werte aus Messungen im Reingas von 34 Ofenanlagen. Bild 5-8 zeigt die CO-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 34 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 1,8 mg/m³ berechnet wurde.

Bild 5-9 zeigt 59 Werte aus Messungen im Reingas von 33 Ofenanlagen. Bild 5-10 zeigt die Emissionen von organischem Gesamtkohlenstoff (Jahresfracht 2014) von 33 Drehofenanlagen. Der Bereich möglicher Emissionen ist in diesen Fällen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 1,5 mg/m³ berechnet wurde.

(TOC)

The exhaust gas concentrations of CO and organically bound carbon are a yardstick for the burn-out rate of the fuels utilised in energy conversion plants, such as power stations. By contrast, the clinker burning process is a material conversion process that must always be operated with excess air for reasons of clinker quality. In conjunction with long residence times in the high temperature range this practically leads to a complete fuel burn-out. The thermal decomposition of organic material in the preheater leads to the corresponding emissions of carbon monoxide and total carbon.

The emissions of CO and organically bound carbon during the clinker burning process are caused by the small quantities of organic constituents input via the natural raw materials (remnants of organisms and plants incorporated in the rock in the course of geological history). These are converted during kiln feed preheating and become oxidised to form CO and CO₂. In this process, small portions of organic trace gases (total organic carbon) are formed as well. In case of the clinker burning process, the content of CO and organic trace gases in the clean gas therefore does not permit any conclusions on combustion conditions.

Figure 5-7 shows 47 values from measurements in the clean gas at 34 rotary kilns. Figure 5-8 shows the CO emissions (annual releases in 2014) of 34 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 1.8 mg/m³.

Figure 5-9 shows 59 values from measurements in the clean gas at 33 rotary kilns. Figure 5-10 shows the total organic carbon emissions (annual releases in 2014) of 33 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 1.5 mg/m³.

5.6 Dioxins and furans (PCDD/F)

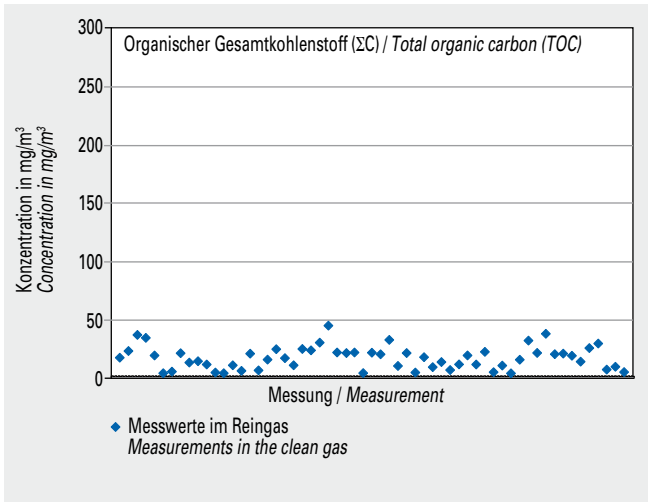


Bild 5-9 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von organischem Gesamtkohlenstoff (ΣC) im Reingas von 33 Drehofenanlagen.
Fig. 5-9 Total organic carbon (TOC) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 33 rotary kilns.

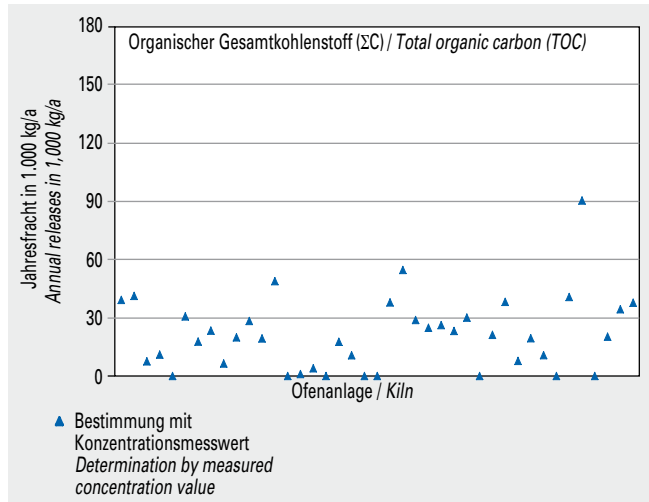


Bild 5-10 Emissionen von organischem Gesamtkohlenstoff (ΣC) von 33 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-10 Total organic carbon (TOC) emissions (annual releases in 2014) of 33 rotary kilns.

5.6 Dioxine und Furane (PCDD/F)

Drehofenanlagen der Zementindustrie unterscheiden sich von klassischen Feuerungsanlagen in erster Linie durch die Verbrennungsbedingungen beim Klinkerbrennen. Brenngut und Drehofenabgase werden im Gegenstrom geführt und intensiv durchmischt. Temperaturverlauf und Gasverweilzeit in Drehöfen bieten daher besonders günstige Bedingungen, um organische Verbindungen, die über Brennstoffe eingetragen werden oder daraus entstehen, vollständig zu zerstören.

Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (kurz: Dioxine und Furane) liegen deshalb in Abgasen von Drehöfen der Zementindustrie nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Untersuchungen haben gezeigt, dass ihre Emissionen unabhängig von der Art der Einsatzstoffe sind und durch verfahrenstechnische Maßnahmen nicht beeinflusst werden können.

Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Nachweisgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Labora-

Rotary kilns of the cement industry and classic combustion plants mainly differ in terms of the combustion conditions prevailing during clinker burning. Kiln feed and rotary kiln exhaust gases are conveyed in counter-flow and mixed thoroughly. Thus, temperature distribution and residence time in rotary kilns afford particularly favourable conditions for organic compounds, introduced either via fuels or derived from them, to be completely destroyed. For that reason, only very low concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (in short: dioxins and furans) can be found in the exhaust gas from cement rotary kilns. Investigations have shown that their emissions are independent of the type of input materials used and cannot be influenced by process technology measures.

Note: No detection limit can be deduced from the standard. To evaluate the measurement results, interlaboratory variation of the method (comparison between different laboratories) can be referred to. Pursuant to DIN EN 1948 it amounts to ± 0.05 ng ITEQ/m³ (ITEQ: international toxicity equivalent).

Figure 5-11 shows 109 values from measurements in the clean gas

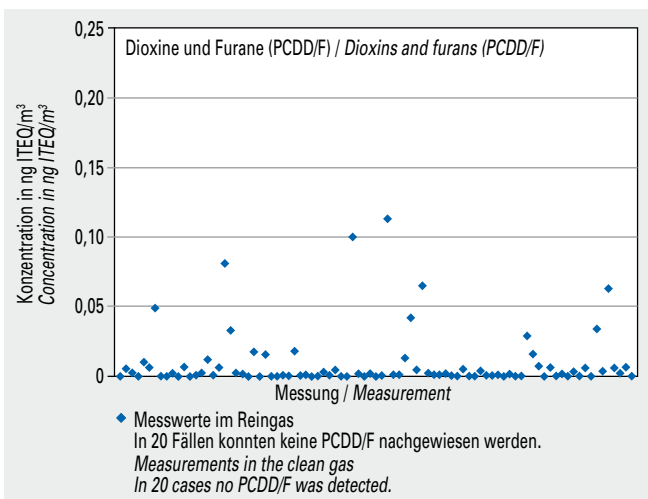


Bild 5-11 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.
Fig. 5-11 Dioxin and furan (PCDD/F) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

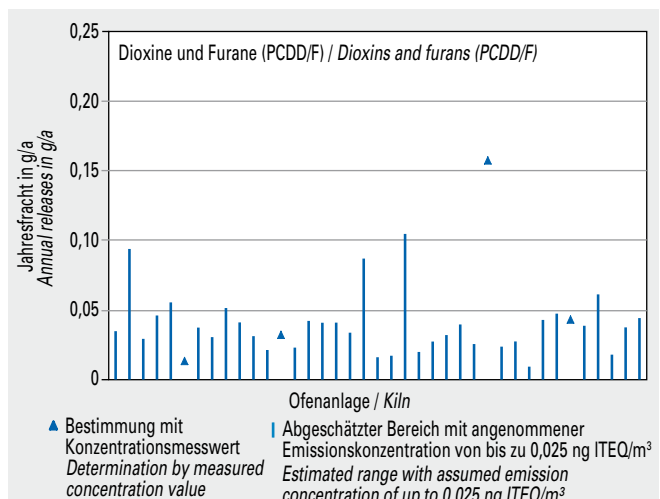
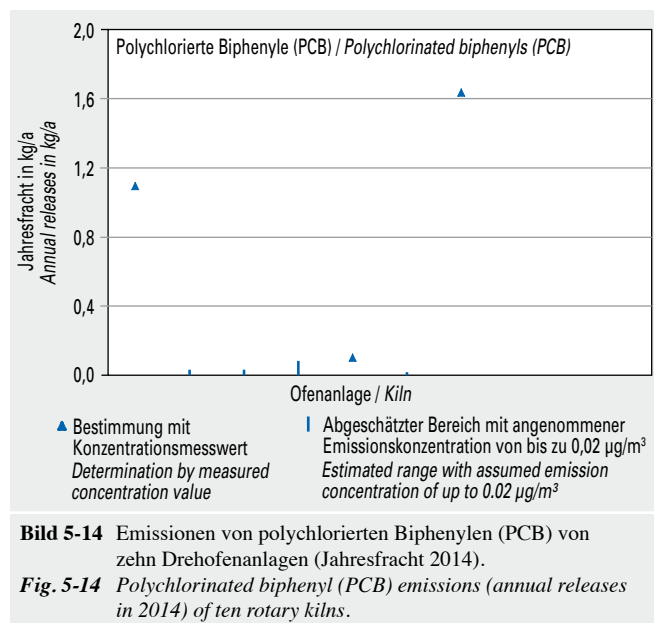
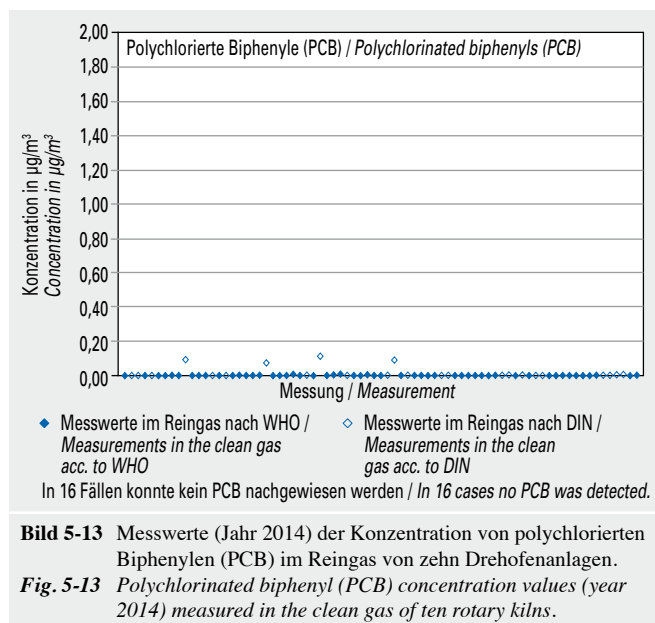


Bild 5-12 Emissionen von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-12 Dioxin and furan emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns.



torien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948 $\pm 0,05$ ng ITEQ/m³ (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent).

Im Bild 5-11 sind 109 Messwerte aus 2014 im Reingas von 39 Ofenanlagen dargestellt. In 20 Fällen konnte kein PCDF/F nachgewiesen werden.

Bild 5-12 zeigt die Dioxin- und Furan-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen im Bereich der externen Streuung des Verfahrens wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,025 ng ITEQ/m³ berechnet wurde.

