

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



2015

**Inhalt / Contents**

|  |    |
|--|----|
| <b>Vorwort / Foreword</b>  | 3  |
| <b>1 Zementherstellung / Cement manufacture</b>  | 5  |
| <b>2 Produktions- und Strukturdaten / Production and structural data</b>                               | 7  |
| <b>3 Einsatzstoffe / Input materials</b>   | 9  |
| 3.1 Rohstoffe / Raw materials  | 9  |
| 3.2 Brennstoffe / Fuels  | 10 |
| <b>4 Energie / Energy</b>  | 12 |
| <b>5 Emissionen / Emissions</b>  | 14 |
| 5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid / Greenhouse gases /<br>Carbon dioxide                           | 15 |
| 5.2 Staub / Dust   | 16 |
| 5.3 Stickstoffoxide / Nitrogen oxides  | 16 |
| 5.4 Schwefeldioxid / Sulphur dioxide   | 18 |
| 5.5 Kohlenstoffmonoxid und organischer Gesamtkohlenstoff /<br>Carbon monoxide and total organic carbon | 18 |
| 5.6 Dioxine und Furane / Dioxins und Furans  | 20 |
| 5.7 Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls   | 20 |
| 5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe /<br>Polycyclic aromatic hydrocarbons                 | 22 |
| 5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol /<br>Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene                     | 23 |
| 5.10 Benzol / Benzene  | 24 |
| 5.11 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen /<br>Gaseous inorganic chlorine compounds               | 25 |
| 5.12 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen /<br>Gaseous inorganic fluorine compounds               | 25 |
| 5.13 Spurenelemente / Trace elements   | 26 |
| 5.13.1 Cadmium / Cadmium (Cd)  | 28 |
| 5.13.2 Thallium / Thallium (Tl)  | 28 |
| 5.13.3 Quecksilber / Mercury (Hg)  | 29 |
| 5.13.4 Antimon / Antimony (Sb)   | 29 |
| 5.13.5 Arsen / Arsenic (As)  | 30 |
| 5.13.6 Blei / Lead (Pb)  | 30 |
| 5.13.7 Chrom / Chromium (Cr)   | 31 |
| 5.13.8 Cobalt / Cobalt (Co)  | 31 |
| 5.13.9 Kupfer / Copper (Cu)  | 32 |
| 5.13.10 Mangan / Manganese (Mn)  | 32 |
| 5.13.11 Nickel / Nickel (Ni)   | 33 |
| 5.13.12 Vanadium / Vanadium (V)  | 33 |
| 5.13.13 Zinn / Tin (Sn)  | 34 |
| 5.13.14 Beryllium / Beryllium (Be)   | 34 |
| 5.13.15 Selen / Selenium (Se)  | 35 |
| 5.13.16 Tellur / Tellurium (Te)  | 35 |
| 5.13.17 Zink / Zinc (Zn)   | 36 |
| <b>Literatur / Literature</b>  | 37 |
| <b>Impressum / Imprint</b>   | 39 |

Anmerkung: Zahlendarstellung in Tabellen und Grafiken entsprechend deutscher Regeln.

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

Liebe Leserinnen und Leser,

die vorliegende Ausgabe der „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“ gibt in bewährter Form einen umfangreichen Überblick zu den umweltrelevanten Emissionen sämtlicher Klinker produzierenden Werke in Deutschland. Mit den Umweltdaten dokumentiert der VDZ bereits seit September 2000 die Ergebnisse kontinuierlicher Emissionsüberwachungen und Einzelmessungen von Spurenelementen sowie organischen Abgasbestandteilen in den deutschen Zementwerken.

Die Klimaschutzpolitik des zurückliegenden Jahres wurde in besonderer Weise vom Pariser Klimaschutzabkommen geprägt. Die Staatengemeinschaft hat sich im Dezember 2015 auf ein gemeinsames Vorgehen gegen den Klimawandel verständigt. Als Ziel wurde eine Begrenzung der Klimaerwärmung bei „deutlich unter 2 °C“ vereinbart. Zudem sollen weitere Anstrengungen unternommen werden, den Temperaturanstieg möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen. Das Pariser Abkommen bildet eine neue Grundlage für gemeinsame Anstrengungen in der internationalen Klimaschutzpolitik. Aus Sicht der Zementindustrie ist zu begrüßen, dass ein breiter internationaler Konsens gefunden wurde. Gleichwohl bleibt das Abkommen an wichtigen Stellen vage, so dass auch in Zukunft ein wirksamer Carbon-Leakage-Schutz für die europäische Zementindustrie im EU-Emissionshandel erforderlich sein wird.

