

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



2012

Inhalt / Contents

Vorwort / Foreword	3
1 Zementherstellung / Cement manufacture	5
2 Produktions- und Strukturdaten / Production and structural data	6
3 Einsatzstoffe / Input materials	8
3.1 Rohstoffe / Raw materials	8
3.2 Brennstoffe / Fuels	9
4 Energie / Energy	10
5 Emissionen / Emissions	12
5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid / greenhouse gases / carbon dioxide	14
5.2 Staub / Dust	15
5.3 Stickstoffoxide / Nitrogen oxides	16
5.4 Schwefeldioxid / Sulphur dioxide	17
5.5 Kohlenstoffmonoxid und organischer Gesamtkohlenstoff / Carbon monoxide and total organic carbon	18
5.6 Dioxine und Furane / Dioxins und Furans	20
5.7 Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls	21
5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / Polycyclic aromatic hydrocarbons	22
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	26
5.13 Spurenelemente / Trace elements	27
5.13.1 Cadmium / Cadmium (Cd)	28
5.13.2 Thallium / Thallium (Tl)	29
5.13.3 Quecksilber / Mercury (Hg)	30
5.13.4 Antimon / Antimony (Sb)	31
5.13.5 Arsen / Arsenic (As)	32
5.13.6 Blei / Lead (Pb)	33
5.13.7 Chrom / Chromium (Cr)	34
5.13.8 Cobalt / Cobalt (Co)	35
5.13.9 Kupfer / Copper (Cu)	36
5.13.10 Mangan / Manganese (Mn)	37
5.13.11 Nickel / Nickel (Ni)	38
5.13.12 Vanadium / Vanadium (V)	39
5.13.13 Zinn / Tin (Sn)	40
5.13.14 Beryllium / Beryllium (Be)	41
5.13.15 Selen / Selenium (Se)	42
5.13.16 Tellur / Tellurium (Te)	43
5.13.17 Zink / Zinc (Zn)	44
Literatur / Ergänzende Literatur / Literature / Additional literature	45
Impressum / Imprint	47

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,

die vorliegende 14. Ausgabe der „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“ gibt in bewährter Form einen umfangreichen Überblick über die umweltrelevanten Emissionen sämtlicher Klinker produzierenden Werke in Deutschland. Seit September 2000 dokumentiert der VDZ damit die Ergebnisse sowohl kontinuierlicher Emissionsüberwachungen als auch von Einzelmessungen von Spurenelementen und organischen Abgasbestandteilen in den deutschen Zementwerken.

Mit durchschnittlich rund 178 Kilogramm Kohlendioxid sank der spezifische energiebedingte CO₂-Ausstoß pro hergestellter Tonne Zement von 1990 bis 2012 um 49 Prozent. Neben verfahrenstechnischen Innovationen und der Reduzierung des Klinkeranteils am Zement durch andere Hauptbestandteile verhalf vor allem der vermehrte Einsatz alternativer Brennstoffe zur Minderung der CO₂-Emissionen. Altreifen, Altöl und Altholz sowie Fraktionen aus Industrie- und Gewerbeabfällen sorgten 2012 in den Drehöfen der deutschen Zementwerke für rund 61 Prozent der benötigten thermischen Energie. Ihre CO₂-Emissionen werden in der Gesamtrechnung nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe ersetzen und somit zu einer CO₂-Minderung an anderer Stelle beitragen.

Als Verwerter dieser Abfälle unterliegen die deutschen Zementwerke strengen Auflagen wie dem Bundes-Immissionsschutzgesetz. Aber auch verfahrensbedingte Immissionen von Staub oder Stickstoffoxiden unterliegen Regelungen zur Reinhaltung der Luft. Die Zementhersteller in Deutschland bekannten sich bereits vor Jahrzehnten zu ihrer Verantwortung und setzen weltweit führende Standards, wie beispielweise bei der Minderung von NO_x- oder SO₂-Emissionen. Auf den folgenden Seiten dokumentiert der VDZ Art und Umfang dieser und weiterer umweltrelevanter Emissionen für das Jahr 2012.

Düsseldorf, im Dezember 2013

Dr. Martin Schneider
Hauptgeschäftsführer
VDZ

Dear readers,

The present 14th edition of the “Environmental Data of the German Cement Industry” provides a comprehensive overview of all clinker producing works in Germany in proven form. Since September 2000, VDZ has documented the results of continuous emission monitoring as well as individual measurements of trace elements and organic gas components in German cement works.

With an average of around 178 kilograms of carbon dioxide, the specific energy-related CO₂ emission per ton of produced cement fell between 1990 and 2012 by 49 per cent. Apart from technological and process innovations and the reduction of the clinker/cement factor due to the use of other main constituents, the increased use of alternative fuels primarily helped to reduce CO₂ emissions. In 2012 waste tyres, waste oil and waste wood as well as fractions of industrial and commercial waste provided about 61 per cent of the required thermal energy in the rotary kilns of the German cement works. The CO₂ emissions from alternative fuels are not included in the total accounts, as they replace fossil fuels and therefore contribute to a CO₂ reduction elsewhere.

As co-incinerators of these wastes, German cement works are subject to strict restrictions, such as the Federal Pollution Control Act. Process-related emissions of dust or nitrogen oxides also are subject to regulations for clean air. Cement manufacturers in Germany committed themselves decades ago to upholding their responsibility and set world-leading standards in the reduction of NO_x and SO₂ emissions. On the following pages, the VDZ has documented the nature and extent of these and other environmental emissions during 2012.

Duesseldorf, December 2013

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 so genannte Portlandzementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das hauptsächlich Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO₂), Aluminiumoxid (Tonerde (Al₂O₃)) und Eisenoxid (Fe₂O₃) enthält. Kalkstein, Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, liefern diese chemischen Bestandteile. Kalkstein und Kreide bestehen aus Calciumcarbonat (CaCO₃). 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 (SiO₂), aluminium oxide (alumina (Al₂O₃)), and iron oxide (Fe₂O₃). These chemical constituents are supplied by limestone, chalk and clay or their natural blend, lime marl. Limestone and chalk are composed of calcium carbonate (CaCO₃). 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.

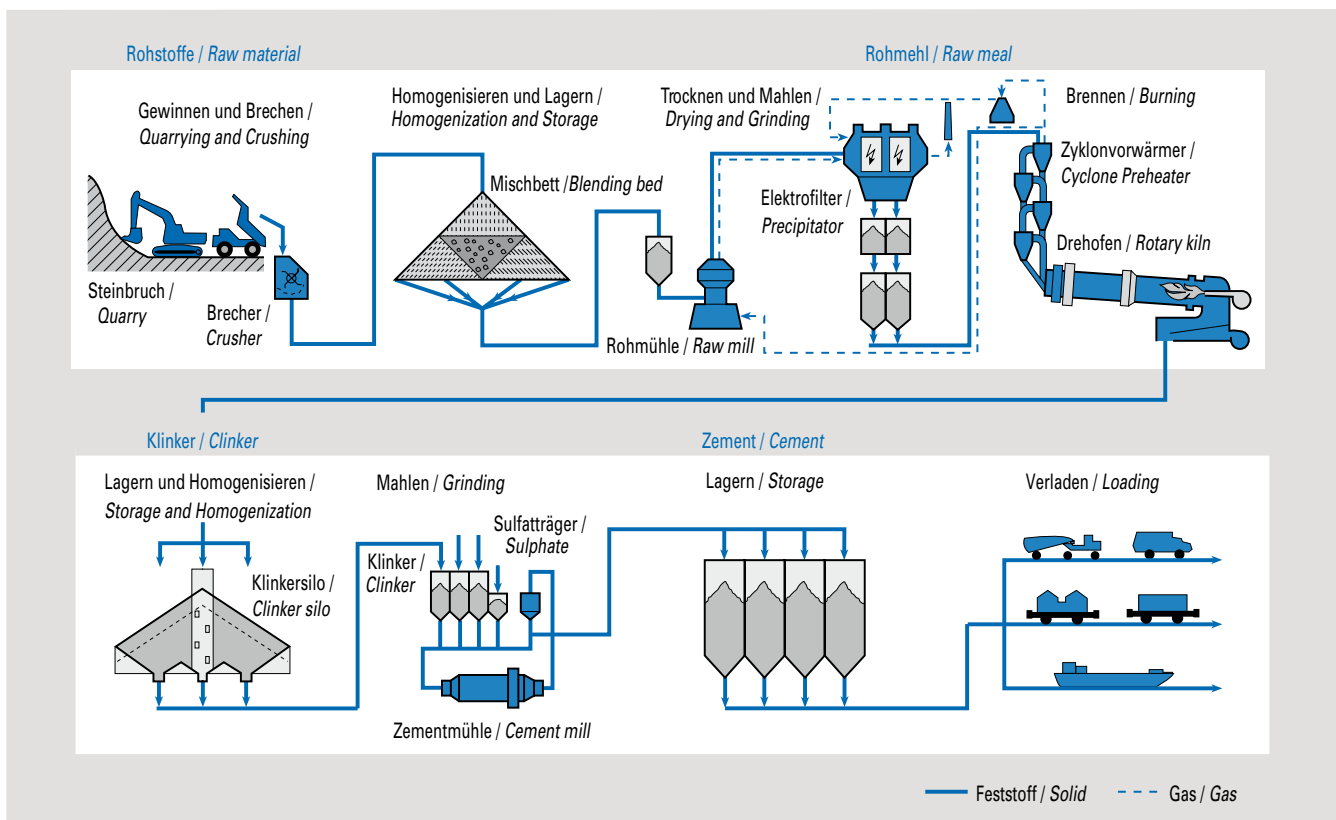


Bild 1-1: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand.
Fig. 1-1: Schematic representation of the cement manufacturing process from quarry to dispatch.

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 so genannten Klinkerphasen.

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.

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

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

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.

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.

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.

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.

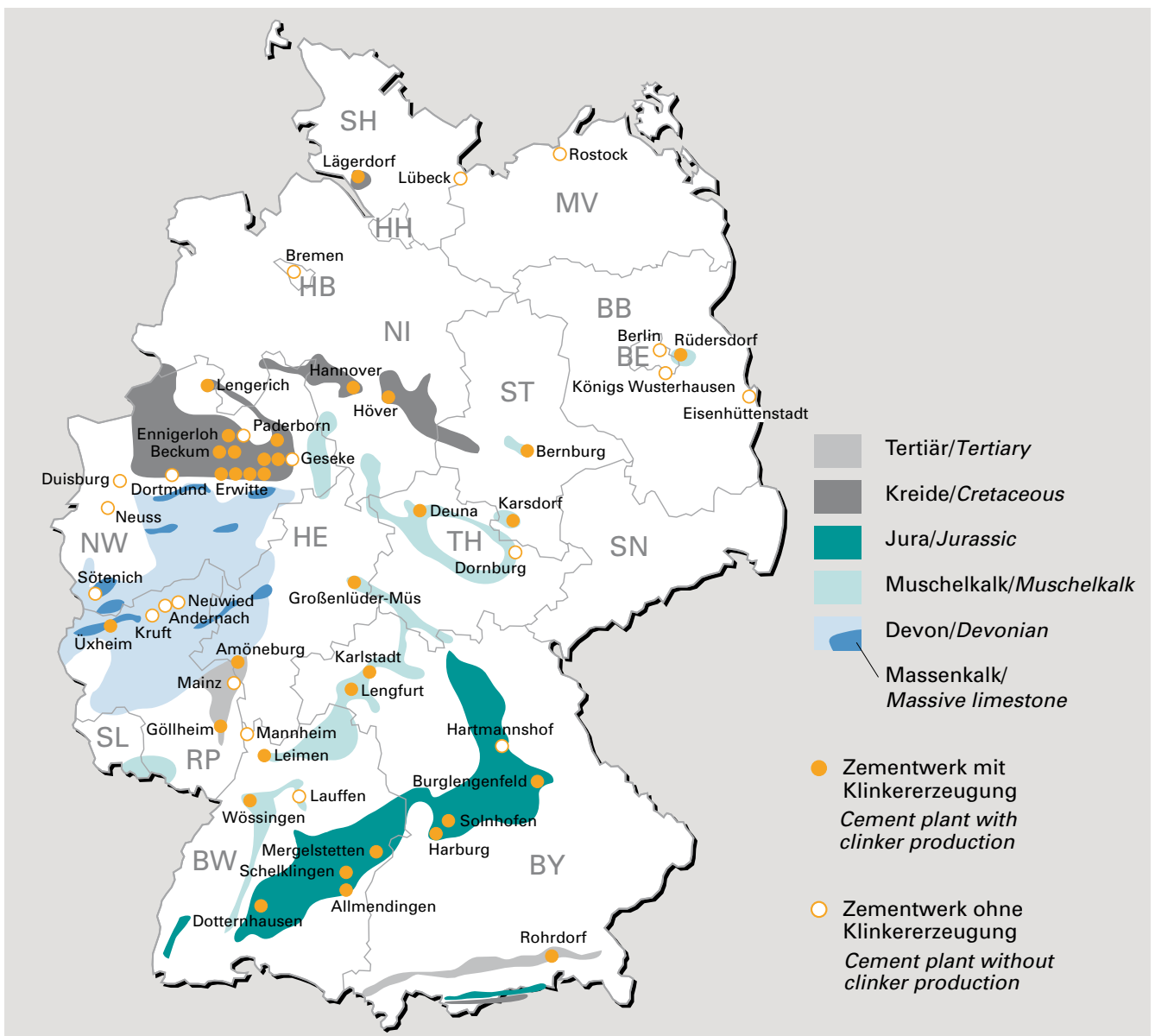


Bild 2-1: Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2012.
Fig. 2-1: Cement works in the Federal Republic of Germany in the year 2012.

2 Produktions- und Strukturdaten ■

Zement ist ein homogenes Massengut, das zu Lande per Lkw transportiert wird und deshalb hier transportkostenintensiv ist. Zement wird überwiegend zu lokalen Absatzmärkten geliefert. Die Produktionsstandorte der deutschen Zementindustrie sind gleichmäßig über das Bundesgebiet verteilt und befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den jeweiligen Kalksteinvorkommen. Im Jahr 2012 produzierten 22 Unternehmen in 54 Werken etwa 32,4 Mio. t Zement [1] (Bild 2-1).

Die Tafeln 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. 56 % sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 23 % 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 (Tafel 2-2).

Tafel 2-1: Produktion, Versand, Export und Import [1, 2].

Table 2-1: Output, deliveries, export and import [1, 2].