5.7 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Das Emissionsverhalten der PCB ist mit dem der Dioxine und Furane vergleichbar. PCB können mit alternativen Roh- und Brennstoffen in den Prozess gelangen. In Drehofenanlagen der Zementindustrie ist eine praktisch vollständige Zerstörung dieser Spurenkomponenten gewährleistet.

Bild 5-13 zeigt 93 Werte aus Messungen im Reingas von 23 Ofenanlagen, 24 Werte nach DIN, 69 Werte nach WHO. In 16 Fällen konnten keine PCB nachgewiesen werden. Dabei ist zu beachten, dass es für die Messung von PCB im Reingas von Drehofenanlagen keine genormte Prüfvorschrift gibt, in der Verfahrenskenngrößen des eingesetzten Messverfahrens genannt werden. Deshalb wird hier auf die Angabe einer Nachweisgrenze verzichtet. Bei den derzeit eingesetzten Verfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,02 µg/m³ nicht abgesichert.

Bild 5-14 zeigt die PCB-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 23 Drehofenanlagen. Bei nicht abgesicherten Messungen kann die Fracht nur abgeschätzt werden. Der Bereich möglicher Emissionen ist in diesen Fällen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,02 µg/m³ berechnet wurde.

at 39 rotary kilns in 2014. In 20 cases no PCDD/F was detected.

Figure 5-12 shows dioxin and furan emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns. If the values measured are within the range of the external deviation of the method, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.025 ng ITEQ/m³.

5.7 Polychlorinated biphenyls (PCB)

The emission behaviour of PCB is comparable to that of dioxins and furans. PCB may be introduced into the process via alternative raw materials and fuels. The rotary kiln systems of the cement industry guarantee a virtually complete destruction of these trace components.

Figure 5-13 shows 93 values from measurements in the clean gas at 23 rotary kilns, 24 values acc. to DIN, 69 values acc. to WHO. In 16 cases no PCB were detected. It has to be considered that no standardized guideline exists for the measurement of PCB in the clean gas of cement kilns, in which process parameters of the used measurement methods is described. Therefore no detection limit can be given. Below 0.02 µg/m³ the measurement methods currently used do not provide secured emission concentrations.

Figure 5-14 shows the PCB emissions (annual releases in 2014) of 23 rotary kilns. If the measurements are not secured, the releases can only be estimated. In these cases, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.02 µg/m³.

5.8 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)

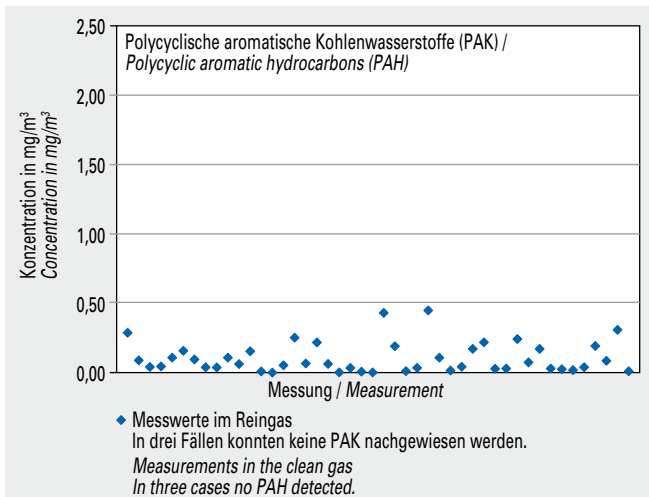


Bild 5-15 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von PAK (nach EPA 610) im Reingas von 16 Drehofenanlagen.

Fig. 5-15 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610) concentration values (year 2014) in the clean gas of 16 rotary kilns.

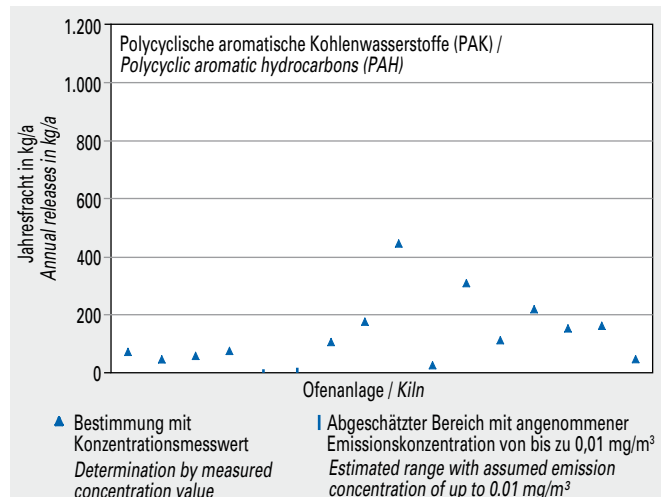


Bild 5-16 Emissionen von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) von 16 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-16 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610) emissions (annual releases in 2014) of 16 rotary kilns.

5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegt im Allgemeinen eine Verteilung der PAK (nach EPA 610) vor, in der Naphthalin mit einem Massenanteil von über 90 % dominiert. In Drehofenanlagen der Zementindustrie ist eine praktisch vollständige Zerstörung der aus den Brennstoffen stammenden PAK gewährleistet. Emissionen entstammen den organischen Bestandteilen im Rohmaterial.

Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten. Bei den derzeit eingesetzten Messverfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,01 mg/m³ nicht abgesichert.

Bild 5-15 zeigt 49 Werte aus Messungen im Reingas von 16 Ofenanlagen. In drei Fällen konnten keine PAK nachgewiesen werden.

Bild 5-16 zeigt die PAK-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 16 Drehofenanlagen. Bei nicht abgesicherten Messungen wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,01 mg/m³ berechnet wurde.

5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegen die oben genannten Verbindungen im Allgemeinen in einer charakteristischen Verteilung vor. BTEX entstehen bei der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer. Sie sind zu etwa 10 % an den Gesamtkohlenstoffemissionen beteiligt.

Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten. Bei den eingesetzten Messverfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,013 mg/m³ nicht abgesichert.

In 2014 wurden 40 Werte aus Messungen im Reingas von elf Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-17).

Bild 5-18 zeigt die BTEX-Emissionen (Jahresfracht 2014) von elf Drehofenanlagen.

PAHs (according to EPA 610) in the exhaust gas of rotary kilns usually appear at a distribution dominated by naphthalene, which accounts for a share of more than 90 % by mass. The rotary kiln systems of the cement industry guarantee a virtually complete destruction of the PAHs input via fuels. Emissions are caused by organic constituents in the raw material.

No detection limit can be deduced from the standard. Below 0.01 mg/m³ the measuring methods currently used do not provide secured emission concentrations.

Figure 5-15 shows 49 values from measurements in the clean gas at 16 rotary kilns. In three cases no PAH was detected.

Figure 5-16 shows the PAH emissions (annual releases in 2014) of 16 rotary kilns. If the measurements are not secured, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.01 mg/m³.

5.9 Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX)

As a rule the above compounds are present in the exhaust gas of rotary kilns in a characteristic ratio. BTEX is formed during the thermal decomposition of organic raw material constituents in the preheater. They account for about 10 % of total carbon emissions.

No detection limit can be deduced from the standard. Below 0.013 mg/m³ the measuring methods currently used do not provide secured emission concentrations.

Figure 5-17 shows 40 values from measurements in the clean gas at eleven rotary kilns.

Figure 5-18 shows the BTEX emissions (annual releases in 2014) of eleven rotary kilns.

5.10 Benzene

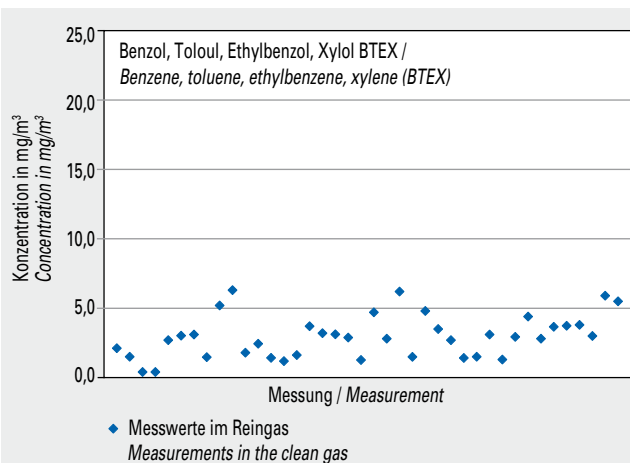


Bild 5-17 Messwerte (2014) der Konzentration von Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) im Reingas von 11 Drehofenanlagen.
Fig. 5-17 Benzene, Toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 11 rotary kilns.

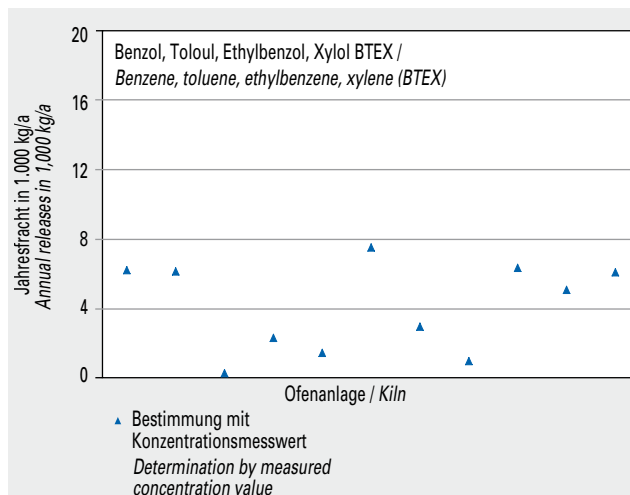


Bild 5-18 Emissionen von Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX) von 11 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-18 Benzene, Toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) emissions (annual releases in 2014) of 11 rotary kilns.

5.10 Benzol

Benzol entsteht bei der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer. Es ist im Allgemeinen zu mehr als der Hälfte an den Emissionen von BTEX beteiligt.

Bild 5-19 zeigt 91 Werte aus Messungen im Reingas von 27 Ofenanlagen. Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten. Bei den derzeit eingesetzten Messverfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,013 mg/m³ nicht abgesichert.

Bild 5-20 zeigt die Benzol-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 27 Drehofenanlagen.

Benzene is produced during the thermal decomposition of organic raw material constituents in the preheater. As a rule, it accounts for more than half of the BTEX emissions.

Figure 5-19 shows 91 values from measurements in the clean gas at 27 rotary kilns. No detection limit can be deduced from the standard. Below 0.013 mg/m³ the measuring methods currently used do not provide secured emission concentrations.

Figure 5-20 shows the benzene emissions (annual releases in 2014) of 27 rotary kilns.

5.11 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)

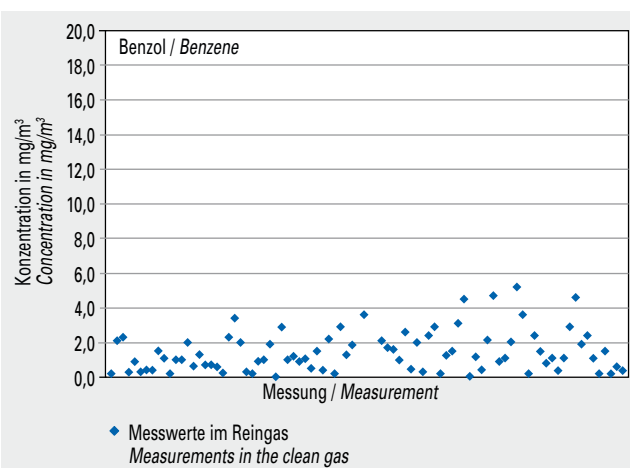


Bild 5-19 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Benzol im Reingas von 27 Drehofenanlagen.
Fig. 5-19 Benzene concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 27 rotary kilns.