Die deutschen Zementhersteller können für die letzten Jahre bereits beachtliche Fortschritte bei der Treibhausgas-Reduzierung vorweisen: Die Zementindustrie hat mit ihren erfolgreichen Bemühungen um einen hochwertigen energetischen und stofflichen Einsatz geeigneter alternativer Materialien bereits einen sehr wertvollen Beitrag geleistet, um den Übergang zu einer effizienten Kreislaufwirtschaft zu ebnen.

Mögliche Änderungen der politischen Rahmenbedingungen könnten die weitere Etablierung der Kreislaufwirtschaft aber gefährden. So plant das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) mit einer Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) die sogenannte Heizwertklausel nach § 8 Abs. 3 aufzuheben. Der Wegfall der Heizwertregelung würde den Aufwand beim Nachweis der Hochwertigkeit einer energetischen Verwertung in den Zementwerken deutlich erhöhen und so das funktionierende System der Kreislaufwirtschaft erheblich beeinträchtigen.

Die Substitution fossiler Energieträger ist für die Verringerung der Treibhausgas-Emissionen in der Zementindustrie von entscheidender Bedeutung. Der Anteil fossiler Brennstoffe (vor allem Braun- und Steinkohle) ging kontinuierlich von 74,3 % im Jahr 2000 auf aktuell 35,4 % zurück. Der thermische Energiebedarf wird heute überwiegend durch alternative Brennstoffe wie aufbereitete Gewerbe- und Siedlungsabfälle, Altreifen, Altöl oder Klärschlamm gedeckt (64,6 % in 2015).

Düsseldorf, im Dezember 2016

Dear readers,

This edition of „Environmental Data of the German Cement Industry“ again provides a reliable and comprehensive overview of environmentally-relevant emissions from all clinker-producing works in Germany. The environmental data are a record of the results of continuous emission monitoring and single measurements of trace elements and organic exhaust gas compounds in German cement works, which has been kept by VDZ since September 2000.

Climate protection policy over the past year was particularly influenced by the Paris Climate Agreement. In December 2015 the international community agreed on a joint action plan to combat climate change. Consensus was achieved on a target of limiting global warming to „well below 2°C“. In addition, further efforts are to be made to restrict the rise in temperature to 1.5°C if at all possible. The Paris Agreement forms a new foundation for pursuing an internationally coordinated climate protection policy. The cement industry welcomes the fact that a broad international consensus was reached. Certain important aspects of the agreement are however so vague that effective protection against carbon leakage will continue to be necessary for the European cement industry in the context of EU emissions trading.

German cement manufacturers can already point to the significant progress they have made in reducing greenhouse gases in recent years: Successful efforts aimed at the highly energy-efficient use of suitable alternative materials illustrate the extremely valuable contribution made so far by the cement industry towards achieving a smooth transition to efficient waste management.

Possible policy changes could however jeopardise the further development of a waste management system. For instance, the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) is planning an amendment to the Waste Management Act (KrWG) which would involve repealing the so-called calorific value clause as per § 8 para. 3. Abolition of the calorific value ruling would make the process of verifying highly energy-efficient utilisation in cement works far more elaborate and would thus have a detrimental effect on the functioning waste management system.

The replacement of fossil energy sources is crucial to the reduction of greenhouse gas emissions in the cement industry. The percentage of fossil fuels (in particular lignite and hard coal) used has steadily dropped from 74.3% in 2000 to a current level of 35.4%. Nowadays, the thermal energy demand is largely covered by alternative fuels like processed industrial and municipal waste, used tyres, waste oil or sewage sludge (64.6% in 2015).

Düsseldorf, December 2016



## 1 Zementherstellung ■

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

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

Der sogenannte Portlandzementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das hauptsächlich Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>), Aluminiumoxid (Tonerde (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) und Eisenoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) enthält. Kalkstein, Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, liefern diese chemischen Bestandteile. Kalkstein und Kreide bestehen aus Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>). Wesentliche Bestandteile des natürlichen Verwitterungsprodukts Ton sind feinkörnige und glimmerartige Minerale sowie in geringer Menge Quarz und Feldspat als Reste des Ausgangsmaterials. Tonminerale und Feldspat sind Verbindungen von Aluminiumoxid und Siliciumdioxid (Alumosilicate) und Alkalien wie Natrium und Kalium. Das für die Bildung der Schmelze erforderliche Eisenoxid ist als Eisenhydroxid Bestandteil der Tonminerale oder wird als Eisenerz zugesetzt. Damit der Zement die vorgegebenen Qualitätsanforderungen erfüllt, ist eine exakt definierte Rohmaterialzusammensetzung erforderlich. Abweichungen können nur in geringem Umfang toleriert werden.