Jahr / Year	Zementversand / Cement deliveries				
	Klinkerproduktion / Clinker production	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
2003	25.233	28.747	4.925	33.672	1.226
2004	26.281	27.497	6.185	33.682	1.623
2005	24.378	25.615	6.749	32.364	1.427
2006	24.921	27.428	7.286	34.714	1.492
2007	26.992	26.064	8.658	34.722	1.288
2008	25.366	26.274	8.912	35.193	1.317
2009	23.232	24.057	7.354	31.411	1.199
2010	22.996	23.406	7.301	30.707	1.285
2011	24.775	26.767	7.865	34.632	1.305
2012	24.581	25.492	7.018	32.510	1.277

Quelle / Source: Außenhandelsdaten / Import / Export data: destatis

Tafel 2-2: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2011 bis 2013 [2].

Table 2-2: Number and capacity of kilns with operating permits in the Federal Republic of Germany in the years from 2011 to 2013 [2].

	Stand: 01.01.2011 / As at 01. Jan 2011			Stand: 01.01.2012 / As at 01. Jan 2012			Stand: 01.01.2013 / As at 01. Jan 2013		
	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	41	104.460	94,1	39	100.460	93,8	39	100.460	93,8
Ofen mit Rostvorwärmer/ Kilns with grate preheaters	6	5.350	4,8	6	5.500	5,1	6	5.500	5,1
Schachtofen / Shaft kilns	8	1.200	1,1	8	1.200	1,1	8	1.200	1,1
Summe / Total	55	111.010	100	53	107.160	100	53	107.160	100
mittlere Ofenkapazität in t/d / Average kiln capacity in t/d	Drehöfen / Rotary kilns	2.336		2.355		2.355		2.355	
	Schachtofen / Shaft kilns	150		150		150		150	

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 evenly all over the Federal Republic of Germany and located in the immediate vicinity of the respective limestone deposits. In 2012, 22 companies with their 54 works produced about 32.4 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 (56% of domestic cement deliveries) and the manufacturers of concrete elements (23% 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).

Tafel 2-3: Inlandsversand der Verbandsmitglieder nach Zementarten [1]

Table 2-3: Domestic deliveries classified by cement types [1].

Jahr/ Year	CEM											
	I	II	Darunter/Among					III	IV	V	Sonst./ Others	Gesamt/ Total
			II/S	II/P	II/V	II/T+ II/LL	II/M					
1.000 t												
2003	14.173	7.404	3.719	46	4	3.614	21	2.772	46	0	262	24.657
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	7.404	12.060	4.328	62	245	5.075	2.350	5.530	6	0	246	25.246

Anmerkung/Note:

CEM I = Portlandzement; CEM II/S = Portlandhüttenzement; CEM II/P = Portlandpuzzolanzenement; CEM II/V = Portlandflugaschezement;
 CEM II/T = Portlandschieferzement; CEM II/L = Portlandkalksteinzement; CEM II/M = Portlandkompositzement; CEM III = Hochofenzement;
 CEM IV = Puzzolanzenement; 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/L = 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 Tafel 3-1 werden die im Jahr 2012 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 kann 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. 78 % durch natürlichen Gips und/oder Anhydrit gedeckt. Bei dem restlichen Anteil handelt es sich um Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen.

Tafel 3-1: Rohstoffeinsatz 2012 [3].

Table 3-1: Raw materials input in 2012 [3].

Gruppe / Group	Rohstoff / Raw material	Einsatz / Input quantity 1.000 t/a
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide / Limestone / marl / chalk	39.070
	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	59
Si	Sand / Sand	1.148
	Gießereialsand / Used foundry sand	159
Si-Al	Ton / Clay	1.278
	Bentonit / Kaolinit / Bentonite / kaolinite	38
Fe	Eisenerz / Iron ore	152
	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	79
Si-Al-Ca	Hüttensand / Granulated blastfurnace slag	5.927
	Flugasche / Fly ash	222
	Ölschiefer / Oil shale	142
	Trass / Trass	23
	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	17
S	Natürlicher Gips / Natural gypsum	722
	Natürlicher Anhydrit / Natural anhydrite	476
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung / Gypsum from flue gas desulphurisation	339
Al	Einsatzstoffe aus der Metall-Industrie, wie: / Input materials from the metal industry, such as: - Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken / - residues from reprocessing salt slag - Aluminiumhydroxid / aluminium hydroxide	65

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. Hüttsand, 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 Tafel 3-2.

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage in hohem Maße alternative Brennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementindustrie betrug über 61 % im Jahr 2012. Eine Aufstellung der eingesetzten alternativen Brennstoffe sowie deren durchschnittliche Heizwerte enthält Tafel 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 2012. 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.

Tafel 3-2: Brennstoffenergieeinsatz nach Energieträgern [2].
Table 3-2: Fuel energy consumption classified by energy sources [2].

Brennstoff / Fuel		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Steinkohle / Coal	Mio. GJ/a / million GJ/a	19,1	15,5	8,7	11,4	13,9	13,9	10,2	9,0	10	9,8
	Anteil % / share %	20,9	16,3	9,8	12,4	13,5	14,5	11,6	10,2	10,6	10,4
Braunkohle / Lignite	Mio. GJ/a / million GJ/a	27,4	31,6	29,1	27,6	25,2	23,1	20,0	20,7	23,7	22,3
	Anteil % / share %	30,0	33,3	32,8	30,0	23,1	24,1	22,7	23,5	25,1	23,7
Petrolkoks / Petcoke	Mio. GJ/a / million GJ/a	5,7	3,8	4,2	4,4	5,6	4,9	4,4	3,3	2,1	3,2
	Anteil % / share %	6,2	4,0	4,7	4,7	5,6	5,1	5,0	3,8	2,2	3,4
Heizöl S / Heavy fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	2,7	2,6	2,2	1,9	2,1	0,9	1,1	0,6	0,4	0,3
	Anteil % / share %	3,0	2,7	2,5	2,0	2,1	0,9	1,2	0,6	0,5	0,4
Heizöl EL / Fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,7
	Anteil % / share %	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,7
Erdgas u.a. Gase / Natural gas and other gases	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,3	0,5	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2
	Anteil % / share %	0,3	0,5	0,6	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2
Sonstige fossile Brennstoffe / Other fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,8	0,7	0,5	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,1	0,1
	Anteil % / share %	0,9	0,7	0,6	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,1	0,2
Fossile Brennstoffe gesamt / Total fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	56,4	54,9	45,4	46	47,3	43,7	36,7	34,4	36,7	36,6
	Anteil % / share %	61,8	57,9	51,2	50,0	47,5	45,6	41,6	39,0	38,9	39,0
Alternative Brennstoffe gesamt / Total alternative fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	34,9	40	43,3	46,1	52,2	52,1	51,5	53,7	57,8	57,3
	Anteil % / share %	38,2	42,1	48,8	50,0	52,2	54,4	58,4	61,0	61,1	61,0
Thermische Energie gesamt / Total thermal energy consumption	Mio. GJ/a / million GJ/a	91,3	94,9	88,7	92,1	99,5	95,8	88,2	88,1	94,4	93,9
	Anteil % / share %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tafel 3-3: Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe 2012 [3].

Table 3-3: Used quantity and average calorific value of alternative fuels in 2012 [3].

Alternativbrennstoff / Alternative fuel	1.000 t/a	MJ/kg
Altreifen / Waste tyres	234	28
Altöl / Waste oil	56	26
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbe- abfällen / Fractions of industrial and commercial waste	-	-
- Zellstoff, Papier und Pappe / - Pulp, paper and cardboard	96	4
- Kunststoff / - Plastics	474	23
- Verpackungen / - Packaging	-	-
- Abfälle aus der Textilindustrie / - Wastes from the textile industrie	3	17
- Sonstige / - Others	1.246	21
Tiermehle und -fette / Meat and bone meal and animal fat	176	18
Aufbereitete Fraktionen aus Sied- lungsabfällen / Mixed fractions of municipal waste	352	15
Altholz / Waste wood	8	14
Lösungsmittel / Solvents	96	22
Bleicherde / Fuller's earth	-	-
Klärschlamm / Sewage sludge	310	4
Sonstige, wie: / Others, such as:	54	9
- Ölschlamm / oil sludge		
- Organische Destillations- rückstände / organic distillation residues		

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 78% 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.

Apart from fossil fuels, the use of alternative fuels in the clinker burning process is gaining in importance nowadays. Alternative fuels accounted over 61% of the total fuel energy demand of the German cement industry in 2012. Table 3-3 lists the alternative fuels utilised and their average calorific values.

4 Energie ■

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurden in Deutschland 2012 durchschnittlich 2.866 MJ Brennstoffenergie und 110,8 kWh elektrische Energie eingesetzt (Tafeln 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/t Zement.

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 [4, 6, 7].

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 aufgemahlten leistungsstarken Zementen in der Baustoffindustrie.

Tafel 4-1: Absoluter und spezifischer thermischer Brennstoffenergieeinsatz [2].

Table 4-1: Absolute and specific thermal fuel energy demand [2].

Jahr / Year	thermischer Brennstoffenergieeinsatz <i>Thermal fuel energy demand</i>	
	absolut in Mio. GJ/a <i>Absolute in million GJ/a</i>	spezifisch in MJ/t Zement <i>Specific in MJ/t cement</i>
1990	109,5	3.200
1991	–	–
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

12

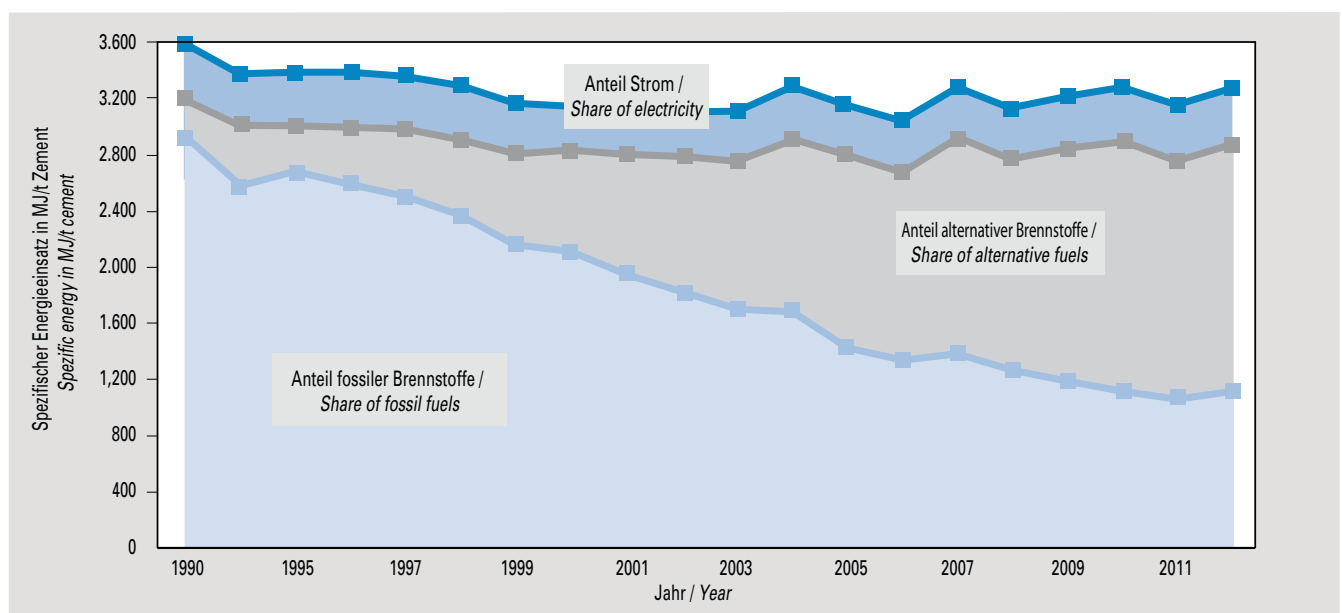


Bild 4-1: Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes [2].
Fig. 4-1: Development of the specific fuel energy demand [2].

Tafel 4-2: Absoluter und spezifischer elektrischer Energieeinsatz [2].
Table 4-2: Absolute and specific electrical power demand [2].

Jahr / Year	elektrischer Energieeinsatz Electrical power demand	
	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
1991	–	–
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

4 Energy ■

In Germany, the production of one tonne of cement consumed an average of 2,866 MJ fuel energy and 110.8 kWh electrical energy in 2012 (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 demand 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 demand. After that the cement specific fuel energy demand 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 demand is covered by fossil fuels today. The high energy efficiency of the cement production process was not affected by this substitution [4, 6, 7].

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.

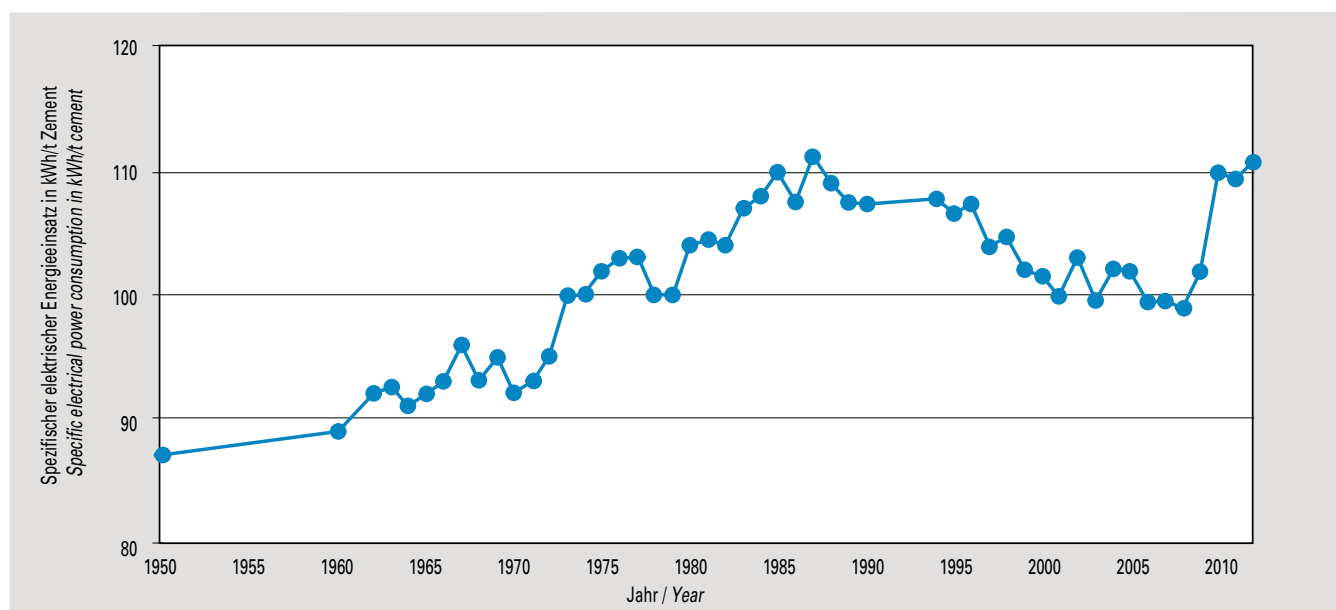


Bild 4-2: Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes (Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987) [2].
Fig. 4-2: Development of the specific electrical power demand (New Federal States included since 1987) [2].