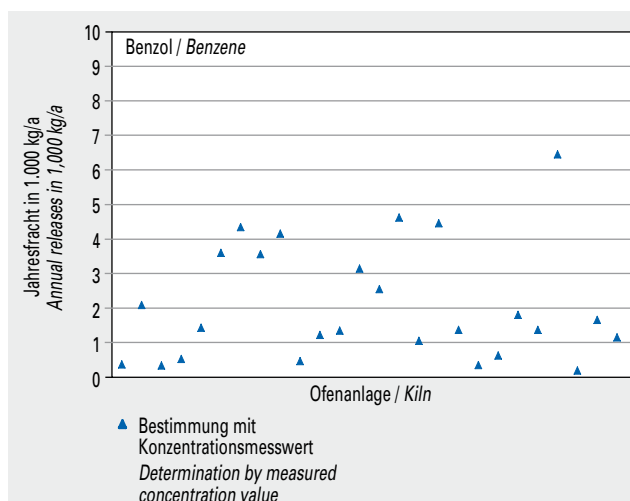


Bild 5-20 Emissionen von Benzol (Jahresfracht 2014) von 27 Drehofenanlagen.
Fig. 5-20 Benzene emissions (annual releases in 2014) of 27 rotary kilns.

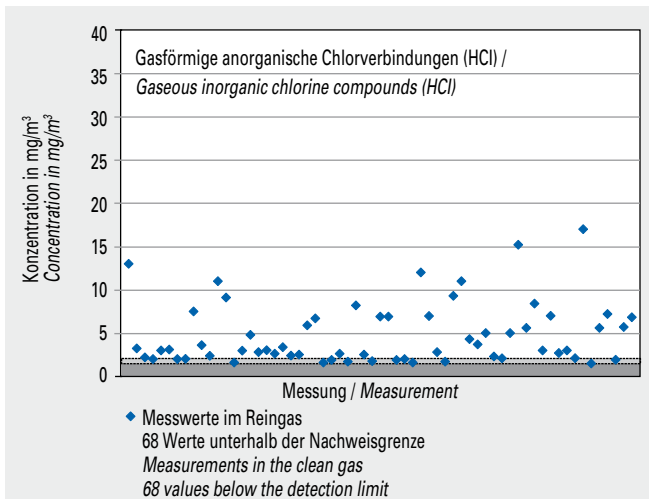


Bild 5-21 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentrationen gasförmiger anorg. Chlorverbindungen (HCl) im Reingas von 40 Drehofenanlagen.
Fig. 5-21 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 40 rotary kilns.

5.11 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl)

Rohmaterialien und Brennstoffe des Klinkerbrennprozesses enthalten als Nebenbestandteile Chloride. Sie werden beim Verfeuern der Brennstoffe oder Erhitzen des Brennguts freigesetzt und reagieren überwiegend mit den Alkalien aus dem Brenngut unter Bildung von Alkalichloriden. Diese zunächst dampfförmig vorliegenden Verbindungen kondensieren bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C am Brenngut bzw. am Ofengasstaub, gelangen anschließend erneut in den Drehofen und verdampfen erneut. Dieser Kreislauf im Bereich zwischen Drehofen und Vorwärmer kann zur Bildung von Ansätzen führen. Über einen Gasabzug am Ofeneinlauf können Alkalichloridkreisläufe wirkungsvoll reduziert und damit Betriebsstörungen vermindert werden. Gasförmige anorganische Chlorverbindungen werden beim Klinkerbrennprozess nicht oder nur in sehr geringen Mengen emittiert. Das Auftreten von Chlorwasserstoff (HCl) im Abgas kann aufgrund der basischen Ofengasatmosphäre weitgehend ausgeschlossen werden. Werden gasförmige anorganische Chloride im Abgas von Drehofenanlagen nachgewiesen, so ist dies im Allgemeinen auf feinste Kornfraktionen von Alkalichloriden im Reingasstaub zurückzuführen. Sie können Messgasfilter passieren und das Vorliegen der gasförmigen Verbindungen vortäuschen.

Bild 5-21 zeigt 131 Werte aus Messungen im Reingas von 40 Ofenanlagen. 68 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 1,5 und 2,1 mg/m³.

Bild 5-22 zeigt die HCl-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 40 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 1,5 mg/m³ berechnet wurde.

5.12 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF)

Fluor liegt in Drehöfen der Zementindustrie zu 90 bis 95 % im Klinker und der Rest in Form des unter den Bedingungen des Brennbetriebs stabilen Calciumfluorids an Staub gebunden vor. Die Emission gasförmiger Fluorverbindungen, insbesondere auch von Fluorwasserstoff, ist wegen des hohen Calciumüberschusses praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das Mess-

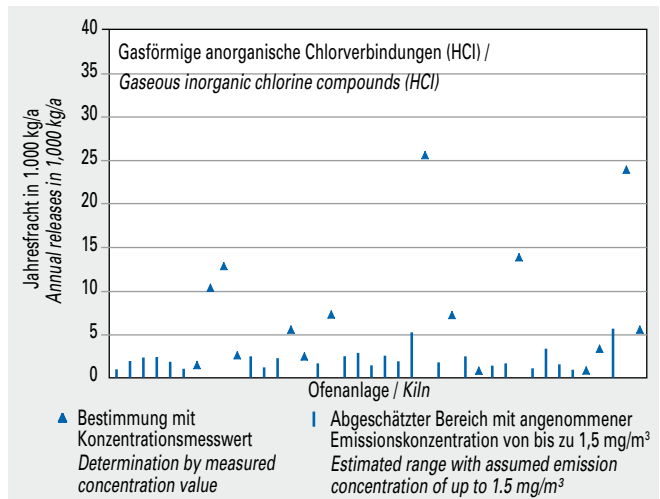


Bild 5-22 Emissionen von gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen (HCl) von 40 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-22 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl) emissions (annual releases in 2014) of 40 rotary kilns.

Chlorides are minor additional constituents contained in the raw materials and fuels of the clinker burning process. They are released when the fuels are burnt or the kiln feed is heated and primarily react with the alkalis from the kiln feed to form alkali chlorides. These compounds, which are initially vaporous, condense on the kiln feed or the kiln dust, respectively, at temperatures between 700 °C and 900 °C, subsequently re-enter the rotary kiln system and evaporate again. This cycle in the area between the rotary kiln and the preheater can result in coating formation. A bypass at the kiln inlet allows to effectively reduce alkali chloride cycles and to thus diminish operational malfunctions. During the clinker burning process gaseous inorganic chlorine compounds are either not emitted at all or only in very small quantities. Owing to the alkaline kiln gas atmosphere, the formation of hydrogen chloride (HCl) in the exhaust gas can be largely ruled out. Gaseous inorganic chlorides detected in the exhaust gas of rotary kiln systems are generally attributable to ultra-fine grain size fractions of alkali chlorides in the clean gas dust. They can pass through measuring gas filters, thus feigning the presence of the gaseous compounds.

Figure 5-21 shows 131 values from measurements in the clean gas at 40 rotary kilns. 68 values were below the detection limit, which ranges between 1.5 and 2.1 mg/m³ depending on the measurement.

Figure 5-22 shows the HCl emissions (annual releases in 2014) of 40 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 1.5 mg/m³.

5.12 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF)

Of the fluorine present in rotary kilns, 90 to 95 % is bound in the clinker and the remainder is bound with dust in the form of calcium fluoride stable under the conditions of the burning process. Owing to the great calcium excess, the emission of gaseous fluorine compounds and of hydrogen fluoride in particular, is virtually excluded. Ultra-fine dust fractions that pass through the measuring gas filter may simulate low contents of gaseous fluorine compounds

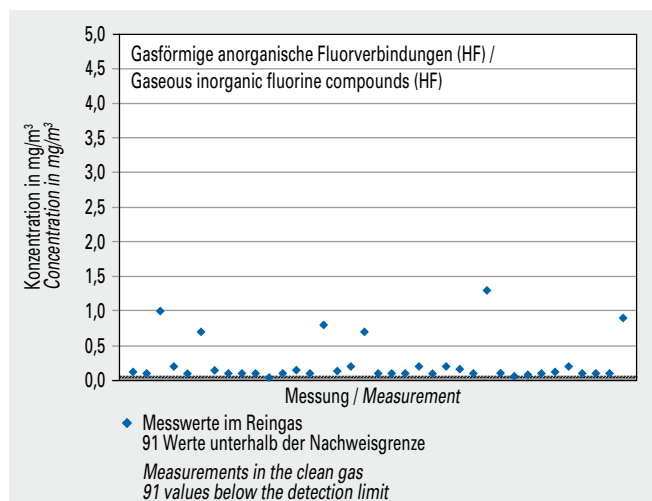


Bild 5-23 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration gasförm. anorg. Fluorverbindungen (HF) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.
Fig. 5-23 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

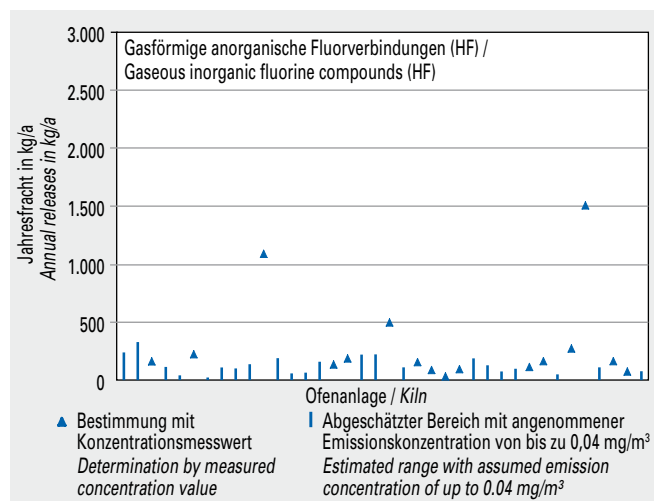


Bild 5-24 Emissionen von gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen (HF) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-24 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

gasfilter passieren, können bei Drehofenanlagen der Zementindustrie geringe Gehalte an gasförmigen Fluorverbindungen vortäuschen.

Bild 5-23 zeigt 128 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen. 91 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen $0,04$ und $0,06 \text{ mg/m}^3$.

Bild 5-24 zeigt die HF-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von $0,04 \text{ mg/m}^3$ berechnet wurde.

5.13 Spurenelemente

Für das Emissionsverhalten der einzelnen Elemente im Klinkerbrennprozess sind die Eintragssituation, das Verhalten in der Anlage sowie der Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtung von Bedeutung. Die mit den Roh- und Brennstoffen dem Brennprozess zugeführten Spurenelemente können in Abhängigkeit von ihrer Flüchtigkeit ganz oder teilweise in den heißen Zonen des Vorwärmers und/oder Drehofens verdampfen, mit den in der Gasphase vorliegenden Bestandteilen reagieren und in den kälteren Bereichen des Ofensystems auf dem Brenngut kondensieren. Je nach Flüchtigkeit und Betriebsbedingungen können sich Kreisläufe ausbilden, die entweder auf Ofen und Vorwärmer beschränkt bleiben oder auch die Mahltrocknungsanlage mit einschließen.

Spurenelemente aus den Brennstoffen gelangen zunächst in die Verbrennungsgase, werden jedoch aufgrund des Rückhaltevermögens von Ofen und Vorwärmer nur in äußerst geringem Maße emittiert. Tabelle 5-4 enthält repräsentative Transferkoeffizienten für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer. Mit ihnen lässt sich berechnen, welcher Anteil der Spurenelemente aus den Brennstoffen mit dem Reingas emittiert wird.