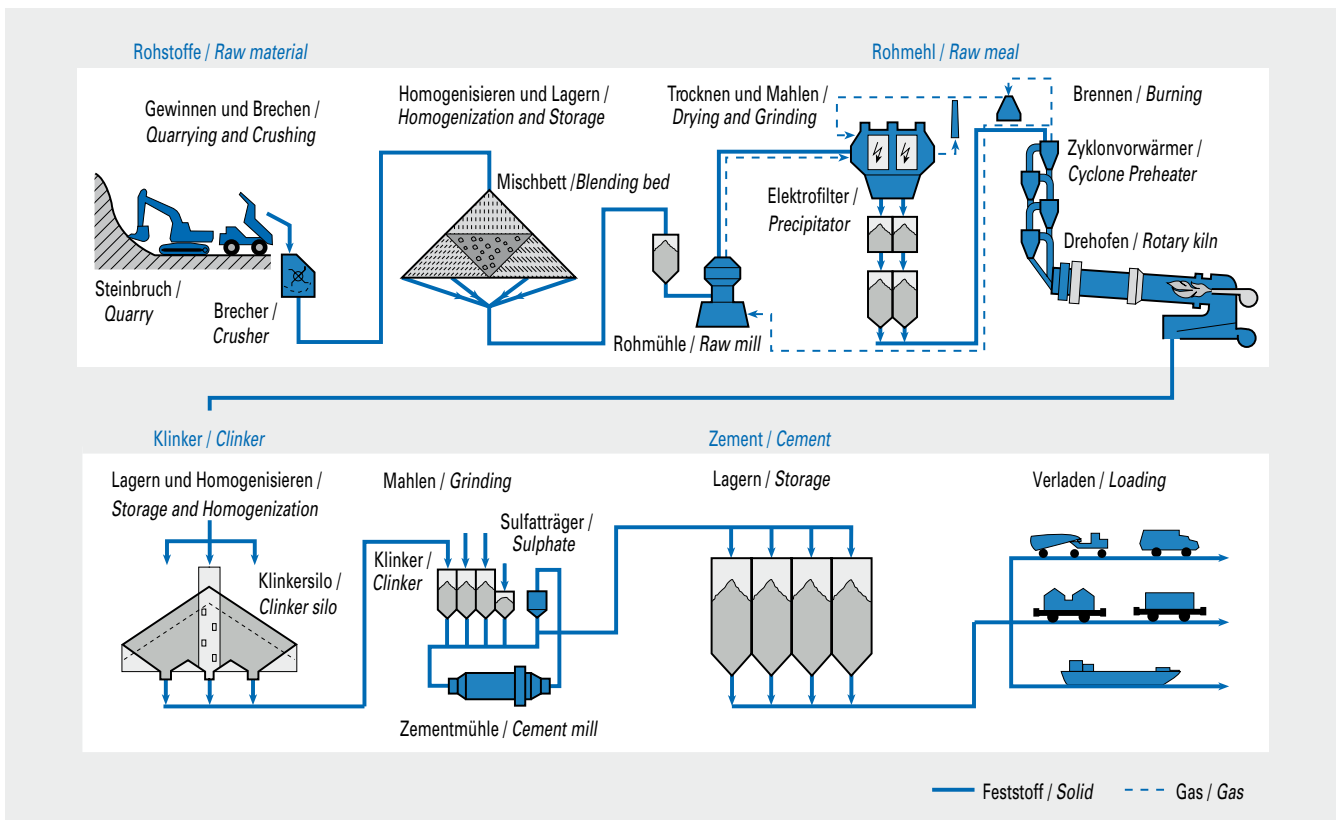
## 1 Cement manufacture ■

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

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

What is known as Portland cement clinker is made from a raw material mix mainly consisting of calcium oxide (CaO), silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>), aluminium oxide (alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)), and iron oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). These chemical constituents are supplied by limestone, chalk and clay or their natural blend, lime marl. Limestone and chalk are composed of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>). 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.

5



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

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

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 charakteristische Eigenschaft der Erhärtung in Gegenwart von Wasser verleihen.