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 einzuhaltenen 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 (Tafel 5-1). Kontinuierlich werden hauptsächlich Staub, NO_x, SO₂ sowie vermehrt Hg, NH₃ 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 1 m³ 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, SO₂ as well as more and more Hg, NH₃ 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 m³ 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,

Tafel 5-1: Messverfahren für Emissionen.

Table 5-1: Emission measuring methods.

Messobjekt / <i>Object of measurement</i>	Norm, Richtlinie / <i>Standard, guideline</i>
Gesamtstaub / <i>Total dust</i>	DIN EN 13284-1
Schwermetalle / <i>Heavy metals</i>	DIN EN 13211, 14385
Schwefeldioxid / <i>Sulphur dioxide</i>	DIN EN 14791
Stickstoffoxide / <i>Nitrogen oxides</i>	DIN EN 14792
Kohlenstoffmonoxid / <i>Carbon monoxide</i>	DIN EN 15058
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / <i>Gaseous inorganic chlorine compounds</i>	DIN EN 1911, Teil 1 - 3
Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / <i>Gaseous inorganic fluorine compounds</i>	VDI 2470, Blatt 1
Dioxine, Furane / <i>Dioxins, furans</i>	
- Probenahme / - <i>Sampling</i>	DIN EN 1948, Teil 1
- Analyse / - <i>Analysis</i>	DIN EN 1948, Teil 2 - 3
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / <i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>	DIN EN 1948 Teil 1 VDI 3873, Blatt 1
Polychlorierte Biphenyle / <i>Polychlorinated biphenyls</i>	DIN EN 1948, Teil 4
Organisch gebundener Kohlenstoff / <i>Total gaseous organic carbon</i>	DIN EN 12619
Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / <i>Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene</i>	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 z. T. auch deutlich niedrigere Nachweisgrenzen genannt; sie beziehen sich dann jedoch i. Allg. nur auf den analytischen Teil des Prüfverfahrens.

In den letzten Jahren bestimmte die Europäische Union in zunehmendem Maße 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 t 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.

Tafel 5-2: Schwellenwerte zur Berichtspflicht für 19 relevante Luftschadstoffe des europäischen Schadstofffreisetzung- und verbringungsregisters (Anhang II der E-PRTR-Verordnung [6])

Table 5-2: Threshold values for mandatory reporting on 19 relevant air pollutants covered by the European Pollutant Release and Transfer Register (Annex II of the E-PRTR Regulation [6])

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)	0,0001
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 (Tafel 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 -Gesamtemissi-

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.

Tafel 5-3: CO_2 -Emissionen der Zementindustrie [2]. / Table 5-3: CO_2 emissions by the cement industry [2].

spezifische CO_2 -Emissionen / Specific CO_2 emissions					
Jahr / Year	Thermisch bedingt ¹⁾ / Thermal energy-related ¹⁾	Elektrisch bedingt / Electrical energy-related	Rohstoff-bedingt / Raw-material-related	Summe / Total	Einheit / Unit
1996	0,245	0,072	0,451	0,768	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
1997	0,231	0,070	0,453	0,754	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
1998	0,218	0,070	0,444	0,732	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
1999	0,199	0,068	0,427	0,694	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2000	0,195	0,068	0,431	0,694	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2001	0,179	0,067	0,415	0,661	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2002	0,168	0,069	0,413	0,650	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2003	0,156	0,067	0,401	0,624	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2004	0,155	0,068	0,428	0,651	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2005	0,132	0,068	0,406	0,606	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2006	0,123	0,067	0,383	0,573	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2007	0,128	0,067	0,419	0,614	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2008	0,117	0,066	0,388	0,571	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2009	0,110	0,068	0,398	0,575	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2010	0,104	0,074	0,398	0,575	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2011	0,100	0,073	0,383	0,556	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement
2012	0,103	0,074	0,398	0,576	t CO_2 / t Zement / t CO_2 / t cement

¹⁾ nur Regelbrennstoffe / ¹⁾ only regular fuels

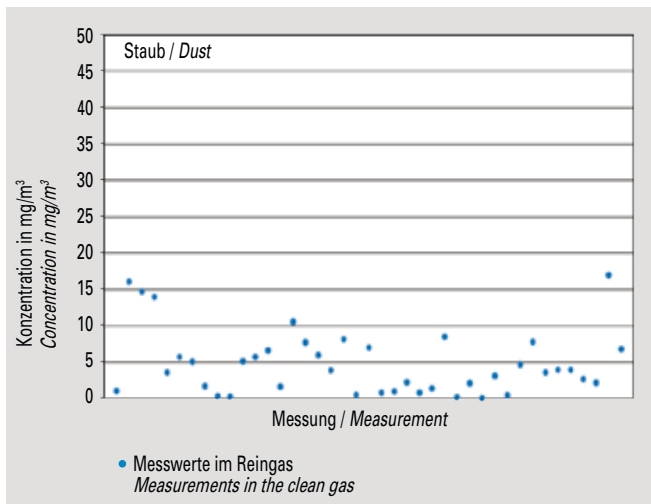


Bild 5-1: Mittelwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Staub im Reingas von 41 Drehofenanlagen.

Fig. 5-1: Average (year 2012) dust concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns.

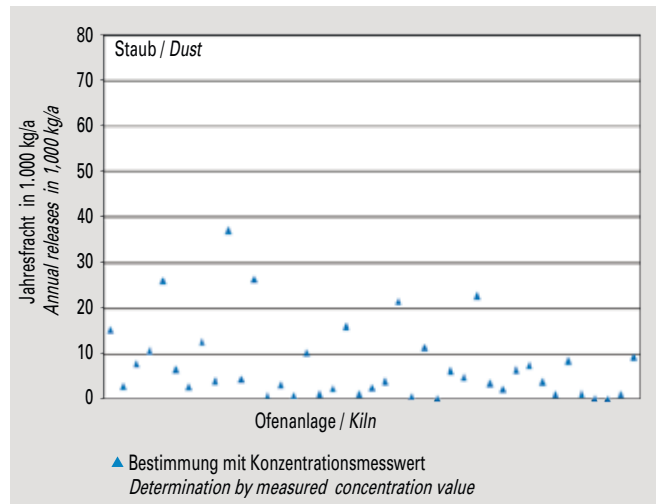


Bild 5-2: Emissionen von Staub (Jahresfracht 2012) von 41 Drehofenanlagen.

Fig. 5-2: Dust emissions (annual releases in 2012) of 41 rotary kilns.

onen. Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Tafel 5-3 werden die CO₂-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 CO₂-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2008/2012 vor. Die deutsche Zementindustrie hat ihr Ziel im Jahr 2012 erfüllt.

Am 01.01.2005 wurde in der EU ein Handelssystem für CO₂-Emissionen eingeführt. Der Emissionshandel erstreckt sich auf die direkten CO₂-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 CO₂-Emissionen aus alternativen Brennstoffen wurden hierbei nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe ersetzen und somit zu einer CO₂-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 t Portlandzement müssen während der Produktion ca. 1,5 bis 1,7 t Rohmaterialien, bis zu 0,15 t Kohle sowie 0,95 t 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 mg/m³ kam, ist es heute möglich, sie auf 10-20 mg/m³ zu begrenzen. 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 CO₂ emissions from 1990 to 2008/2012. 2012, the German cement industry has achieved this target.

On January 1, 2005 a trading system for CO₂ emissions was introduced in the EU. Direct CO₂ 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. CO₂ emissions from the combustion of alternative fuels have not been taken into account, because they substitute fossil fuels and thereby reduce CO₂ 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 mg/m³ were measured at the stack of cement rotary kiln plants as recently as in the 1950ies, these can be limited to 10-20 mg/m³ 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 Industrieemissions-Richtlinie 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 2012 wurden zehn Anlagen mit gestufter Verbrennung und 38 Anlagen mit SNCR-Verfahren betrieben. Weiterhin sind zwei Anlagen zur Demonstration der 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).

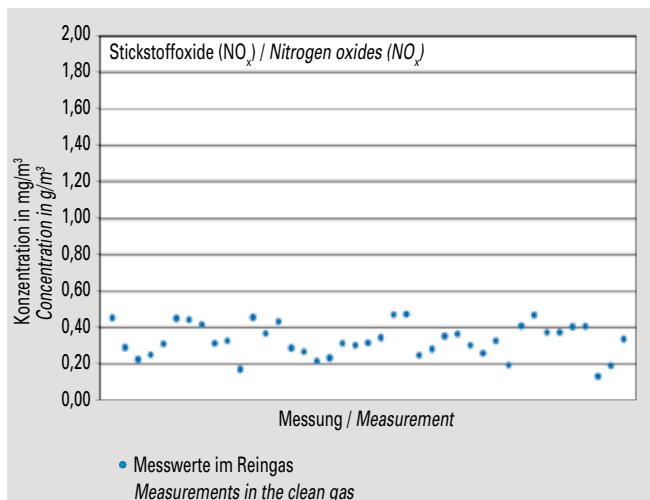


Bild 5-3: Mittelwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO_x) im Reingas von 41 Drehofenanlagen.
 Fig. 5-3: Average nitrogen oxides (NO_x) concentrations (year 2012) in the clean gas of 41 rotary kilns.

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 2012, ten plants were equipped with staged combustion, and the SNCR technique was applied at about 38 plants. Furthermore two plants are in operation to demonstrate the SCR technology.

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

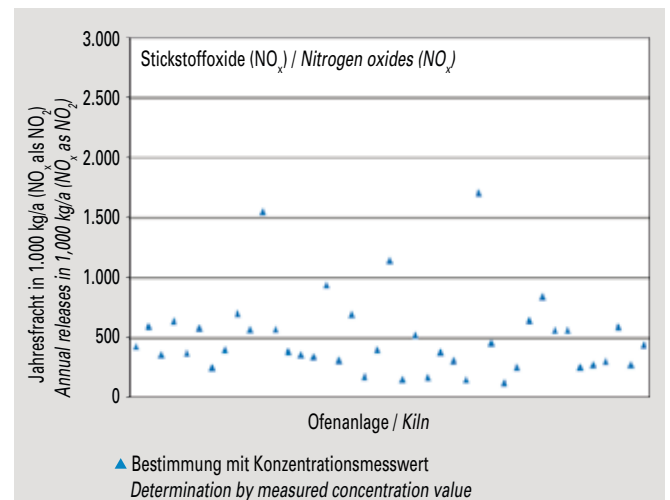


Bild 5-4: Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) von 41 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
 Fig. 5-4: Nitrogen oxides NO_x emissions (annual releases in 2012) of 41 rotary kilns.

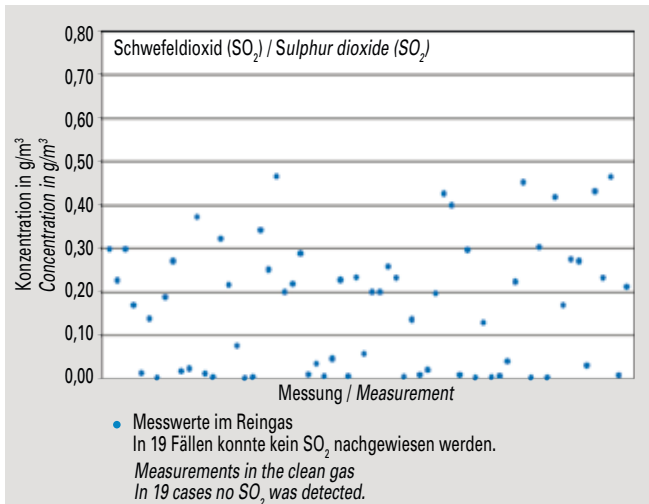


Bild 5-5: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Schwefeldioxid (SO₂) im Reingas von 41 Drehofenanlagen.
Fig. 5-5: Sulphur dioxide (SO₂) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 41 rotary kilns.

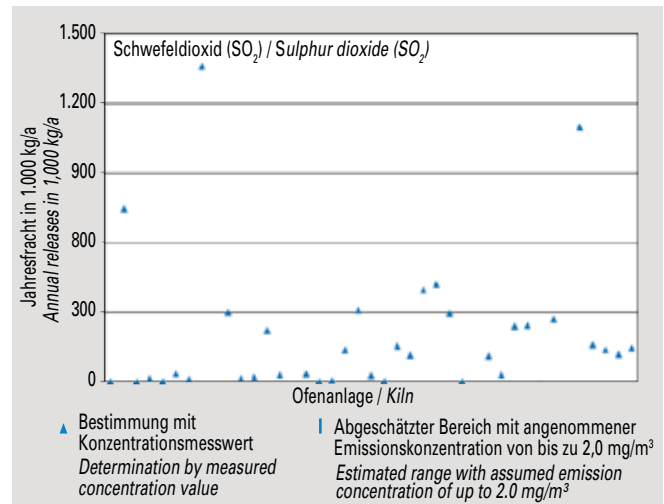


Bild 5-6: Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂) von 41 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-6: Sulphur dioxide (SO₂) emissions (annual releases in 2012) of 41 rotary kilns.

5.4 Schwefeldioxid (SO₂)

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 SO₂-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 SO₂ 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 SO₂-Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu 1,2 g/m³ betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO₂-Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11 Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der SO₂-Emissionen eingesetzt.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung im Drehofen vollständig zu SO₂ umgewandelt. Dieses SO₂ reagiert im Vorwärmer- und Ofenbereich zu Alkalisulfaten, die überwiegend im Klinker gebunden werden.

Bild 5-5 zeigt 85 Werte aus Messungen im Reingas von 41 Ofenanlagen. In 19 Fällen konnte kein SO₂ nachgewiesen werden.

Bild 5-6 zeigt die SO₂-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 41 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.

5.4 Sulphur dioxide (SO₂)

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 SO₂ 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 SO₂ 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, SO₂ emission concentrations can total up to 1.2 g/m³ depending on the site location. The cement industry has made great efforts to reduce SO₂ emissions. For example, lime hydrate is utilised at 11 kiln systems to lower SO₂ emissions.

The sulphur input with the fuels is completely converted to SO₂ during combustion in the rotary kiln. In the area of the preheater and the kiln, this SO₂ reacts to form alkali sulphates, which are predominantly bound in the clinker.

Figure 5-5 shows 85 values from measurements in the clean gas at 41 rotary kilns. In 19 cases no SO₂ was detected.

Figure 5-6 shows the SO₂ emissions (annual releases in 2012) of 41 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.