Die in der Tabelle aufgeführten Emissionsfaktoren sind dagegen höher als die jeweiligen Transferkoeffizienten. Sie berücksichtigen neben den brennstoffbedingten Emissionen auch die rohstoffbedingten Emissionen, die in der Regel deutlich überwiegen. Für die Emissionsfaktoren werden Bandbreiten angegeben, die sich aus Bilanzuntersuchungen ergaben. Auf Angaben für das Element

in rotary kiln systems of the cement industry.

Figure 5-23 shows 128 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 91 values were below the detection limit, which ranges between 0.04 and 0.06 mg/m^3 depending on the measurement.

Fig. 5-24 shows the HF emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the releases can only be estimated. In these cases, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.04 mg/m^3 .

5.13 Trace elements

The emission behaviour of the individual elements in the clinker burning process is determined by the input scenario, the behaviour in the process and the precipitation efficiency of the dust collection device. The trace elements introduced into the burning process via the raw materials and fuels may evaporate completely or partially in the hot zones of the preheater and/or rotary kiln depending on their volatility, react with the constituents present in the gas phase and condense on the kiln feed in the cooler sections of the kiln system. Depending on the volatility and the operating conditions, this may result in the formation of cycles that are either restricted to the kiln and the preheater or include the combined drying and grinding plant as well.

Trace elements from the fuels initially enter the combustion gases, but are emitted to an extremely small extent only owing to the retention capacity of the kiln and the preheater. Table 5-4 gives representative transfer coefficients for rotary kiln systems equipped with cyclone preheaters. These coefficients serve to calculate the proportion of trace elements from fuels emitted with the clean gas.

By contrast, the emission factors listed in the table are higher than the corresponding transfer coefficients. Apart from fuel-related emissions, they also take into account raw material-related emissions, which usually predominate by a significant margin. The bandwidths indicated for the emission factors result from inventory investigations. No values are given for mercury since measurement results primarily depend on the respective operating conditions.

Under the conditions prevailing in the clinker burning process,

Quecksilber wird verzichtet, da die Messergebnisse vor allem von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängen.

Unter den Bedingungen des Klinkerbrennprozesses werden die nichtflüchtigen Elemente (z. B. Arsen, Vanadium, Nickel) vollständig in den Klinker eingebunden. Elemente wie Blei und Cadmium reagieren im Bereich zwischen Drehofen und Vorwärmer bevorzugt mit den im Überschuss zur Verfügung stehenden Chloriden und Sulfaten zu schwerflüchtigen Verbindungen. Aufgrund des hohen Oberflächenangebots kondensieren diese Verbindungen bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C an den Brenngutpartikeln. Die im Ofen-Vorwärmer-System gespeicherten schwerflüchtigen Elemente werden so im Zyklonvorwärmer wieder abgeschieden und verbleiben praktisch vollständig im Klinker.

Thallium und seine Verbindungen kondensieren im oberen Bereich des Zyklonvorwärmers bei Temperaturen zwischen 450 °C und 500 °C, sodass sich zwischen Vorwärmer, Rohmaterialtrocknung und Abgasreinigungsanlage ein Kreislauf ausbilden kann.

Quecksilber und seine Verbindungen werden in Ofen und Vorwärmer nicht abgeschieden. Auf dem Abgasweg kondensieren sie infolge der Abkühlung des Gases und werden von den Rohmaterialpartikeln teilweise adsorbiert. Dieser Anteil wird im Ofenabgasfilter abgeschieden.

Aufgrund des Verhaltens der Spurenelemente beim Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheideleistung der Entstaubungseinrichtungen liegen die Emissionskonzentrationen der Spurenelemente insgesamt auf einem niedrigen Niveau. So liegen die im Jahr 2014 gemessenen Werte der in der 17. BImSchV genannten Spurenelemente nur in ca. 18 % aller Fälle oberhalb der Nachweisgrenze.

non-volatile elements (e.g. arsenic, vanadium, nickel) are completely bound in the clinker. Elements such as lead and cadmium preferably react with the excess chlorides and sulphates in the section between the rotary kiln and the preheater, forming low-volatile compounds. Owing to the large surface area available, these compounds condense on the kiln feed particles at temperatures of between 700 °C and 900 °C. In this way, the low-volatile elements accumulated in the kiln-preheater-system are precipitated again in the cyclone preheater, remaining almost completely in the clinker.

Thallium and its compounds condense in the upper zone of the cyclone preheater at temperatures of between 450 °C and 500 °C. As a consequence, a cycle can be formed between preheater, raw material drying and exhaust gas purification.

Mercury and its compounds are not precipitated in the kiln and the preheater. They condense on the exhaust gas route due to the cooling of the gas and are partially adsorbed by the raw material particles. This portion is precipitated in the kiln exhaust gas filter.

Owing to trace element behaviour during the clinker burning process and the high precipitation efficiency of the dust collection devices, trace element emission concentrations are on a low overall level. For example, the average values measured in 2014 of the trace elements listed in the German regulation on waste incineration (17th BImSchV) were above the detection limit in merely about 18 % of all cases.

5.13.1 Cadmium (Cd)

Tabelle 5-4 Emissionsfaktoren (EF, emittierter Anteil des Gesamteintrags) und Transferkoeffizienten (TK, emittierter Anteil des Brennstoffeintrags) für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer.

Table 5-4 Emission factors (EF, emitted portion of the total input) and transfer coefficients (TC, emitted portion of the fuel input) for rotary kiln systems with cyclone pre-heater.

Komponente / Component	EF in % / EF in %	TK in % / TC in %
Cadmium / Cadmium	< 0,01 bis < 0,2	0,003
Thallium / Thallium	< 0,01 bis < 1	0,02
Antimon / Antimony	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Arsen / Arsenic	< 0,01 bis 0,02	0,0005
Blei / Lead	< 0,01 bis < 0,2	0,002
Chrom / Chromium	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Cobalt / Cobalt	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Kupfer / Copper	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Mangan / Manganese	< 0,001 bis < 0,01	0,0005
Nickel / Nickel	< 0,01 bis < 0,05	0,0005
Vanadium / Vanadium	< 0,01 bis < 0,05	0,0005

Quelle / Source: VDZ

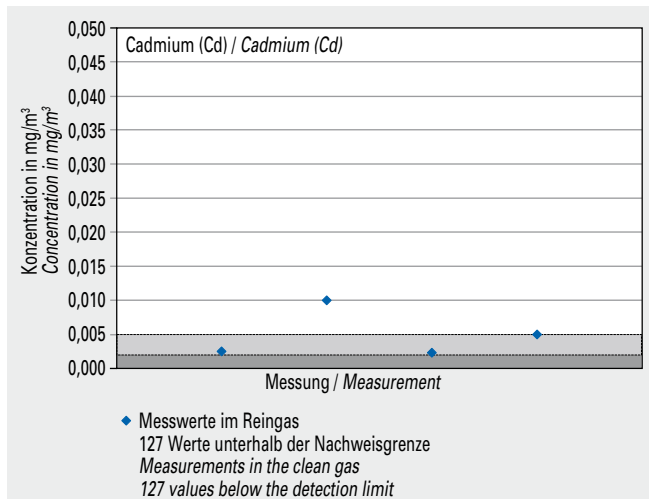


Bild 5-25 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Cadmium (Cd) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.

Fig. 5-25 Cadmium (Cd) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

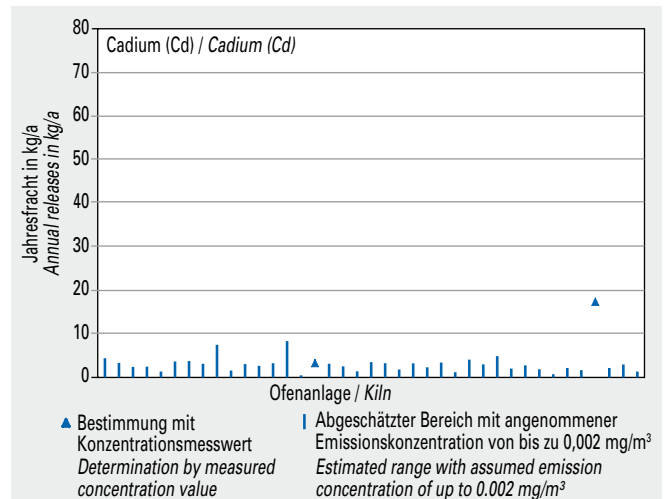


Bild 5-26 Emissionen von Cadmium (Cd) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-26 Cadmium (Cd) emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns.

5.13.1 Cadmium (Cd)

In 2014 wurden 131 Werte aus Messungen im Reingas von 39 Ofenanlagen ermittelt. 127 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,002 und 0,005 mg/m³ (Bild 5-25). Bild 5-26 zeigt die Cadmium-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,002 mg/m³ berechnet wurde.

5.13.2 Thallium (Tl)

In 2014 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 127 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,004 und 0,006 mg/m³ (Bild 5-27). Bild 5-28 zeigt die Thallium-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,004 mg/m³ berechnet wurde.

Figure 5-25 shows 131 values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns. 127 values were below the detection limit, which ranges between 0.002 and 0.005 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-26 shows the cadmium emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.002 mg/m³.

5.13.2 Thallium (Tl)

Figure 5-27 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 127 values were below the detection limit, which ranges between 0.004 and 0.006 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-28 shows thallium emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.004 mg/m³.

5.13.3 Mercury (Hg)

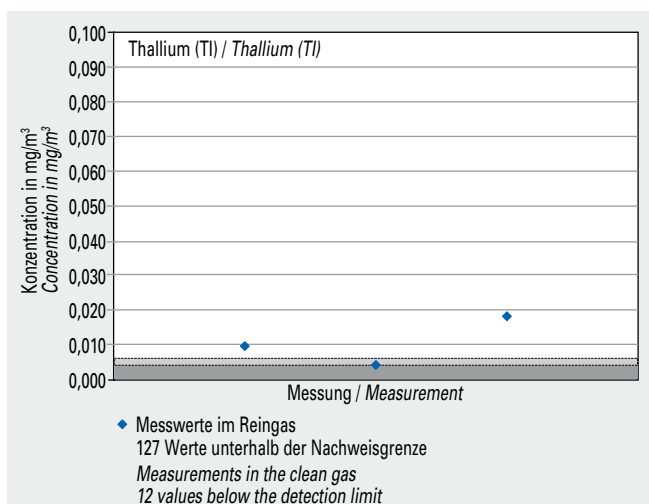


Bild 5-27 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Thallium (Tl) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-27 Thallium (Tl) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

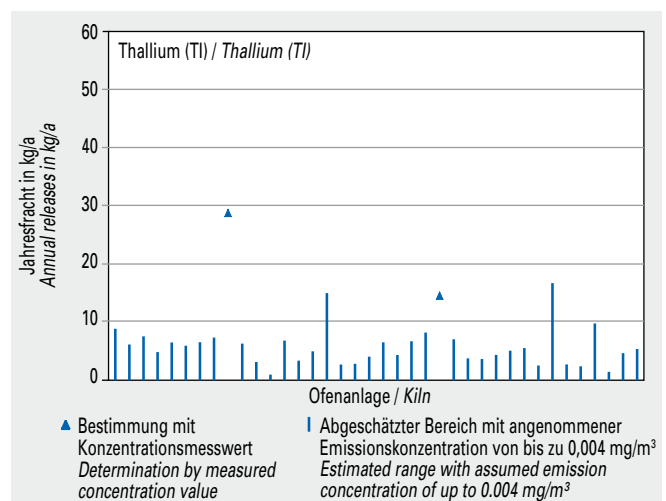


Bild 5-28 Emissionen von Thallium (Tl) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-28 Thallium (Tl) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

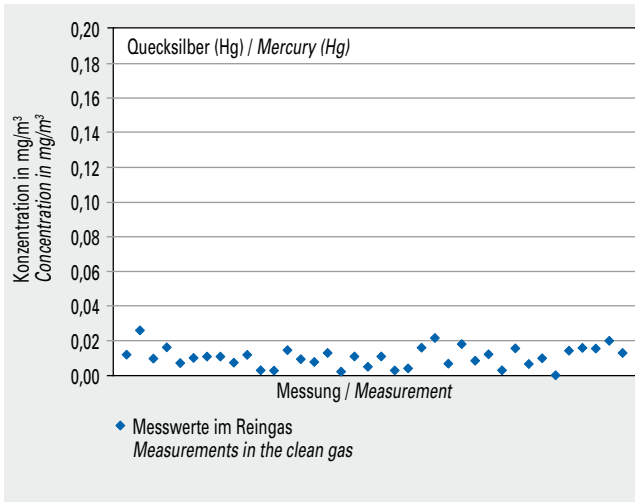


Bild 5-29 Mittelwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Quecksilber (Hg) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.
Fig. 5-29 Mercury (Hg) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

5.13.3 Quecksilber (Hg)

In 2014 wurden 38 Jahresmittelwerte aus kontinuierlicher Überwachung von 38 Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-29). Bild 5-30 zeigt die Quecksilber-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen.

5.13.4 Antimon (Sb)

In 2014 wurden 126 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 125 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m³ (Bild 5-31). Bild 5-32 zeigt die Antimon-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,005 mg/m³ berechnet wurde.

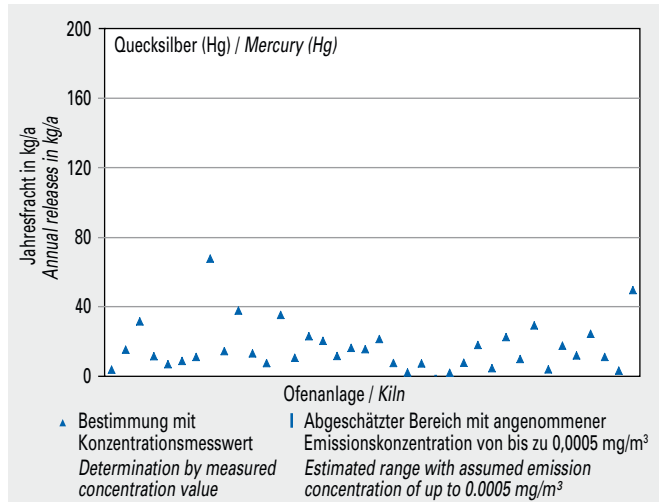


Bild 5-30 Emissionen von Quecksilber (Hg) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-30 Mercury (Hg) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

Figure 5-29 shows 38 annual average values from continuous monitoring at 38 rotary kilns. Figure 5-30 shows the mercury emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

5.13.4 Antimony (Sb)

Figure 5-31 shows 126 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 125 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-32 shows the antimony emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.005 mg/m³.

5.13.5 Arsenic (As)

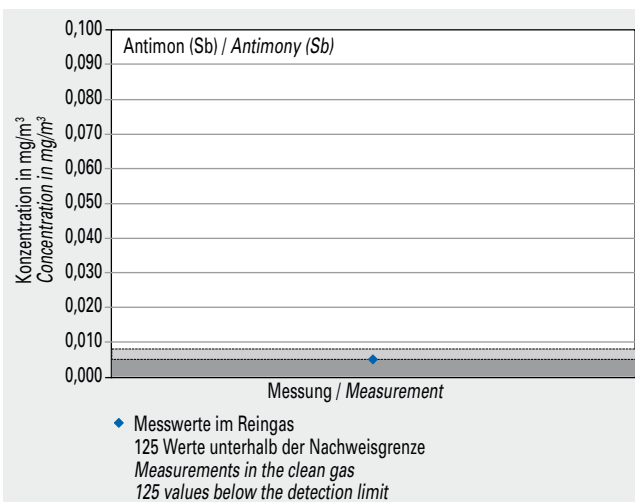


Bild 5-31 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Antimon (Sb) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.
Fig. 5-31 Antimony (Sb) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

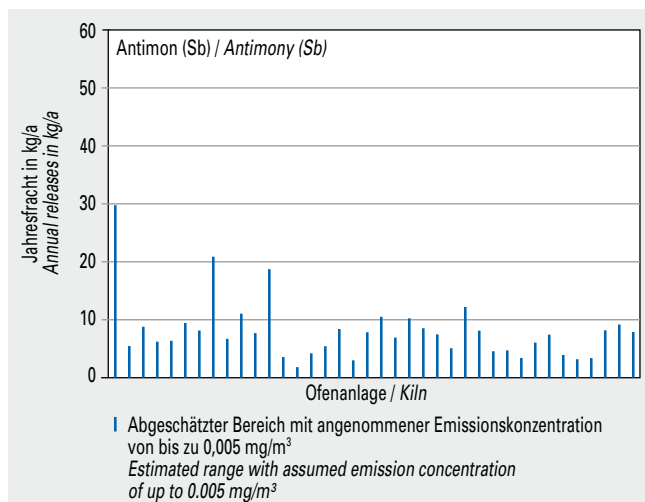


Bild 5-32 Emissionen von Antimon (Sb) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).
Fig. 5-32 Antimony (Sb) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

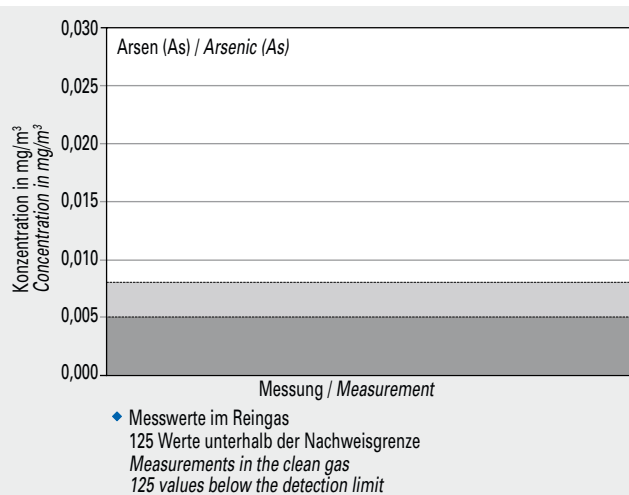


Bild 5-33 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Arsen (As) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

Fig. 5-33 Arsenic (As) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

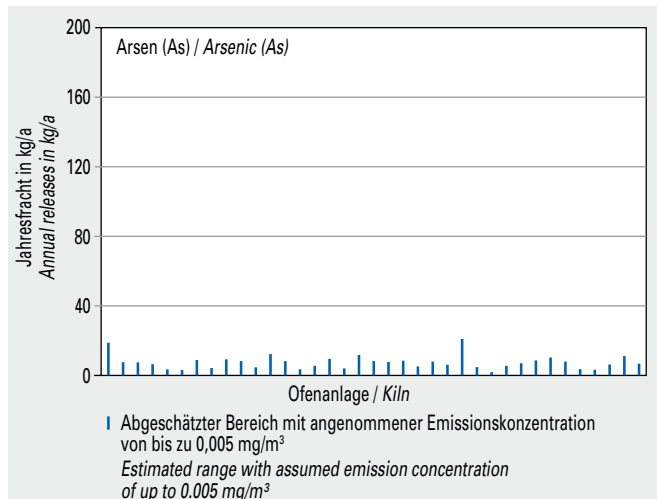


Bild 5-34 Emissionen von Arsen (As) von 37 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-34 Arsenic (As) emissions (annual releases in 2014) of 37 rotary kilns.

5.13.5 Arsen (As)

In 2014 wurden 125 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 125 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m³ (Bild 5-33). Bild 5-34 zeigt die Arsen-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 37 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,005 mg/m³ berechnet wurde. Ein unplausibler Messwert wurde nicht berichtet.

Figure 5-33 shows 125 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 125 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-34 shows the arsenic emissions (annual releases in 2014) of 37 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.005 mg/m³. An implausible measurement value was not reported.

5.13.6 Blei (Pb)

In 2014 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 100 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,01 und 0,02 mg/m³ (Bild 5-35). Bild 5-36 zeigt die Blei-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,01 mg/m³ berechnet wurde. Ein unplausibler Messwert wurde nicht berichtet.

5.13.6 Lead (Pb)

Figure 5-35 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 100 values were below the detection limit, which ranges between 0.01 and 0.02 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-36 shows the lead emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.01 mg/m³. An implausible measurement value was not reported.

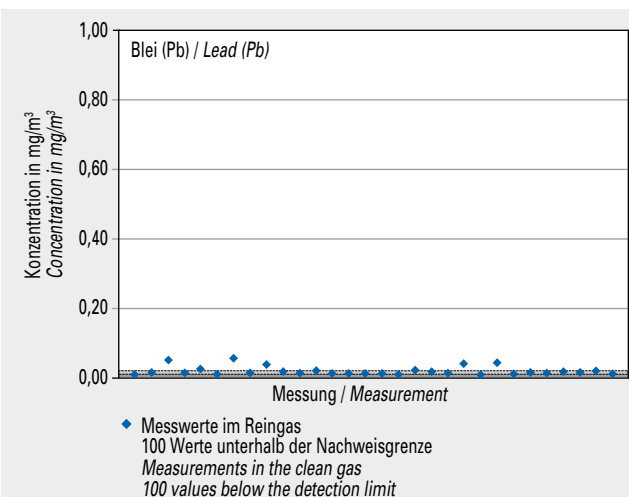


Bild 5-35 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Blei (Pb) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-35 Lead (Pb) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

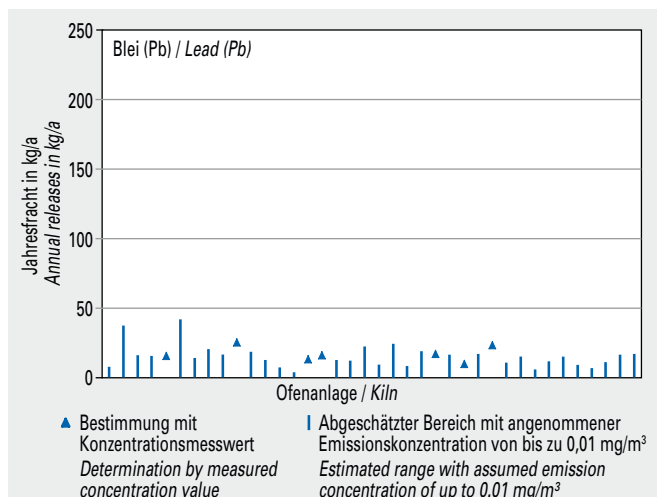


Bild 5-36 Emissionen von Blei (Pb) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-36 Lead (Pb) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

5.13.7 Chromium (Cr)

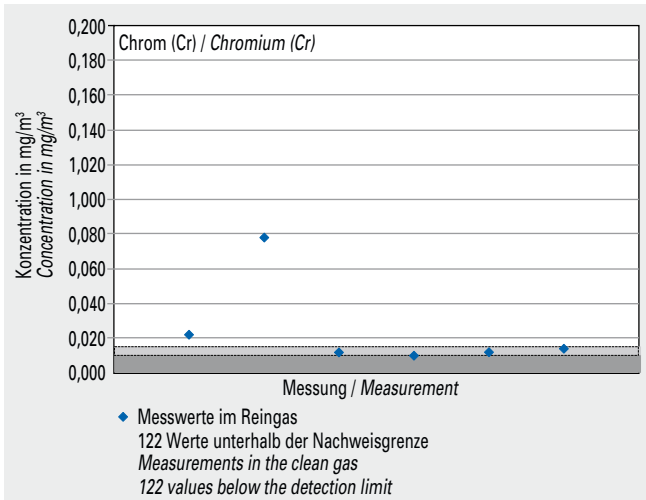


Bild 5-37 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Chrom (Cr) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

Fig. 5-37 Chromium (Cr) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

5.13.7 Chrom (Cr)

In 2014 wurden 128 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 122 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,01 und 0,015 mg/m³ (Bild 5-37). Bild 5-38 zeigt die Chrom-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 37 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,01 mg/m³ berechnet wurde. Zwei unplausible Messwerte wurden nicht berichtet.