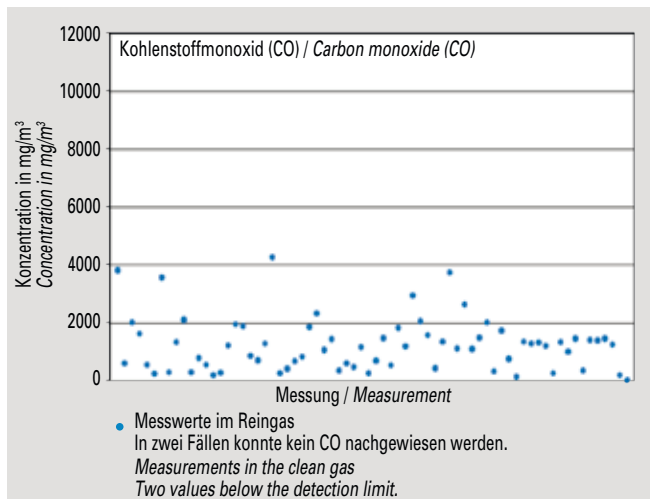


Bild 5-7: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid (CO) im Reingas von 35 Drehofenanlagen.
Fig. 5-7: Carbon monoxide (CO) concentration values measured in the clean gas of 35 rotary kilns.

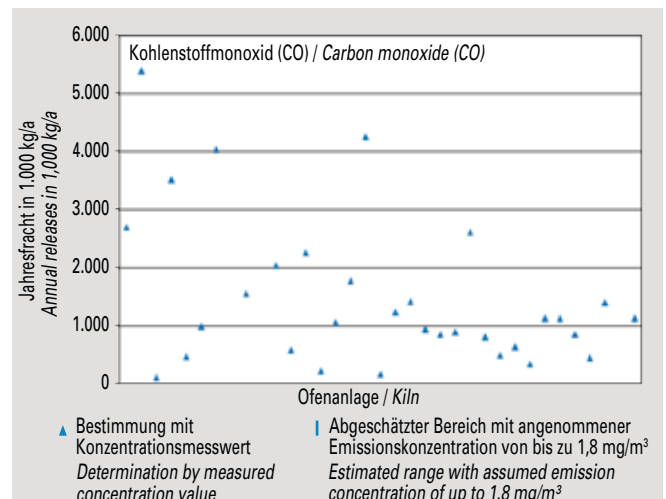


Bild 5-8: Emissionen von Kohlenstoffmonoxid (CO) von 35 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-8: Carbon monoxide (CO) emissions (annual releases in 2012) of 35 rotary kilns.

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 langen Verweilzeiten im Hochtemperaturbereich führt dies zu einem vollständigen Brennstoffausbrand. Die auftretenden Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und organischem Gesamtkohlenstoff stammen daher nicht aus der Verbrennung, sondern aus der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer.

Ursache der Emissionen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff beim Klinkerbrennprozess sind v.a. 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 Brenngutes 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 72 Werte aus Messungen im Reingas von 35 Ofenanlagen. Zwei Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 1,8 und 2,5 mg/m³. Bild 5-8 zeigt die CO-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 35 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 76 Werte aus Messungen im Reingas von 34 Ofenanlagen. Ein Wert unterschritt die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 1,5 und 2,1 mg/m³. Bild 5-10 zeigt die Emissionen von organischem Gesamtkohlenstoff (Jahresfracht 2012) von 34 Drehofenanlagen. Der Bereich möglicher Emissionen ist in diesen Fällen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 1,5 mg/m³ berechnet wurde.

5.5 Carbon monoxide (CO) and total organic carbon (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 concert with long residence times in the high-temperature range, this leads to complete fuel burn-up. The occurring emissions of carbon monoxide and total carbon do not result from combustion, but from the thermal decomposition of organic compounds of the raw material in the preheater.

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 72 values from measurements in the clean gas at 35 rotary kilns. Two values were below the detection limit, which ranges between 1.8 and 2.5 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-8 shows the CO emissions (annual releases in 2012) of 35 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 76 values from measurements in the clean gas at 34 rotary kilns. One value was below the detection limit, which ranges between 1.5 and 2.1 mg/m³ depending on the measurement. Figure 5-10 shows the total organic carbon emissions (annual releases in 2012) 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 1.5 mg/m³.

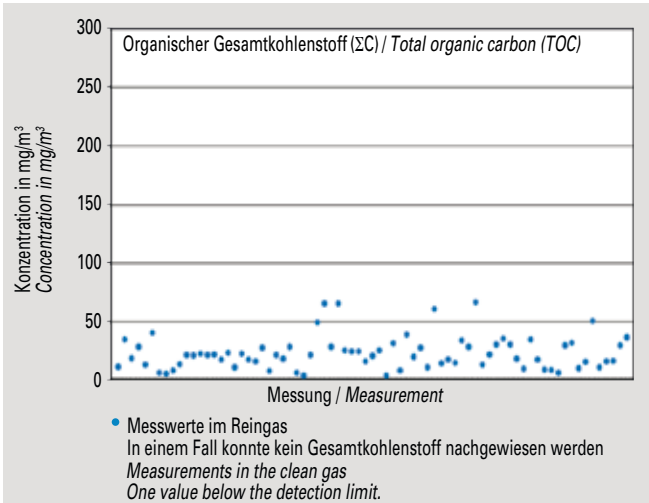


Bild 5-9: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von organischem Gesamtkohlenstoff (ΣC) im Reingas von 34 Drehofenanlagen.
Fig. 5-9: Total organic carbon (TOC) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 34 rotary kilns.

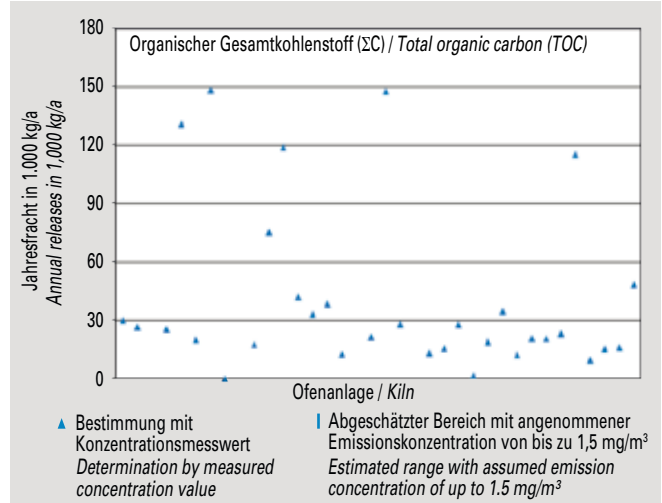


Bild 5-10: Emissionen von organischem Gesamtkohlenstoff (ΣC) von 34 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-10: Total organic carbon (TOC) emissions (annual releases in 2012) of 34 rotary kilns.

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-

5.6 Dioxins and furans (PCDD/F)

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 $\pm 0.05 ng ITEQ/m^3$ ($ITEQ$: international toxicity equivalent).

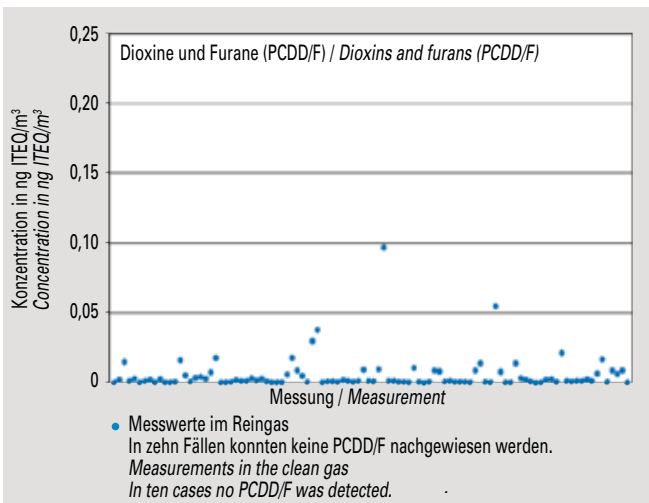


Bild 5-11: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.
Fig. 5-11: Dioxin and furan (PCDD/F) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

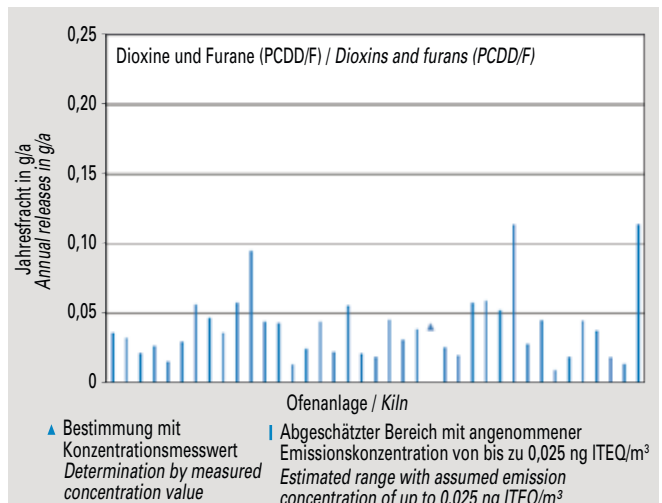
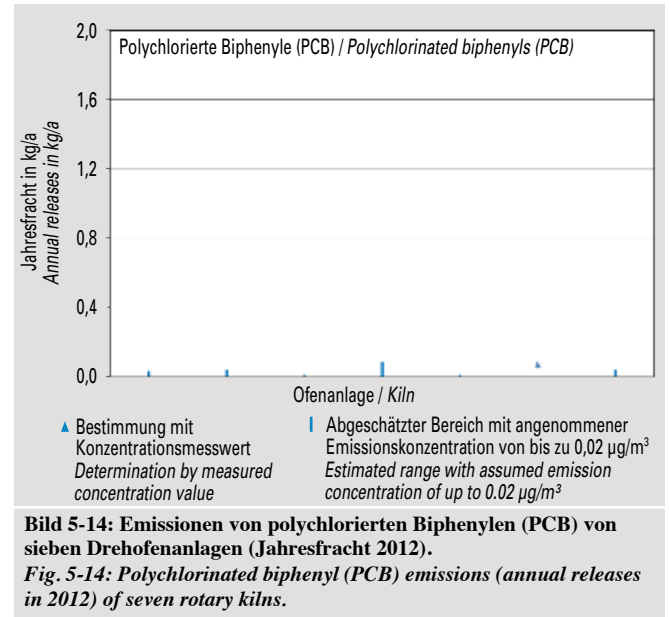
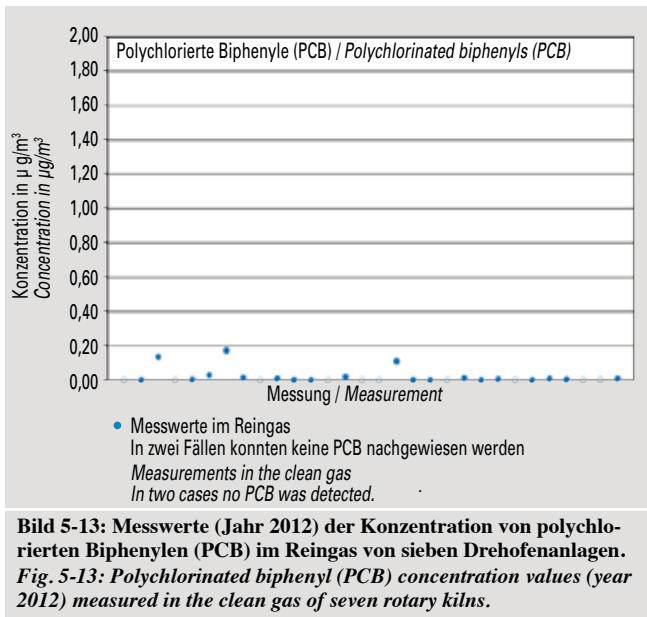


Bild 5-12: Emissionen von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-12: Dioxin and furan emissions (annual releases in 2012) of 39 rotary kilns.



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

Im Bild 5-11 sind 112 Messwerte aus 2012 im Reingas von 39 Ofenanlagen dargestellt. In 10 Fällen konnte kein PCDF/F nachgewiesen werden.

Bild 5-12 zeigt die Dioxin- und Furan-Emissionen (Jahresfracht 2012) 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 32 Werte aus Messungen im Reingas von sieben Ofenanlagen, 20 Werte nach DIN, zwölf Werte nach WHO. In zwei 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 2012) von sieben 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.

Figure 5-11 shows 112 values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns. In ten cases no PCDD/F was detected.

Figure 5-12 shows dioxin and furan emissions (annual releases in 2012) 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 32 values from measurements in the clean gas at seven rotary kilns, 20 values acc. to DIN, 12 values acc. to WHO. In two 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 2012) of seven 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.

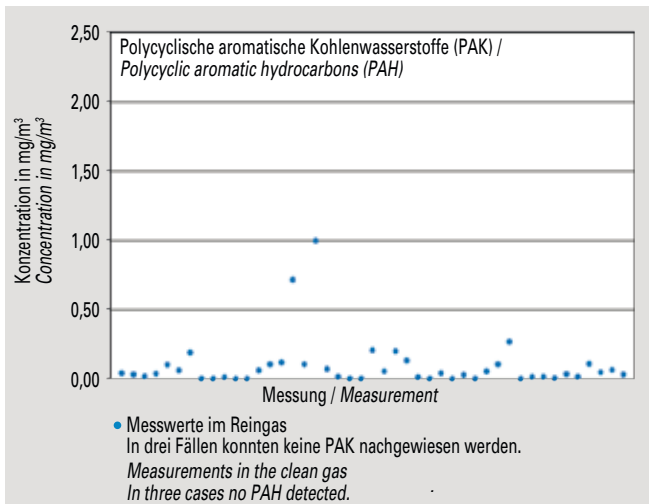


Bild 5-15: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von PAK (nach EPA 610) im Reingas von 14 Drehofenanlagen.
Fig. 5-15: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610) concentration values (year 2012) in the clean gas of 14 rotary kilns.

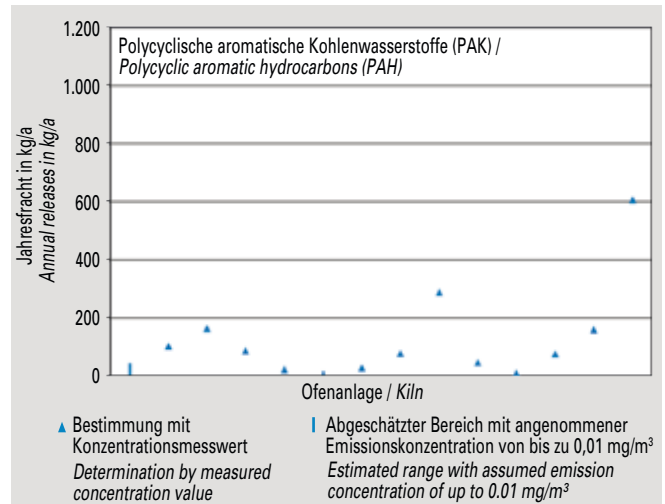


Bild 5-16: Emissionen von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) von 14 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-16: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610) emissions (annual releases in 2012) of 14 rotary kilns.