5.13.8 Cobalt (Co)

In 2014 wurden 125 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 124 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,01 und 0,015 mg/m³ (Bild 5-39). Bild 5-40 zeigt die Cobalt-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 37 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,01 mg/m³ berechnet wurde. Ein unplausibler Messwert wurde nicht berichtet.

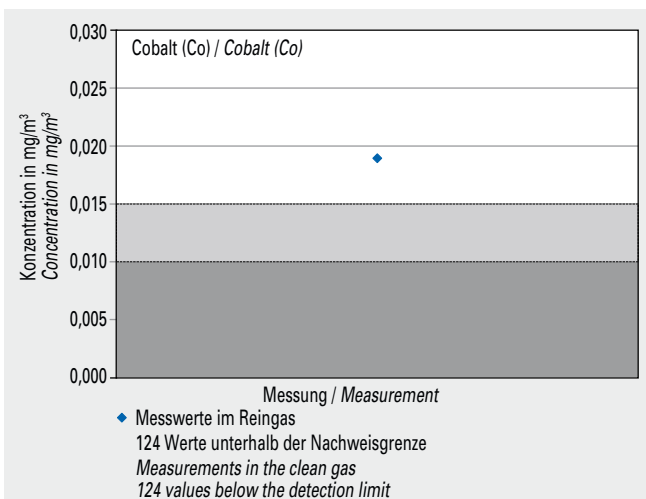


Bild 5-39 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Cobalt (Co) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

Fig. 5-39 Cobalt (Co) concentration values (year 2014) in the clean gas of 37 rotary kilns.

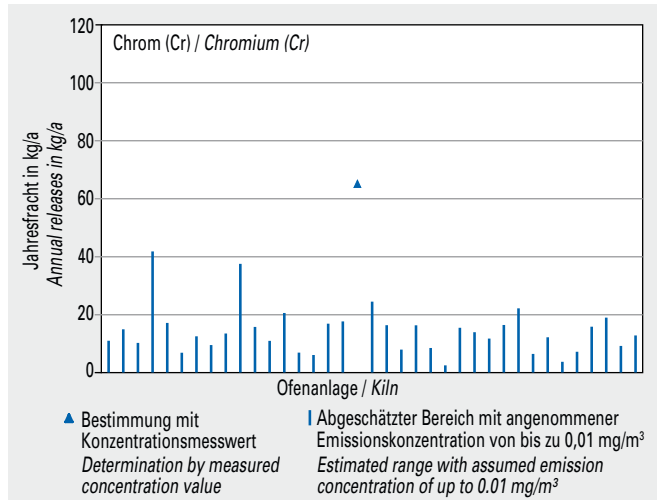


Bild 5-38 Emissionen von Chrom (Cr) von 37 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-38 Chromium (Cr) emissions (annual releases in 2014) of 37 rotary kilns.

Figure 5-37 shows 128 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 122 values were below the detection limit, which ranges between 0.01 and 0.015 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-38 shows the chromium emissions (annual releases in 2014) of 37 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.01 mg/m³. Two implausible measurement values were not reported.

5.13.8 Cobalt (Co)

Figure 5-39 shows 125 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 124 values were below the detection limit, which ranges between 0.01 and 0.015 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-40 shows the cobalt emissions (annual releases in 2014) of 37 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.01 mg/m³. An implausible measurement value was not reported.

5.13.9 Copper (Cu)

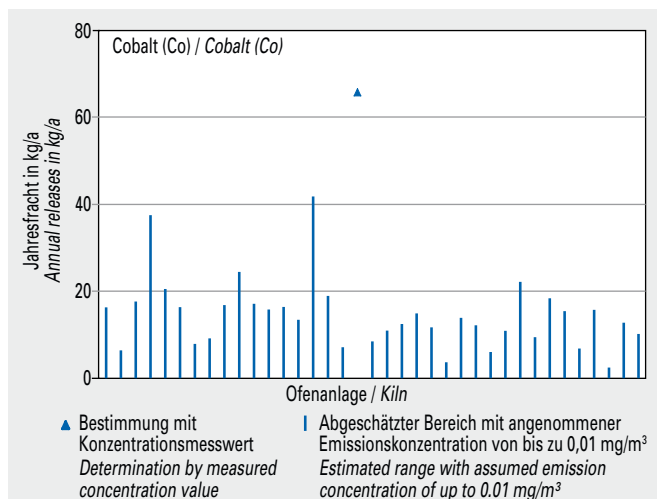


Bild 5-40 Emissionen von Cobalt (Co) von 37 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-40 Cobalt (Co) emissions (annual releases in 2014) of 37 rotary kilns.

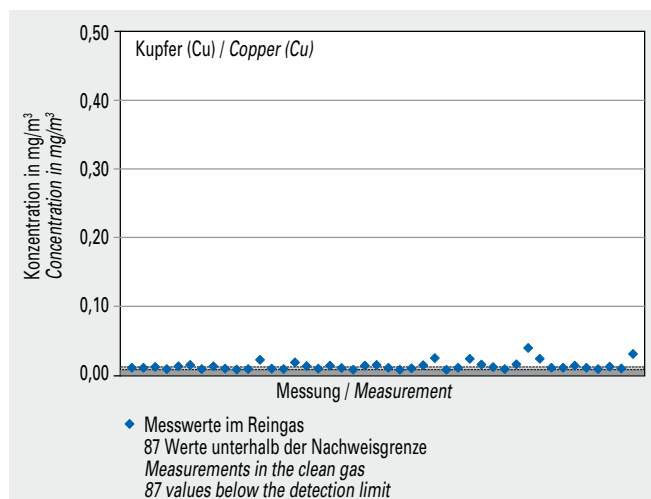


Bild 5-41 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Kupfer (Cu) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.

Fig. 5-41 Copper (Cu) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

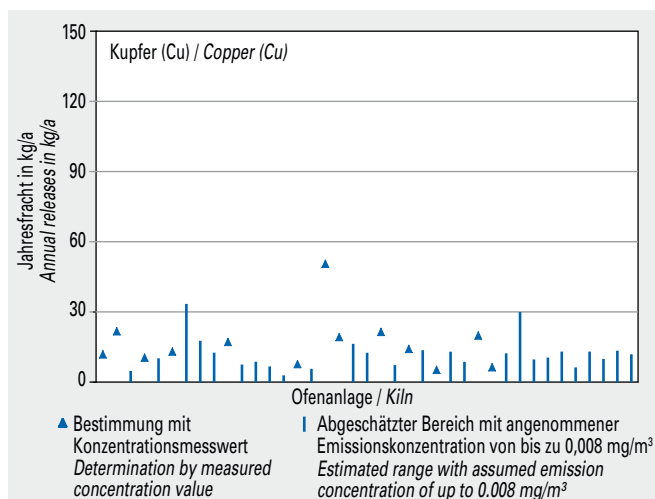


Bild 5-42 Emissionen von Kupfer (Cu) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-42 Copper (Cu) emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns.

5.13.9 Kupfer (Cu)

In 2014 wurden 131 Werte aus Messungen im Reingas von 39 Ofenanlagen ermittelt. 87 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,008 und 0,012 mg/m³ (Bild 5-41). Bild 5-42 zeigt die Kupfer-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,008 mg/m³ berechnet wurde.

5.13.10 Mangan (Mn)

In 2014 wurden 131 Werte aus Messungen im Reingas von 39 Ofenanlagen ermittelt. 46 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m³ (Bild 5-43). Bild 5-44 zeigt die Mangan-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,005 mg/m³ berechnet wurde.

Figure 5-41 shows 131 values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns. 87 values were below the detection limit, which ranges between 0.008 and 0.012 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-42 shows the copper emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.008 mg/m³.

5.13.10 Manganese (Mn)

Figure 5-43 shows 131 values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns. 46 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-44 shows the manganese emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.005 mg/m³.

5.13.11 Nickel (Ni)

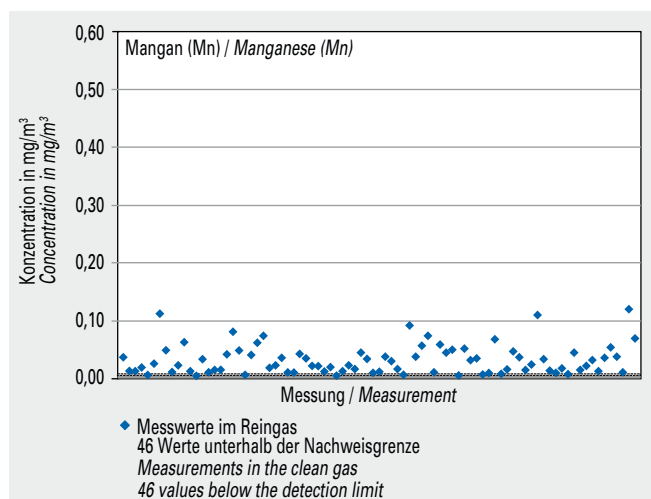


Bild 5-43 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Mangan (Mn) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.

Fig. 5-43 Manganese (Mn) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

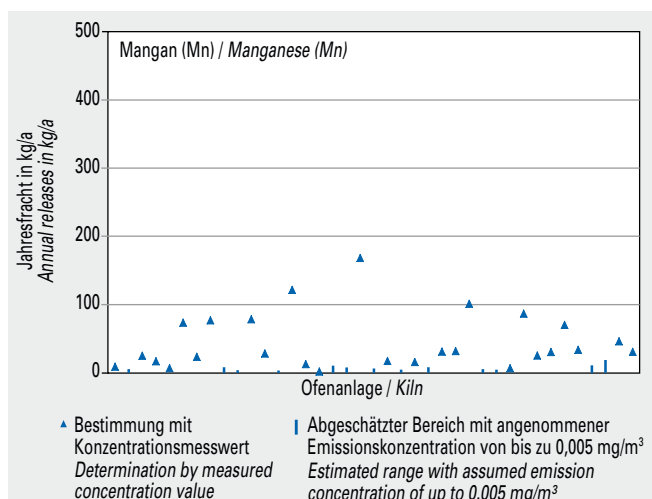


Bild 5-44 Emissionen von Mangan (Mn) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-44 Manganese (Mn) emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns.

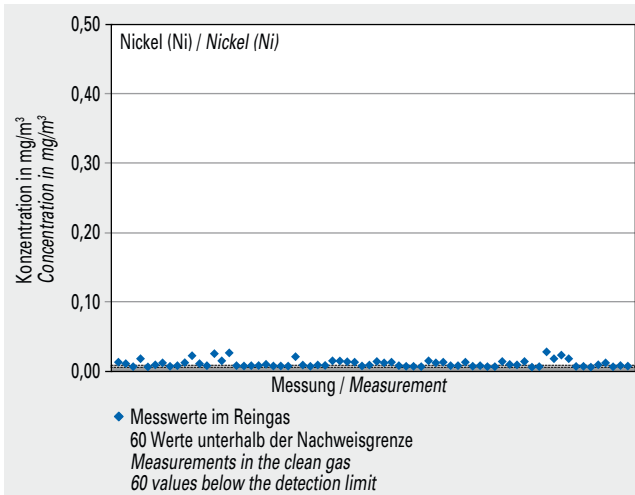


Bild 5-45 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Nickel (Ni) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-45 Nickel (Ni) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

5.13.11 Nickel (Ni)

In 2014 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 60 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,006 und 0,009 mg/m³ (Bild 5-45). Bild 5-46 zeigt die Nickel-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,006 mg/m³ berechnet wurde. Ein unplausibler Messwert wurde nicht berichtet.

5.13.12 Vanadium (V)

In 2014 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 130 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m³ (Bild 5-47). Bild 5-48 zeigt die Vanadium-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,005 mg/m³ berechnet wurde.

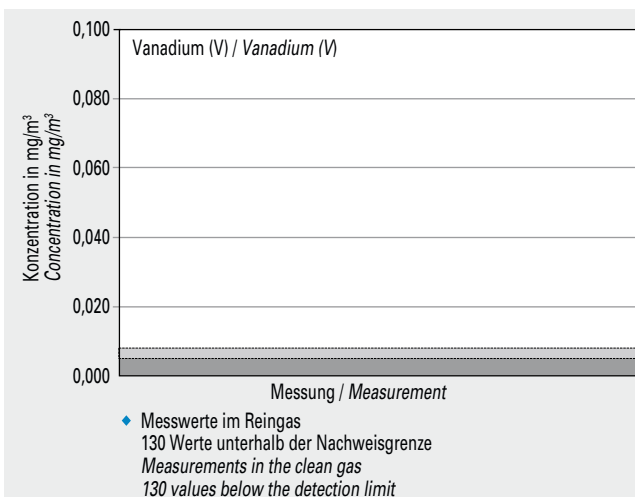


Bild 5-47 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Vanadium (V) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-47 Vanadium (V) concentration values (year 2014) in the clean gas of 38 rotary kilns.

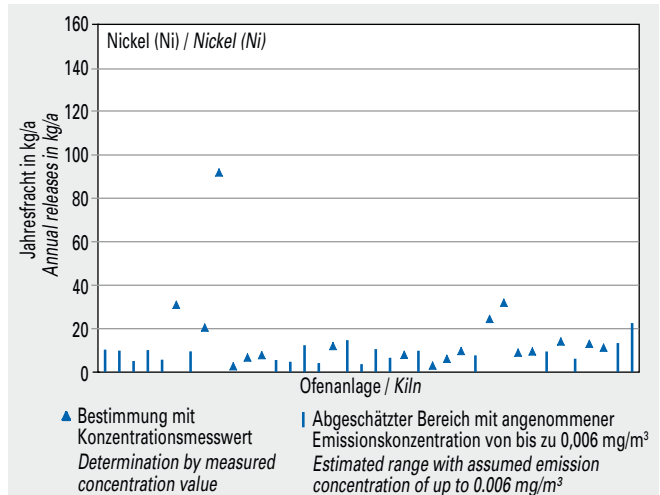


Bild 5-46 Emissionen von Nickel (Ni) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-46 Nickel (Ni) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

Figure 5-45 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 60 values were below the detection limit, which ranges between 0.006 and 0.009 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-46 shows the nickel emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.006 mg/m³. An implausible measurement value was not reported.

5.13.12 Vanadium (V)

Figure 5-47 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 130 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-48 shows the vanadium emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.005 mg/m³.

5.13.13 Tin (Sn)

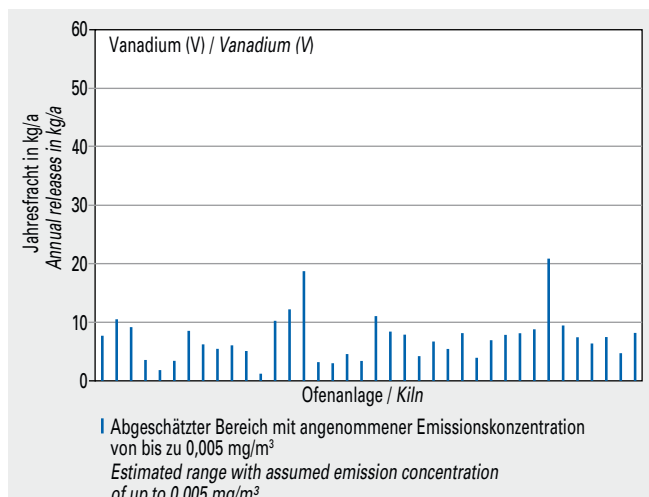


Bild 5-48 Emissionen von Vanadium (V) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-48 Vanadium (V) emissions (annual releases in 2014) of 38 rotary kilns.

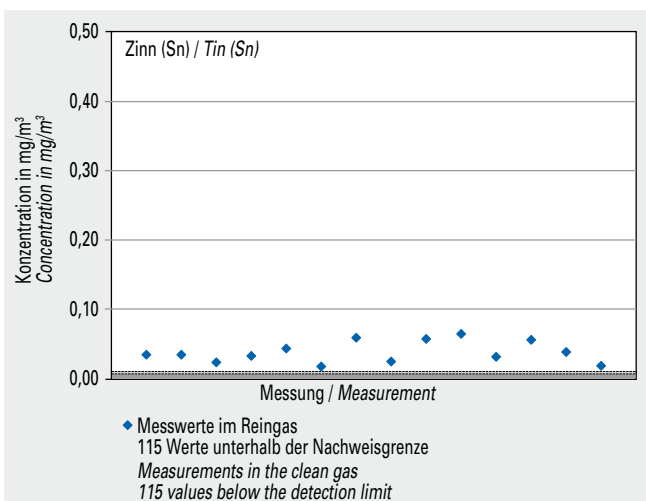


Bild 5-49 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Zinn (Sn) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.

Fig. 5-49 Tin (Sn) concentration values (year 2014) in the clean gas of 39 rotary kilns.

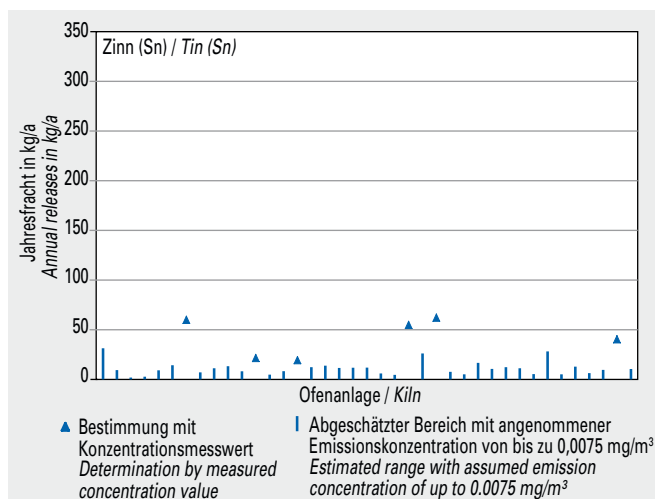


Bild 5-50 Emissionen von Zinn (Sn) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-50 Tin (Sn) missions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns.

5.13.13 Zinn (Sn)

In 2014 wurden 129 Werte aus Messungen im Reingas von 39 Ofenanlagen ermittelt. 115 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,0075 und 0,011 mg/m³ (Bild 5-49). Bild 5-50 zeigt die Zinn-Emissionen (Jahresfracht 2014) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,0075 mg/m³ berechnet wurde.

5.13.14 Beryllium (Be)

In 2014 wurden 24 Werte aus Messungen im Reingas von neun Ofenanlagen ermittelt. 24 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,003 und 0,005 mg/m³ (Bild 5-51). Bild 5-52 zeigt die Beryllium-Emissionen (Jahresfracht 2014) von neun Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,003 mg/m³ berechnet wurde.

Figure 5-49 shows 129 values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns. 115 values were below the detection limit, which ranges between 0.0075 and 0.011 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-50 shows the tin emissions (annual releases in 2014) of 39 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.0075 mg/m³.

5.13.14 Beryllium (Be)

Figure 5-51 shows 24 values from measurements in the clean gas at nine rotary kilns. 24 values were below the detection limit, which ranges between 0.003 and 0.005 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-52 shows the beryllium emissions (annual releases in 2014) of nine rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.003 mg/m³.

5.13.15 Selenium (Se)

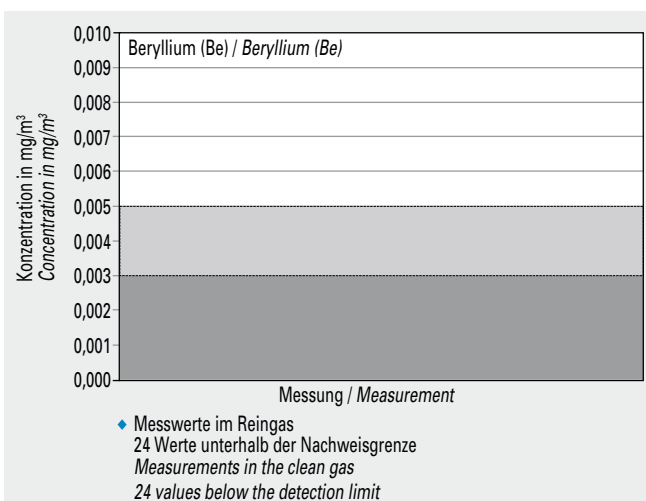


Bild 5-51 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Beryllium (Be) im Reingas von neun Drehofenanlagen.

Fig. 5-51 Beryllium (Be) concentration values (year 2014) in the clean gas of nine rotary kilns.

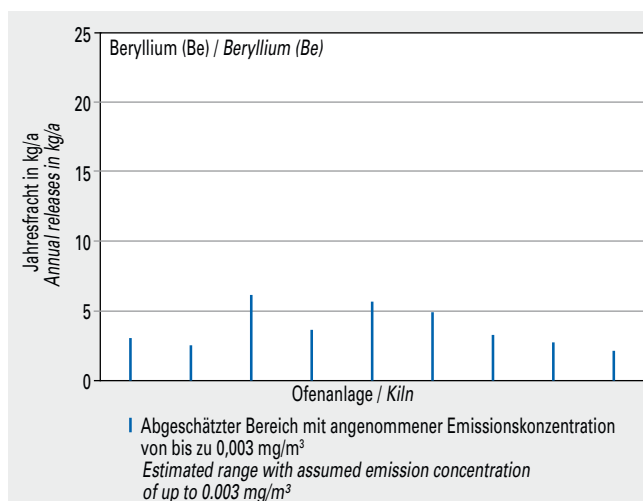


Bild 5-52 Emissionen von Beryllium (Be) von neun Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-52 Beryllium (Be) emissions (annual releases in 2014) of nine rotary kilns.

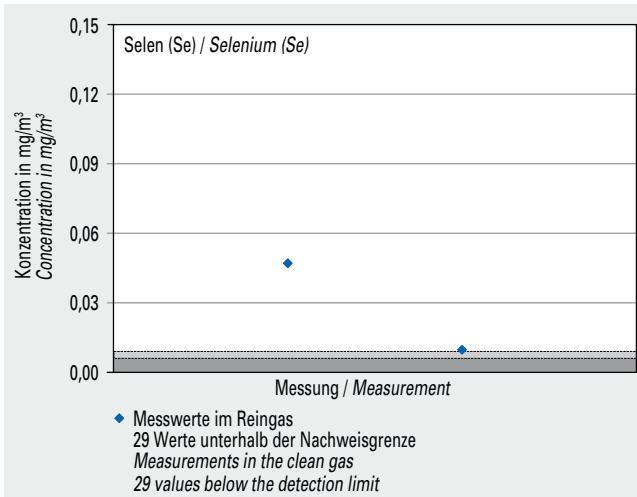


Bild 5-53 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Selen (Se) im Reingas von elf Drehofenanlagen.