5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegt i. Allg. 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 48 Werte aus Messungen im Reingas von 14 Ofenanlagen. In drei Fällen konnten keine PAK nachgewiesen werden.

Bild 5-16 zeigt die PAK-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 14 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 o. g. Verbindungen i. Allg. 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 2012 wurden 38 Werte aus Messungen im Reingas von 10 Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-17).

Bild 5-18 zeigt die BTEX-Emissionen (Jahresfracht 2012) von zehn Drehofenanlagen.

5.8 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)

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 48 values from measurements in the clean gas at 14 rotary kilns. In three cases no PAH was detected.

Figure 5-16 shows the PAH emissions (annual releases in 2012) of 14 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 38 values from measurements in the clean gas at ten rotary kilns.

Figure 5-18 shows the BTEX emissions (annual releases in 2012) of ten rotary kilns.

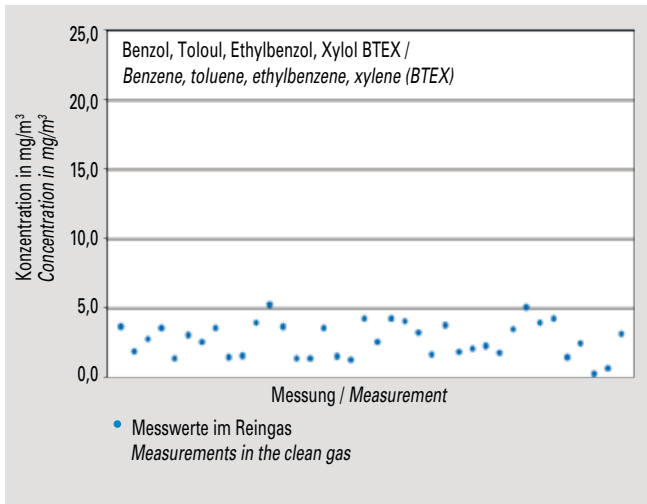


Bild 5-17: Messwerte (2012) der Konzentration von Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) im Reingas von 10 Drehofenanlagen.
Fig. 5-17: Benzene, Toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 10 rotary kilns.

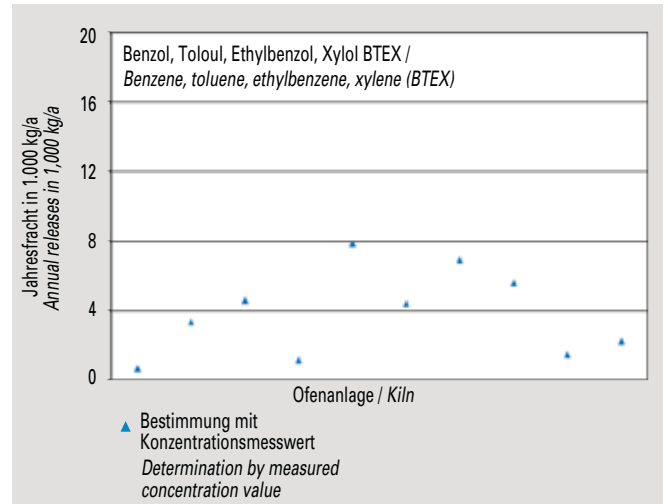


Bild 5-18: Emissionen von Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX) von 10 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-18 Benzene, Toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) emissions (annual releases in 2012) of 10 rotary kilns.

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 89 Werte aus Messungen im Reingas von 25 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 2012) von 25 Drehofenanlagen.

5.10 Benzene

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 89 values from measurements in the clean gas at 25 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 2012) of 25 rotary kilns.

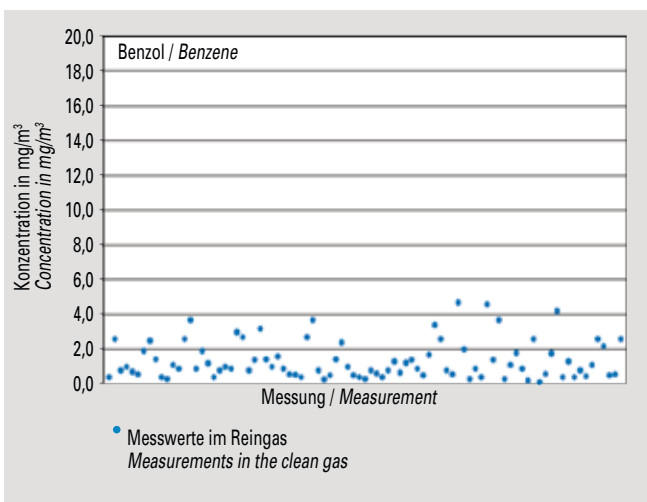


Bild 5-19: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Benzol im Reingas von 25 Drehofenanlagen.
Fig. 5-19: Benzene concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 25 rotary kilns.

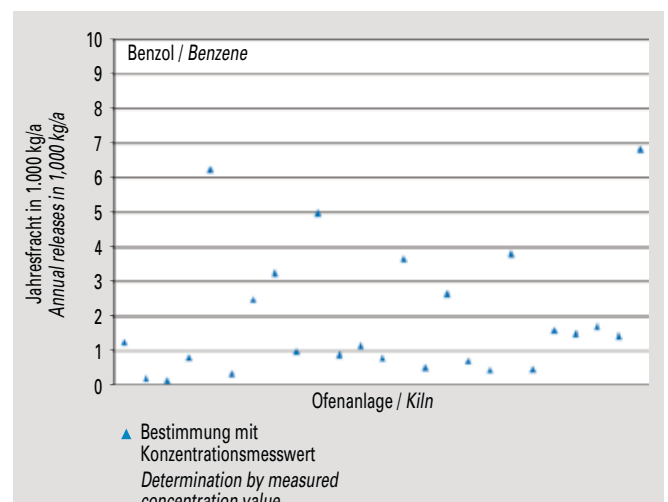


Bild 5-20: Emissionen von Benzol (Jahresfracht 2012) von 25 Drehofenanlagen.
Fig. 5-20: Benzene emissions (annual releases in 2012) of 25 rotary kilns.

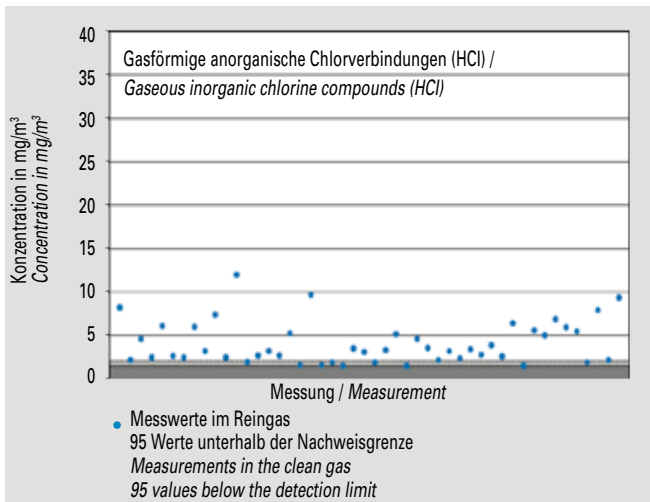


Bild 5-21: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentrationen gasförmiger anorg. Chlorverbindungen (HCl) im Reingas von 39 Drehofenanlagen.
Fig. 5-21: Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 39 rotary kilns.

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 i. Allg. auf feinste Kornfraktionen von Alkalichloriden im Reingasstaub zurückzuführen. Sie können Messgasfilter passieren und das Vorliegen der gasförmigen Verbindungen vortäuschen.

Bild 5-21 zeigt 143 Werte aus Messungen im Reingas von 39 Ofenanlagen. 95 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 1,5 und 2,1 mg/m^3 .

Bild 5-22 zeigt die HCl-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 39 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von 1,5 mg/m^3 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 Calcium-Überschusses praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das

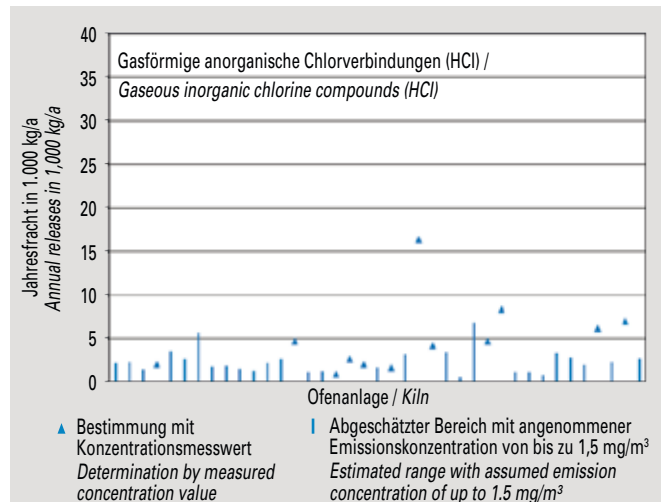


Bild 5-22: Emissionen von gasförmigen anorganischen Chlorverbindungen (HCl) von 39 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-22: Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl) emissions (annual releases in 2012) of 39 rotary kilns.

5.11 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)

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 143 values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns. 95 values were below the detection limit, which ranges between 1.5 and 2.1 mg/m^3 depending on the measurement.

Figure 5-22 shows the HCl emissions (annual releases in 2012) 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 1.5 mg/m^3 .

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

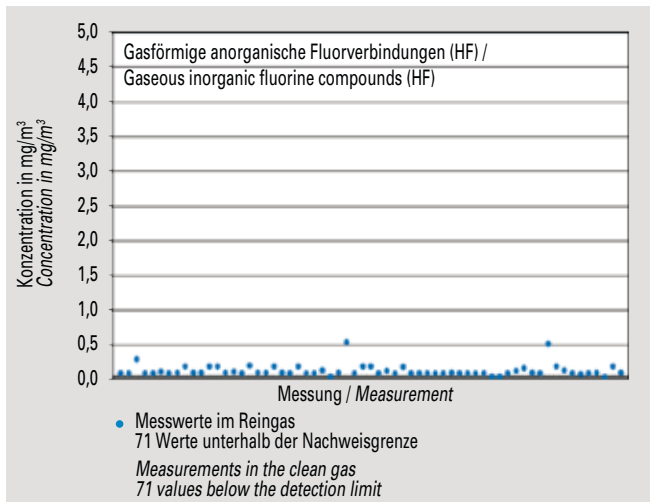


Bild 5-23: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration gasförm. anorg. Fluorverbindungen (HF) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.
Fig. 5-23: Gaseous inorganic fluorine compounds (HF) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

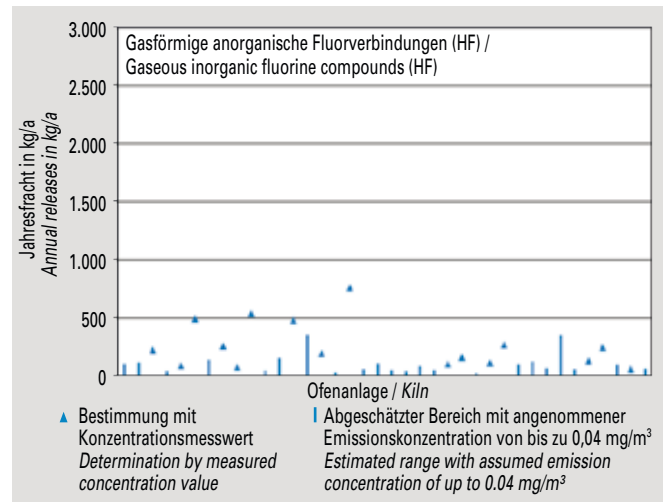


Bild 5-24: Emissionen von gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen (HF) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-24: Gaseous inorganic fluorine compounds (HF) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

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

Bild 5-23 zeigt 134 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen. 71 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen $0,04$ und $0,06 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Bild 5-24 zeigt die HF-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von $0,04 \text{ mg}/\text{m}^3$ 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. Tafel 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 Tafel 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

filter may simulate low contents of gaseous fluorine compounds in rotary kiln systems of the cement industry.

Figure 5-23 shows 134 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 71 values were below the detection limit, which ranges between $0,04$ and $0,06 \text{ mg}/\text{m}^3$ depending on the measurement.

Fig. 5-24 shows the HF emissions (annual releases in 2012) 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 $0,04 \text{ mg}/\text{m}^3$.

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.

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, so dass 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 2012 gemessenen Werte der in der 17. BImSchV genannten Spurenelemente nur in ca. 22 % aller Fälle oberhalb der Nachweisgrenze.

Under the conditions prevailing in the clinker burning process, 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 2012 of the trace elements listed in the German regulation on waste incineration (17th BImSchV) were above the detection limit in merely about 22% of all cases.

Tafel 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

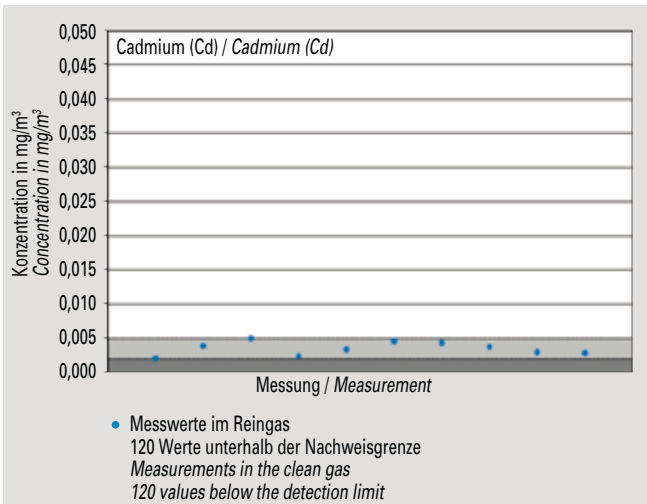


Bild 5-25: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Cadmium (Cd) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.
Fig. 5-25: Cadmium (Cd) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

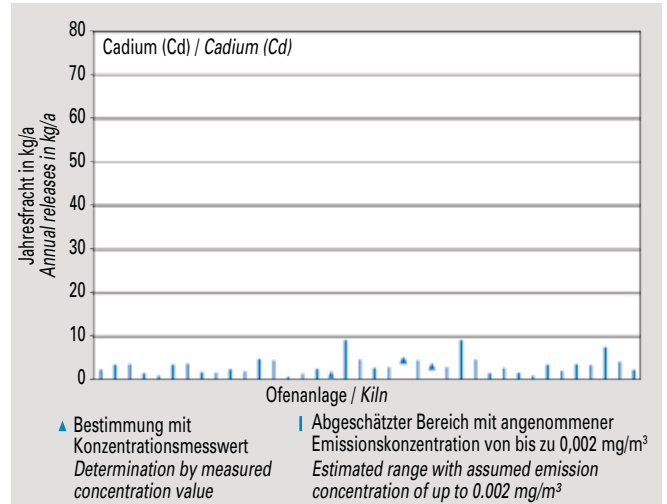


Bild 5-26: Emissionen von Cadmium (Cd) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-26: Cadmium (Cd) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

5.13.1 Cadmium (Cd)

In 2012 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 120 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 2012) von 38 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.