Fig. 5-53 Selen (Se) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of eleven rotary kilns.

5.13.15 Selen (Se)

In 2014 wurden 31 Werte aus Messungen im Reingas von elf Ofenanlagen ermittelt. 29 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,006 und 0,009 mg/m³ (Bild 5-53). Bild 5-54 zeigt die Selen-Emissionen (Jahresfracht 2014) von elf Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,006 mg/m³ berechnet wurde.

5.13.16 Tellur (Te)

In 2014 wurden 28 Werte aus Messungen im Reingas von zehn Ofenanlagen ermittelt. 28 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,0015 und 0,002 mg/m³ (Bild 5-55). Bild 5-56 zeigt die Tellur-Emissionen (Jahresfracht 2014) von zehn Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,0015 mg/m³ berechnet wurde.

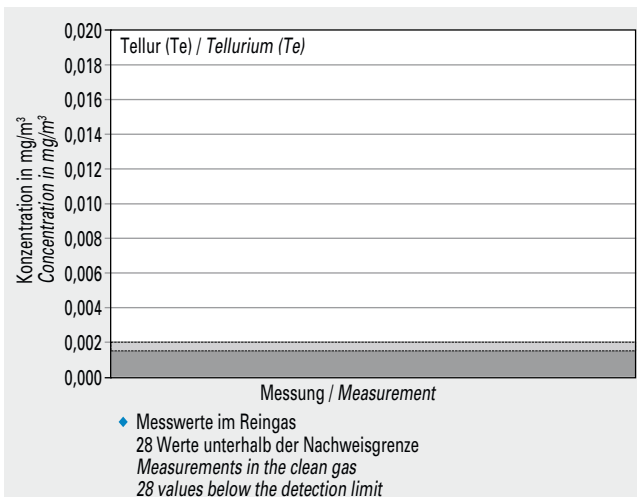


Bild 5-55 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Tellur (Te) im Reingas von zehn Drehofenanlagen.

Fig. 5-55 Tellurium (Te) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of ten rotary kilns.

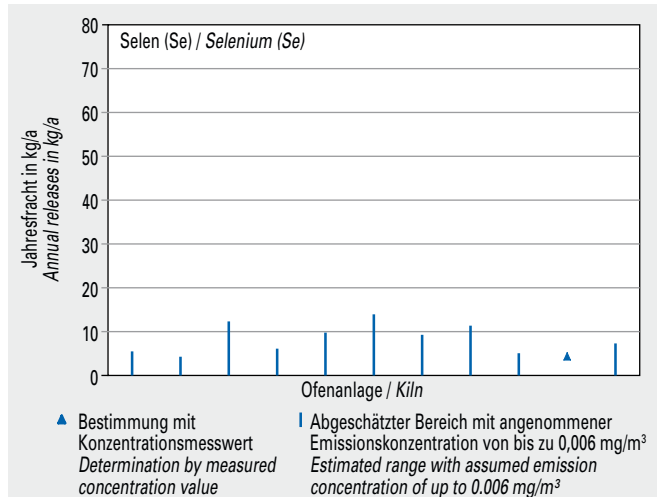


Bild 5-54 Emissionen von Selen (Se) von elf Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-54 Selenium (Se) emissions (annual releases in 2014) of eleven rotary kilns.

Figure 5-53 shows 31 values from measurements in the clean gas at eleven rotary kilns. 29 values were below the detection limit, which ranges between 0.006 and 0.009 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-54 shows the selenium emissions (annual releases in 2014) of eleven rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.006 mg/m³.

5.13.16 Tellurium (Te)

Figure 5-55 shows 28 values from measurements in the clean gas at ten rotary kilns. 28 values were below the detection limit, which ranges between 0.0015 and 0.002 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-56 shows the tellurium emissions (annual releases in 2014) of ten rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.0015 mg/m³.

5.13.17 Zinc (Zn)

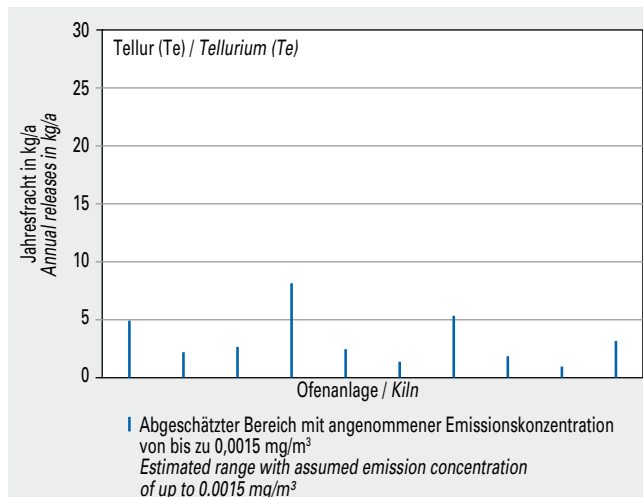


Bild 5-56 Emissionen von Tellur (Te) von zehn Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-56 Tellurium (Te) emissions (annual releases in 2014) of ten rotary kilns.

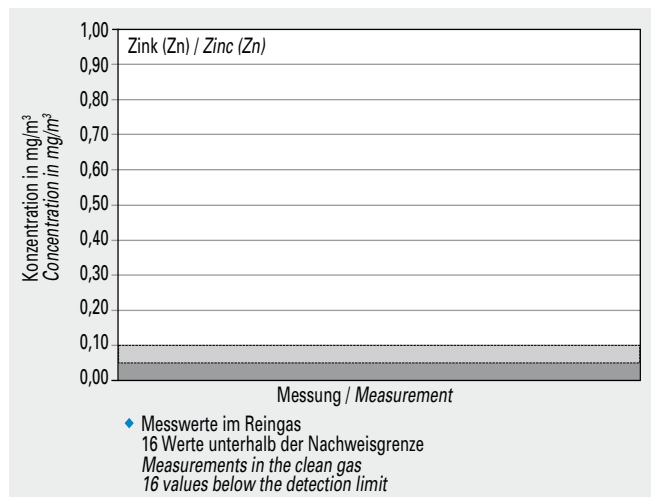


Bild 5-57 Messwerte (Jahr 2014) der Konzentration von Zink (Zn) im Reingas von sieben Drehofenanlagen.

Fig. 5-57 Zinc (Zn) concentration values (year 2014) measured in the clean gas of seven rotary kilns.

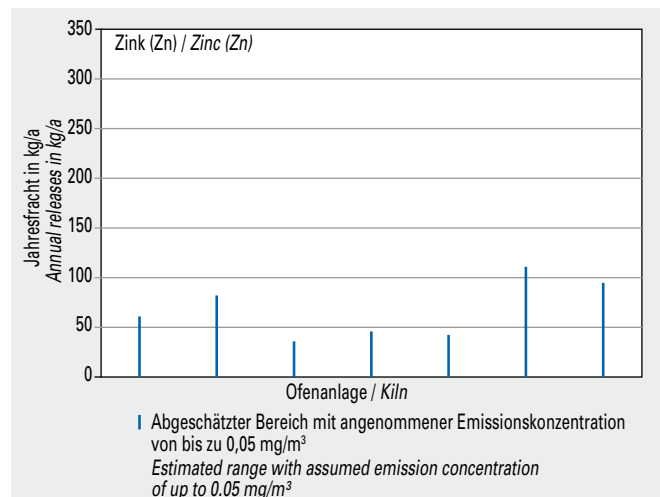


Bild 5-58 Emissionen von Zink (Zn) von sieben Drehofenanlagen (Jahresfracht 2014).

Fig. 5-58 Zinc (Zn) emissions (annual releases in 2014) of seven rotary kilns.

5.13.17 Zink (Zn)

In 2014 wurden 16 Werte aus Messungen im Reingas von sieben Ofenanlagen ermittelt. 16 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,05 und 0,1 mg/m³ (Bild 5-57).

Bild 5-58 zeigt die Zink-Emissionen (Jahresfracht 2014) von sieben Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 0,05 mg/m³ berechnet wurde.

Figure 5-57 shows 16 values from clean gas measurements at seven rotary kilns. 16 values were below the detection limit, which ranges between 0.05 and 0.1 mg/m³ depending on the measurement.

Figure 5-58 shows the zinc emissions (annual releases in 2014) of seven rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the range of possible emissions is represented by a broken line, the upper limit of which was calculated using a concentration of 0.05 mg/m³.

Literatur ■

- [1] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2015, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [2] Verminderung der CO₂-Emission Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [3] Klein, H.; Hoenig, V.: Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [4] Verordnung (EG) 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG
- [5] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 1; Cement International 3/2013
- [6] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 2, Cement International 4/2013

Ergänzende Literatur ■

- Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (1998 - 2013), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Ökologische Positionierung von Zement und Beton. IZB, Köln; BDZ, Berlin; VDZ, Düsseldorf, 3. Auflage, 2001
- Naturschutz und Zementindustrie (Projektteil 1), Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Beton – Hart im Nehmen, Stark in der Leistung, Fair zur Umwelt, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf
- Altöl – Wo Abfall Wunder wirkt, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Alte Steinbrüche – Neues Leben, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Richtlinie VDI 2094:2003-03. Zementwerke: Emissionsminderung
- Norm DIN 1164-10:2013-03. Zement mit besonderen Eigenschaften
- Norm DIN EN 197-1:2011-11. Zement: Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

Literature ■

- [1] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2015, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [2] Verminderung der CO₂-Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [3] Klein, H.; Hoenig, V.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [4] Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and the Council of 18 January 2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/EC
- [5] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 1; Cement International 3/2013
- [6] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 2; Cement International 4/2013

Additional Literature ■

- Environmental Data of the German Cement Industry (1998 - 2013), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Ökologische Positionierung von Zement und Beton. IZB, Cologne; BDZ, Berlin; VDZ, Duesseldorf, 3. Auflage, 2001
- Naturschutz und Zementindustrie (Projektteil 1). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Cologne; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Beton – Hart im Nehmen, Stark in der Leistung, Fair zur Umwelt, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Altöl – Wo Abfall Wunder wirkt, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Alte Steinbrüche – Neues Leben, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- VDI-Guideline 2094:2003-03. Cement plants: Emission control
- Standard DIN 1164-10: 2013-03. Special cement - Part 10
- Standard DIN EN 197-1:2011-11. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements

Copyright/Herausgeber:

Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Postfach 30 10 63, D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2, D-40476 Düsseldorf
Telefon: (02 11) 45 78 - 1
Telefax: (02 11) 45 78 - 296
E-Mail: vdz@vdz-online.de
Internet: <http://www.vdz-online.de>

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichung und
Gesamtproduktion:
Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Redaktionsschluss: September 2015

Copyright/Publisher:

*Verein Deutscher Zementwerke e.V.
P.O. Box 30 10 63, D-40410 Duesseldorf
Tannenstrasse 2, D-40476 Duesseldorf
Phone: +49 (0) 211 45 78 - 1
Fax: +49 (0) 211 45 78 - 296
E-Mail: vdz@vdz-online.de
Internet: <http://www.vdz-online.de>*

All rights reserved

*Overall production:
Verein Deutscher Zementwerke e. V.*

Press deadline: September 2015



VDZ
Postfach 30 10 63
D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2
D-40476 Düsseldorf

VDZ
P.O. Box 30 10 63
40410 Duesseldorf, Germany
Tannenstrasse 2
40476 Duesseldorf, Germany