5.13.1 Cadmium (Cd)

Figure 5-25 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 120 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 2012) 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 0.002 mg/m³.

5.13.2 Thallium (Tl)

In 2012 wurden 127 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 123 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 2012) 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.

5.13.2 Thallium (Tl)

Figure 5-27 shows 127 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 123 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 2012) 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.

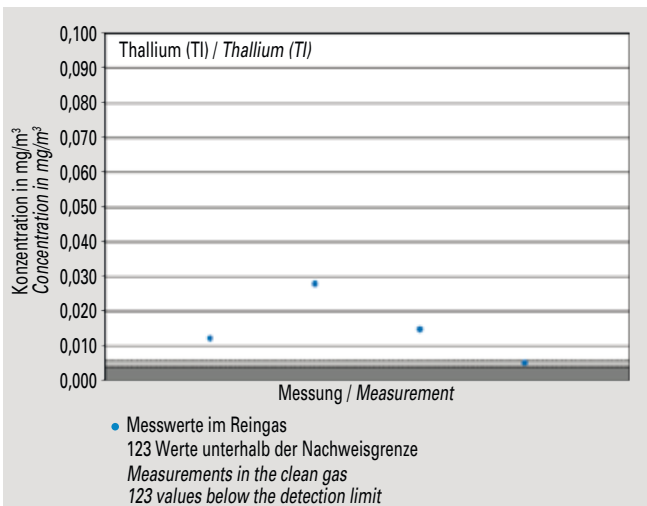


Bild 5-27: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Thallium (Tl) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.
Fig. 5-27: Thallium (Tl) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

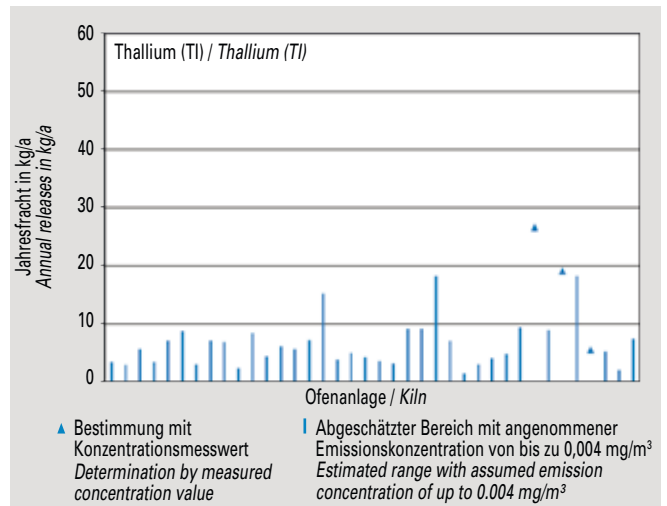


Bild 5-28: Emissionen von Thallium (Tl) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-28: Thallium (Tl) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

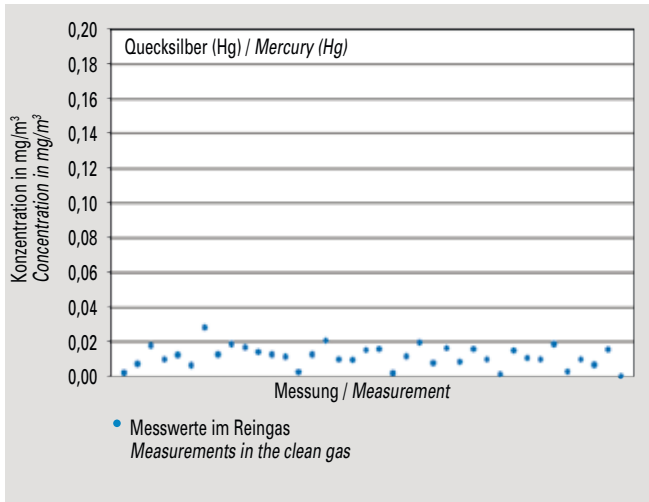


Bild 5-29: Mittelwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Quecksilber (Hg) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-29: Mercury (Hg) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

5.13.3 Quecksilber (Hg)

In 2012 wurden 38 Jahresmittelwerte aus kontinuierlicher Überwachung von 38 Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-29). Bild 5-30 zeigt die Quecksilber-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 38 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von $0,003 \text{ mg/m}^3$ berechnet wurde.

5.13.4 Antimon (Sb)

In 2012 wurden 121 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Ofenanlagen ermittelt. 121 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen $0,005$ und $0,008 \text{ mg/m}^3$ (Bild 5-31). Bild 5-32 zeigt die Antimon-Emissionen (Jahresfracht 2012) von 36 Drehofenanlagen. Bei Messungen unterhalb der Nachweisgrenze wurde der Bereich möglicher Emissionen als Linie dargestellt, deren Obergrenze mit einer Konzentration von $0,005 \text{ mg/m}^3$ berechnet wurde.

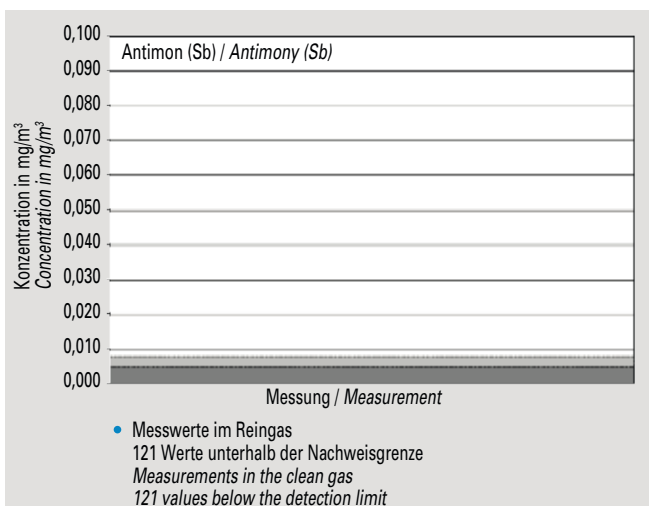


Bild 5-31: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Antimon (Sb) im Reingas von 36 Drehofenanlagen.

Fig. 5-31: Antimony (Sb) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 36 rotary kilns.

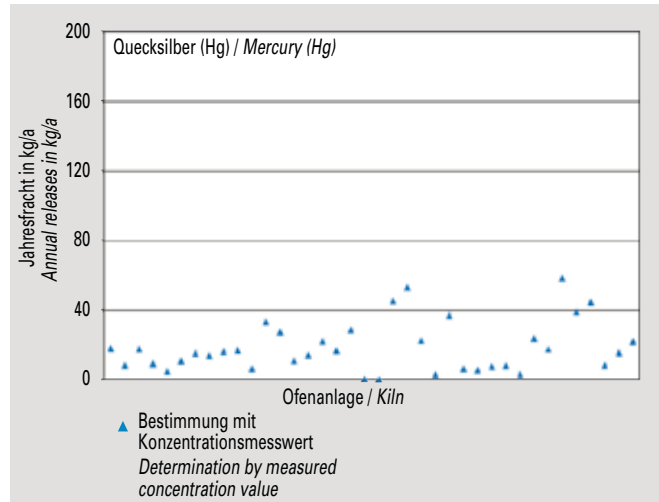


Bild 5-30: Emissionen von Quecksilber (Hg) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-30: Mercury (Hg) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

5.13.3 Mercury (Hg)

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 2012) of 38 rotary kilns. If the values measured are below the detection limit, the releases can only be estimates. 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 0.003 mg/m^3 .

5.13.4 Antimony (Sb)

Figure 5-31 shows 121 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns. 121 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m^3 depending on the measurement. Figure 5-32 shows the antimony emissions (annual releases in 2012) of 36 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/m^3 .

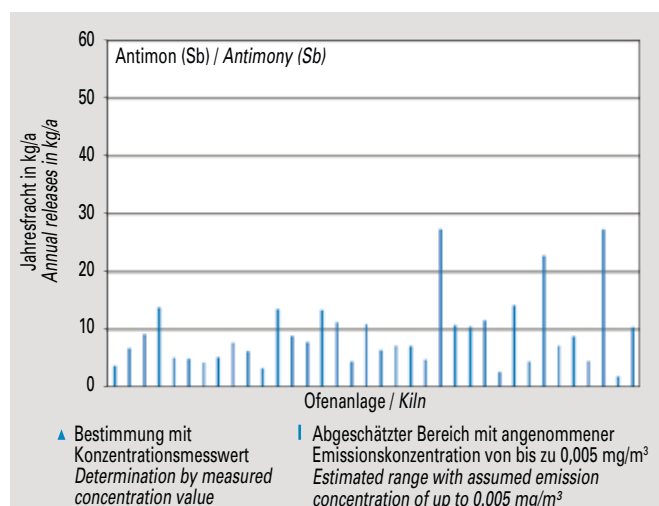


Bild 5-32: Emissionen von Antimon (Sb) von 36 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-32: Antimony (Sb) emissions (annual releases in 2012) of 36 rotary kilns.

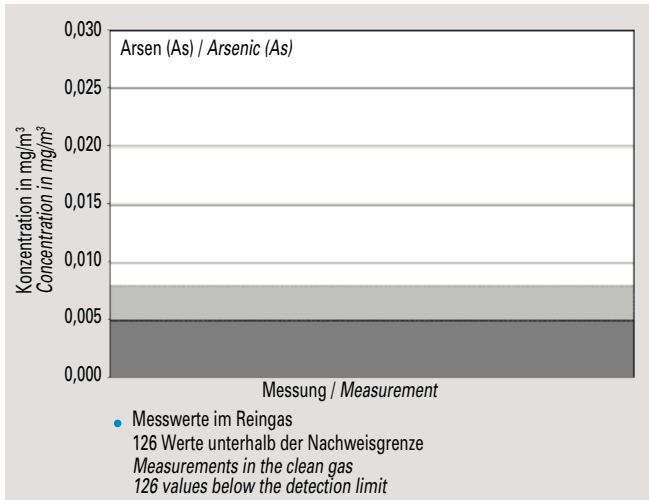


Bild 5-33: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Arsen (As) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

Fig. 5-33: Arsenic (As) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

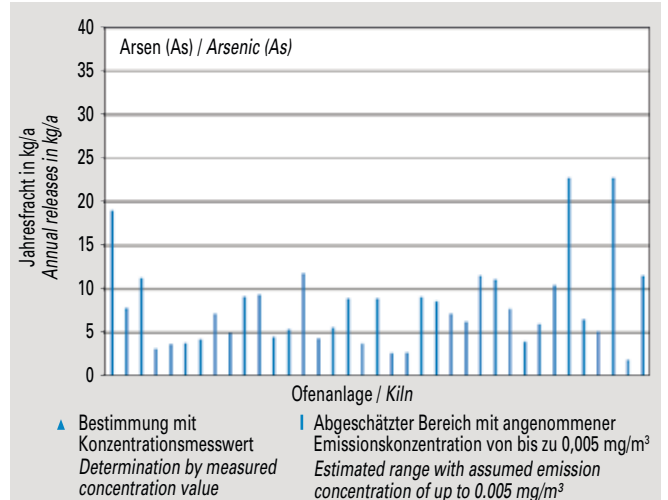


Bild 5-34: Emissionen von Arsen (As) von 37 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-34: Arsenic (As) emissions (annual releases in 2012) of 37 rotary kilns.

5.13.5 Arsen (As)

In 2012 wurden 126 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 126 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 2012) 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.

5.13.5 Arsenic (As)

Figure 5-33 shows 126 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 126 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 2012) 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.

5.13.6 Blei (Pb)

In 2012 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 89 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 2012) 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.

5.13.6 Lead (Pb)

Figure 5-35 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 89 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 2012) 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.

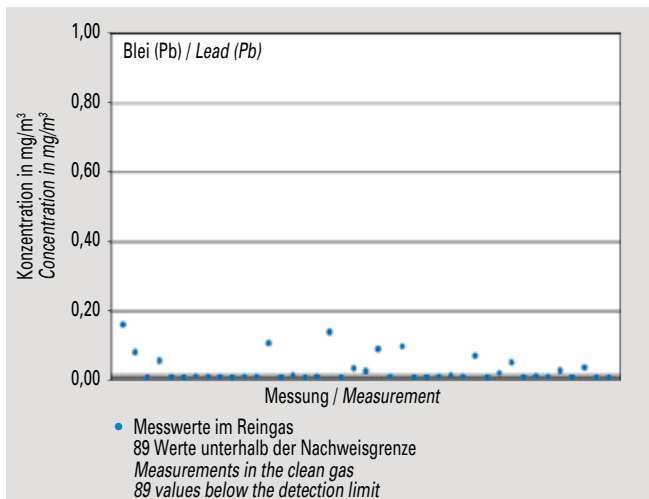


Bild 5-35: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Blei (Pb) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-35: Lead (Pb) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

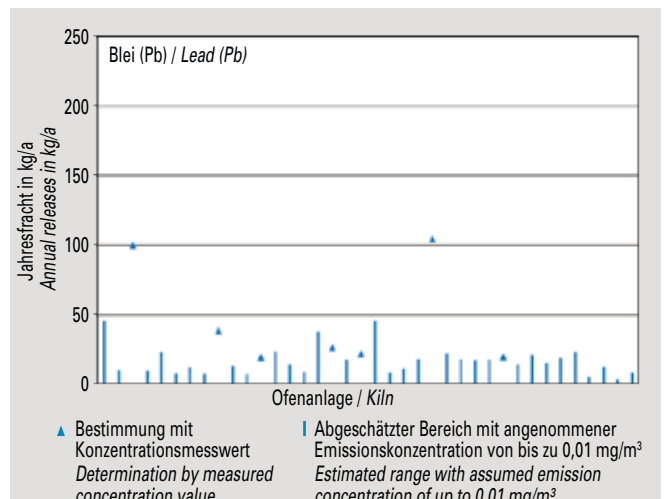


Bild 5-36: Emissionen von Blei (Pb) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-36: Lead (Pb) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

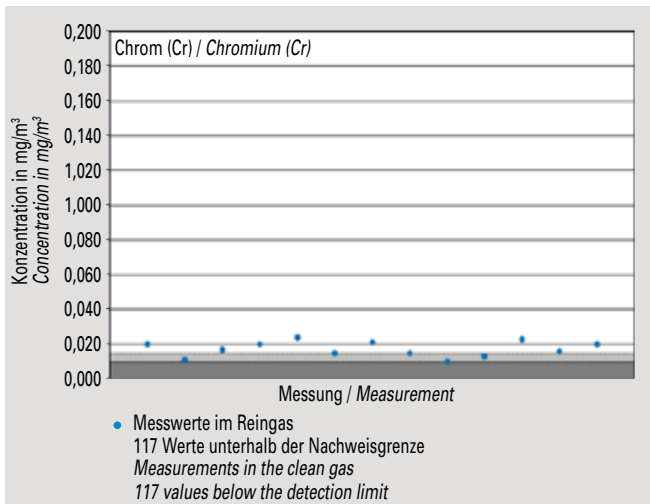


Bild 5-37: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Chrom (Cr) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-37: Chromium (Cr) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

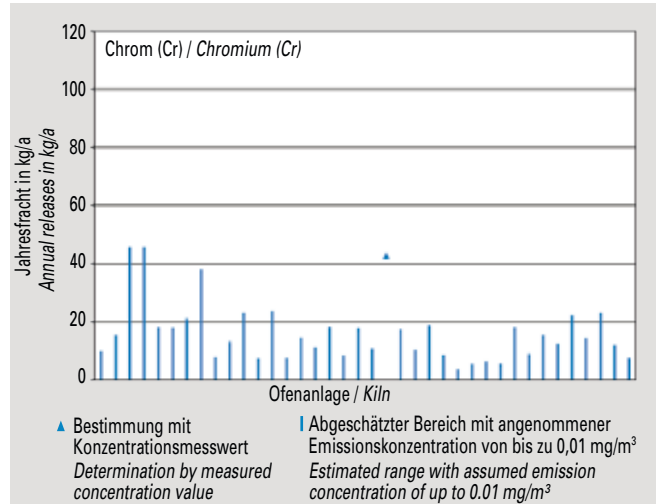


Bild 5-38: Emissionen von Chrom (Cr) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-38: Chromium (Cr) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

5.13.7 Chrom (Cr)

In 2012 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 117 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 2012) 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.

5.13.8 Cobalt (Co)

In 2012 wurden 121 Werte aus Messungen im Reingas von 35 Ofenanlagen ermittelt. 121 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 2012) von 35 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.

5.13.7 Chromium (Cr)

Figure 5-37 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 117 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 2012) 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/m.

5.13.8 Cobalt (Co)

Figure 5-39 shows 121 values from measurements in the clean gas at 35 rotary kilns. 121 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 2012) of 35 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.

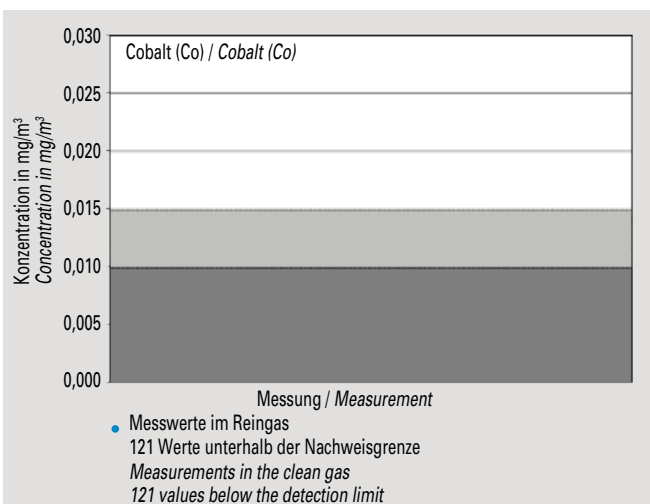


Bild 5-39: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Cobalt (Co) im Reingas von 35 Drehofenanlagen.

Fig. 5-39: Cobalt (Co) concentration values (year 2012) in the clean gas of 35 rotary kilns.

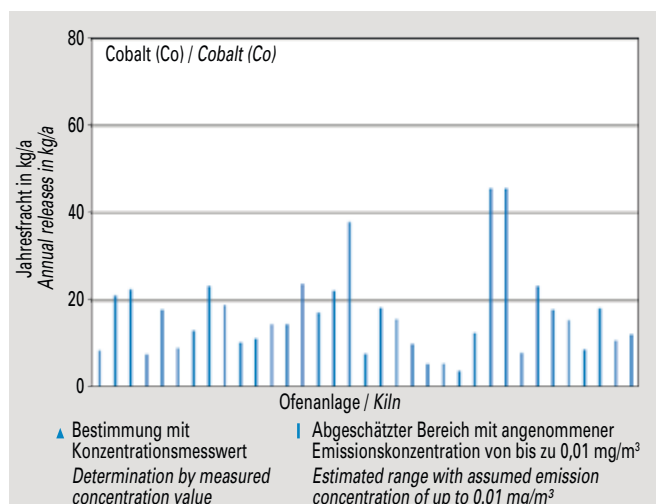


Bild 5-40: Emissionen von Cobalt (Co) von 35 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-40: Cobalt (Co) emissions (annual releases in 2012) of 35 rotary kilns.

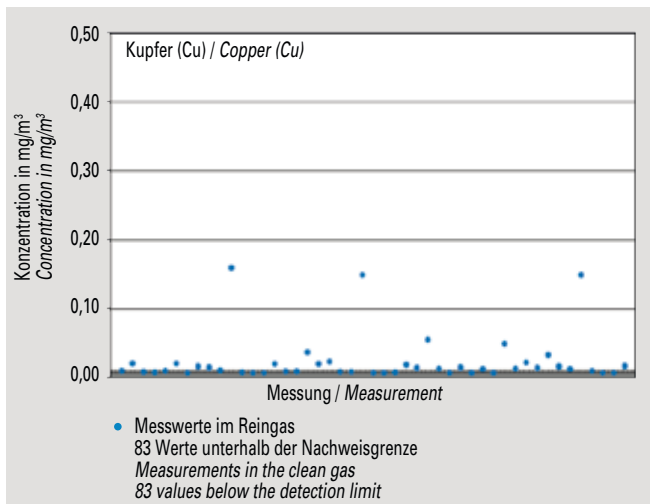


Bild 5-41: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Kupfer (Cu) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-41: Copper (Cu) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

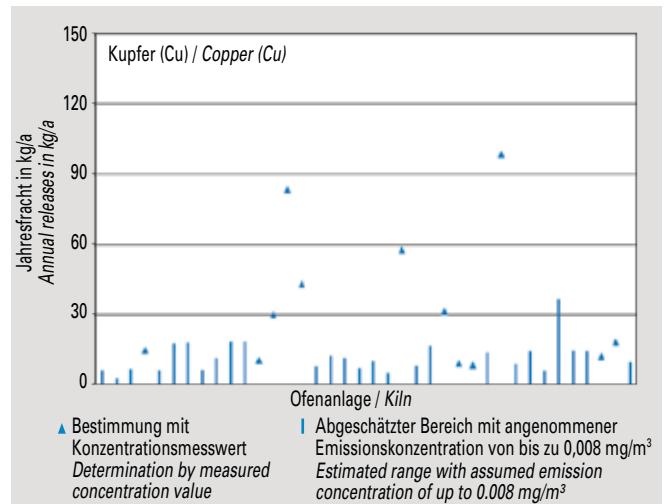


Bild 5-42: Emissionen von Kupfer (Cu) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-42: Copper (Cu) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

5.13.9 Kupfer (Cu)

In 2012 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 89 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 2012) von 38 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.

5.13.9 Copper (Cu)

Figure 5-41 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 89 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 2012) 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 0.008 mg/m³.

5.13.10 Mangan (Mn)

In 2012 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 36 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 2012) 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.

5.13.10 Manganese (Mn)

Figure 5-43 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 36 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 2012) 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.

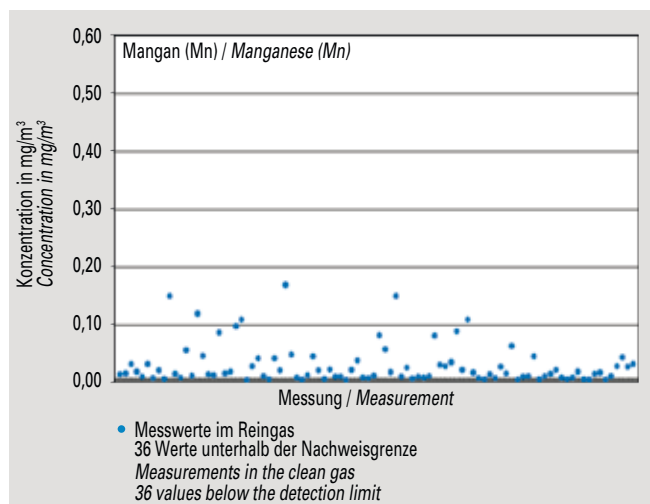


Bild 5-43: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Mangan (Mn) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-43: Manganese (Mn) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

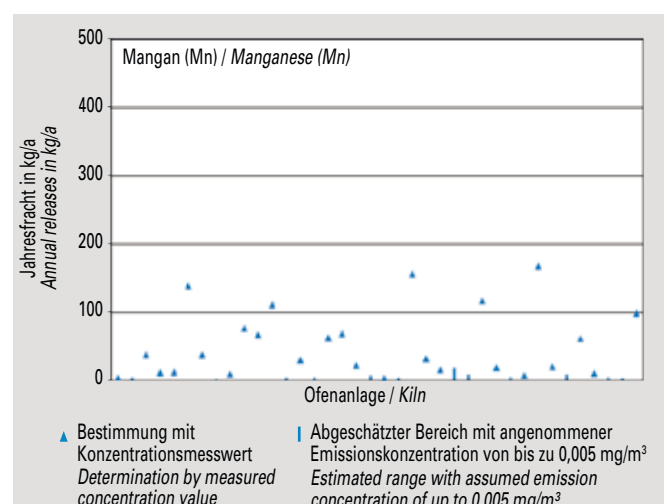


Bild 5-44: Emissionen von Mangan (Mn) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-44: Manganese (Mn) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

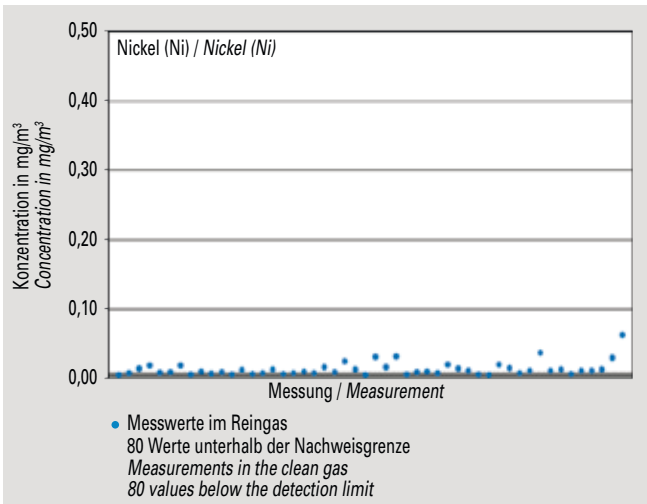


Bild 5-45: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Nickel (Ni) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Fig. 5-45: Nickel (Ni) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

5.13.11 Nickel (Ni)

In 2012 wurden 130 Werte aus Messungen im Reingas von 38 Ofenanlagen ermittelt. 80 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 2012) 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.

5.13.12 Vanadium (V)

In 2012 wurden 127 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 127 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 2012) 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.

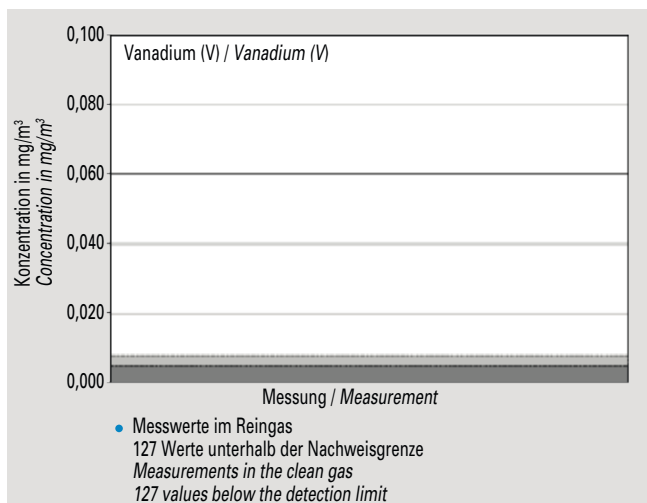


Bild 5-47: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Vanadium (V) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

Fig. 5-47: Vanadium (V) concentration values (year 2012) in the clean gas of 37 rotary kilns.

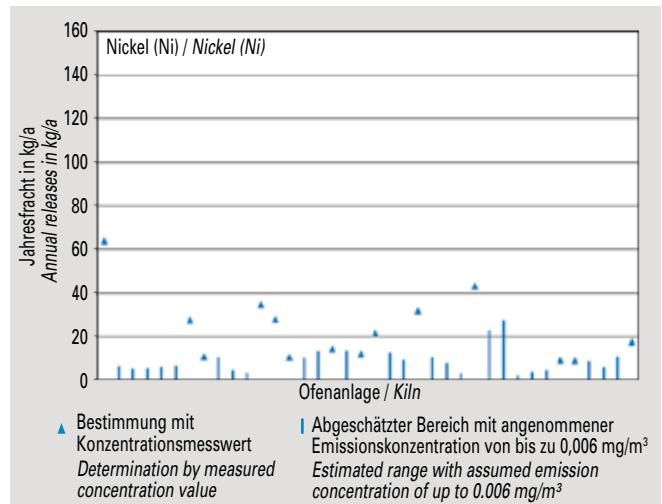


Bild 5-46: Emissionen von Nickel (Ni) von 38 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-46: Nickel (Ni) emissions (annual releases in 2012) of 38 rotary kilns.

5.13.11 Nickel (Ni)

Figure 5-45 shows 130 values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 80 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 2012) 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.

5.13.12 Vanadium (V)

Figure 5-47 shows 127 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 127 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 2012) 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.

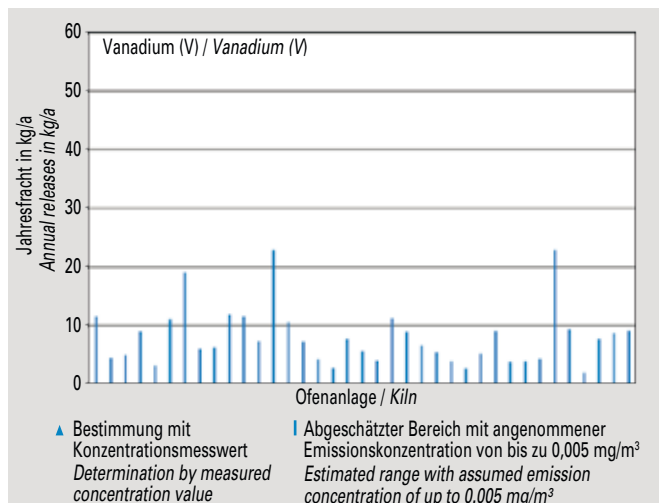


Bild 5-48: Emissionen von Vanadium (V) von 37 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-48: Vanadium (V) emissions (annual releases in 2012) of 37 rotary kilns.

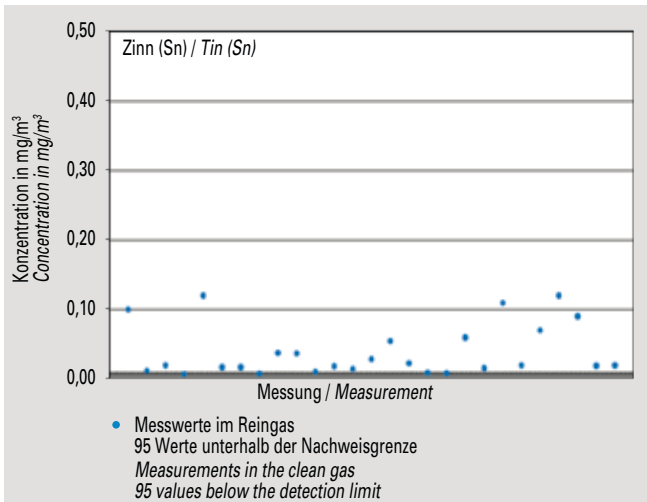


Bild 5-49: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Zinn (Sn) im Reingas von 35 Drehofenanlagen.

Fig. 5-49: Tin (Sn) concentration values (year 2012) in the clean gas of 35 rotary kilns.

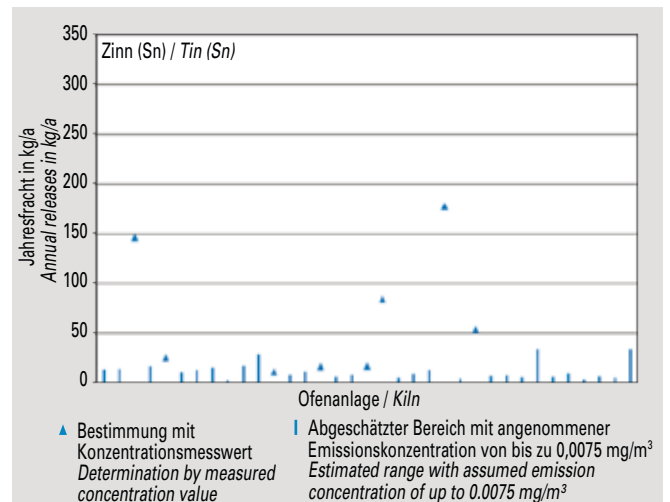


Bild 5-50: Emissionen von Zinn (Sn) von 35 Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-50: Tin (Sn) missions (annual releases in 2012) of 35 rotary kilns.

5.13.13 Zinn (Sn)

In 2012 wurden 122 Werte aus Messungen im Reingas von 35 Ofenanlagen ermittelt. 95 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 2012) von 35 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.

5.13.13 Tin (Sn)

Figure 5-49 shows 122 values from measurements in the clean gas at 35 rotary kilns. 95 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 2012) of 35 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)

In 2012 wurden 12 Werte aus Messungen im Reingas von vier Ofenanlagen ermittelt. Zwölf 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 2012) von vier 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.

5.13.14 Beryllium (Be)

Figure 5-51 shows 12 values from measurements in the clean gas at four rotary kilns. 12 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 2012) of four 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.

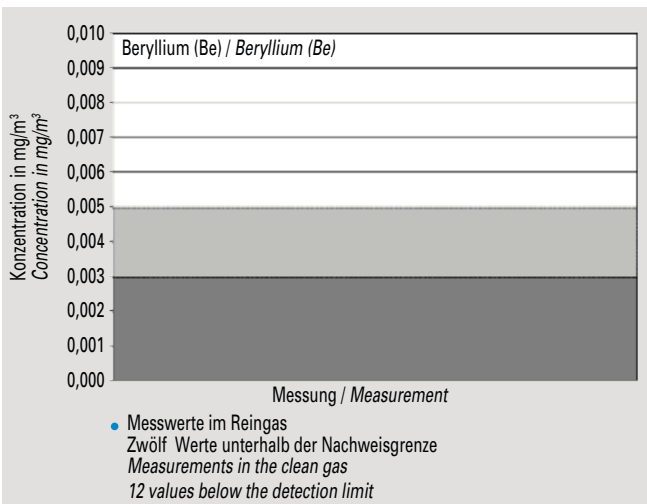


Bild 5-51: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Beryllium (Be) im Reingas von vier Drehofenanlagen.

Fig. 5-51: Beryllium (Be) concentration values (year 2012) in the clean gas of four rotary kilns.

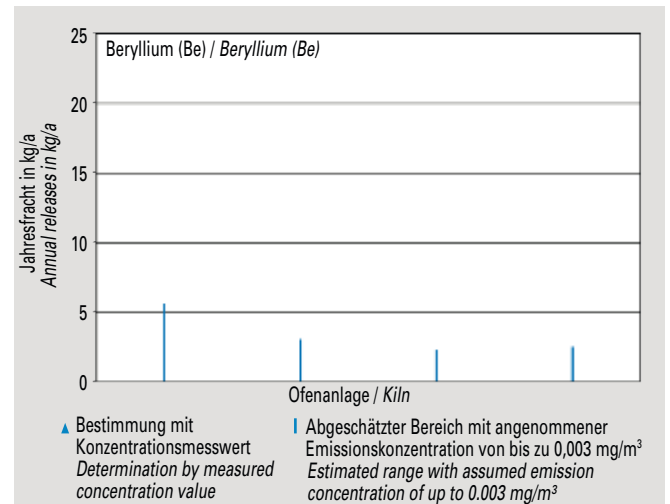


Bild 5-52: Emissionen von Beryllium (Be) von vier Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-52: Beryllium (Be) emissions (annual releases in 2012) of four rotary kilns.

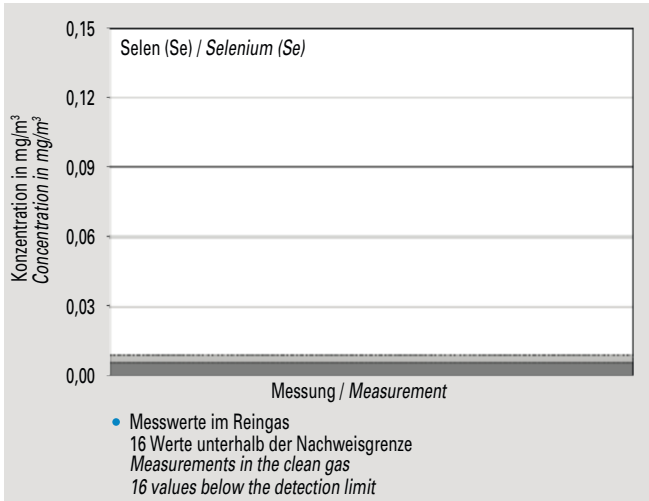


Bild 5-53: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Selen (Se) im Reingas von fünf Drehofenanlagen.

Fig. 5-53: Selenium (Se) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of five rotary kilns.

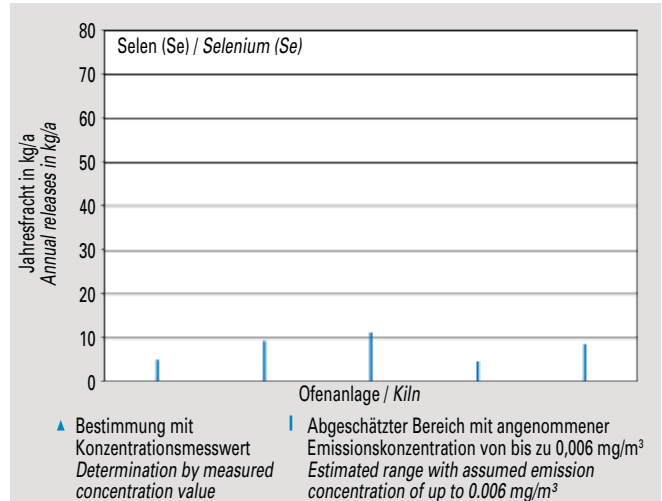


Bild 5-54: Emissionen von Selen (Se) von fünf Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-54: Selenium (Se) emissions (annual releases in 2012) of five rotary kilns.

5.13.15 Selen (Se)

In 2012 wurden 16 Werte aus Messungen im Reingas von fünf Ofenanlagen ermittelt. 16 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 2012) von fünf 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.

5.13.15 Selenium (Se)

Figure 5-53 shows 16 values from measurements in the clean gas at five rotary kilns. 16 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 2012) of five 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 Tellur (Te)

In 2012 wurden 13 Werte aus Messungen im Reingas von vier Ofenanlagen ermittelt. 13 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 2012) von vier 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.

5.13.16 Tellurium (Te)

Figure 5-55 shows 13 values from measurements in the clean gas at four rotary kilns. 13 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 2012) of four 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.

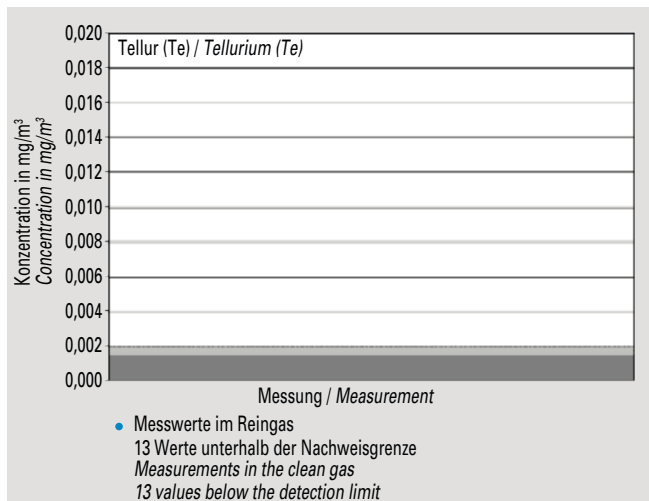


Bild 5-55: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Tellur (Te) im Reingas von vier Drehofenanlagen.

Fig. 5-55: Tellurium (Te) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of four rotary kilns.

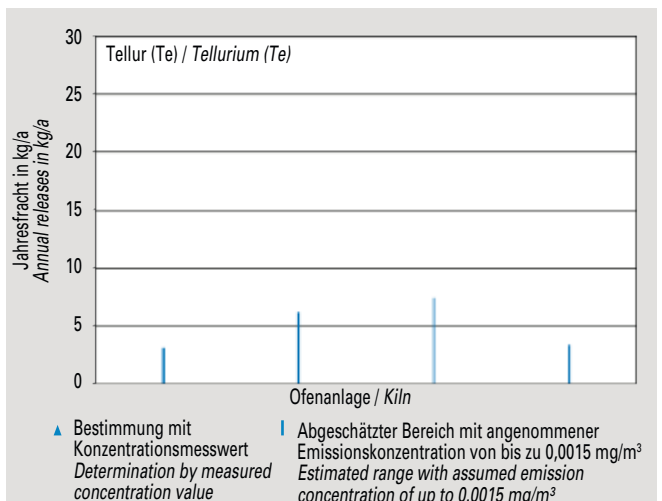


Bild 5-56: Emissionen von Tellur (Te) von vier Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).

Fig. 5-56: Tellurium (Te) emissions (annual releases in 2012) of four rotary kilns.

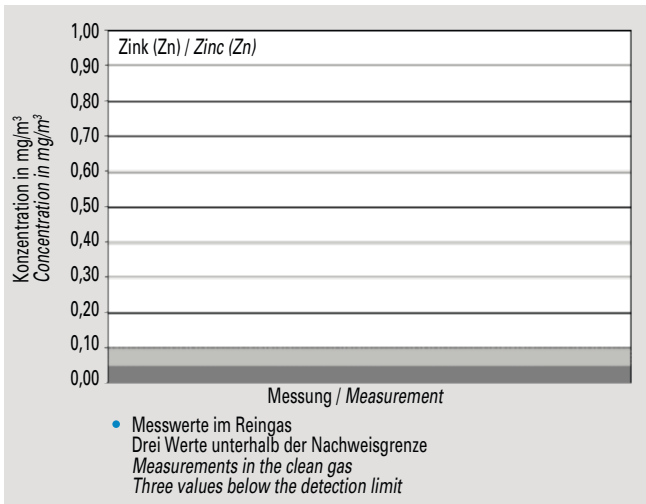


Bild 5-57: Messwerte (Jahr 2012) der Konzentration von Zink (Zn) im Reingas von zwei Drehofenanlagen.
Fig. 5-57: Zinc (Zn) concentration values (year 2012) measured in the clean gas of two rotary kilns.

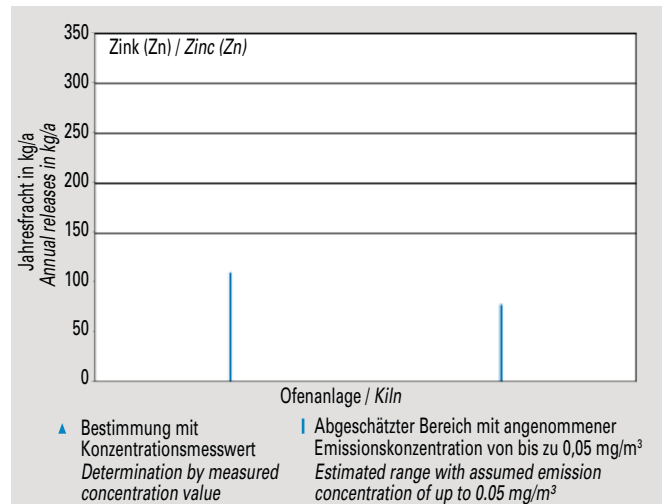


Bild 5-58: Emissionen von Zink (Zn) von zwei Drehofenanlagen (Jahresfracht 2012).
Fig. 5-58: Zinc (Zn) emissions (annual releases in 2012) of two rotary kilns.

5.13.17 Zink (Zn)

In 2012 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von zwei Ofenanlagen ermittelt. Drei 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 2012) von zwei 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.

5.13.17 Zinc (Zn)

Figure 5-57 shows three values from clean gas measurements at two rotary kilns. Three 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 2012) of two 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 2013, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [2] Verminderung der CO₂-Emission Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [3] Umfrage des Forschungsinstituts der Zementindustrie 2011/2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [4] Klein, H.; Hoenig, V.: Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [5] 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
- [6] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 1; Cement International 3/2013
- [7] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 2, Cement International 4/2013

Ergänzende Literatur ■

- Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (1998 - 2011), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Zement-Taschenbuch 2009, 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 2013, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [2] Verminderung der CO₂-Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [3] Umfrage des Forschungsinstituts der Zementindustrie 2011/2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [4] Klein, H.; Hoenig, V.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [5] 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
- [6] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 1; Cement International 3/2013
- [7] 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 - 2011), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Zement-Taschenbuch 2009, 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: Dezember 2013

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: December 2013

vdz.

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