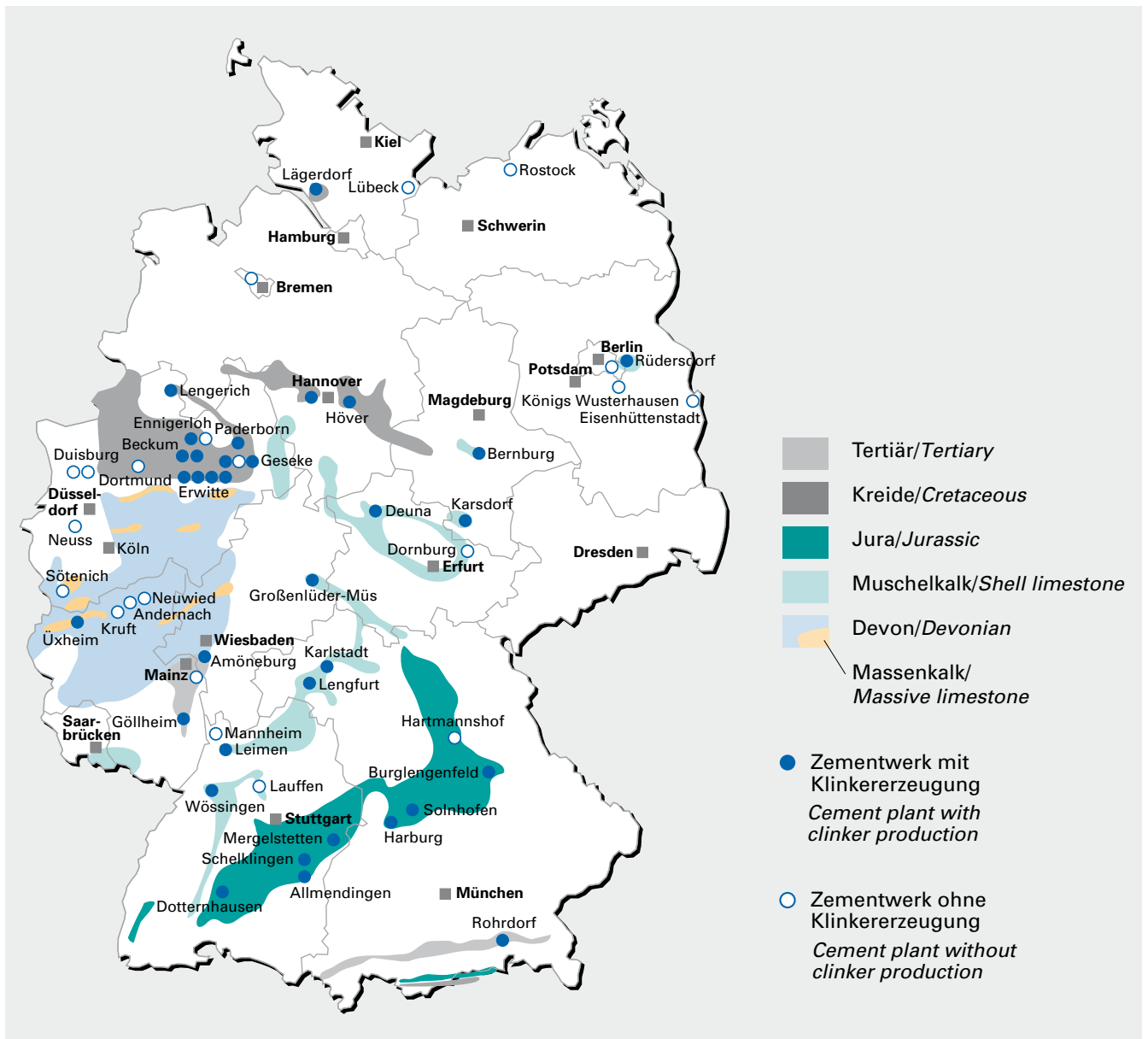
These are certain calcium silicates and calcium aluminates which confer on the cement its characteristic feature of setting in the presence of water.

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 2016.  
**Fig. 2-1** Cement works in the Federal Republic of Germany in the year 2016.

## 2 Produktions- und Strukturdaten ■

Zement ist ein homogenes Massengut, das zu Lande per Lkw transportiert wird und deshalb transportkostenintensiv ist. Zement wird überwiegend zu lokalen Absatzmärkten geliefert. Die Produktionsstandorte sind den Rohstoffvorkommen entsprechend über das Bundesgebiet verteilt und befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den jeweiligen Kalksteinvorkommen. Im Jahr 2015 produzierten 22 Unternehmen in 55 Werken etwa 31,2 Mio. Tonnen Zement [1] (Bild 2-1).

Die Tabellen 2-1 und 2-3 geben einen Überblick über die Klinkerproduktion in Deutschland sowie den daraus hergestellten Zement. Zu den Hauptabnehmern gehören die Transportbetonindustrie mit ca. 58 % sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 24 % des inländischen Zementversandes. Etwa 7 % des Zements wird als Sackzement versandt.

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

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

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

| Jahr /<br>Year | Produktion / Production |                    | Zementversand / Cement deliveries                |   |  |                                 |
|----------------|-------------------------|--------------------|--|---|--|---------------------------------|
|                | Klinker /<br>Clinker    | Zement /<br>Cement | Zementversand<br>Inland /<br>Domestic deliveries | Export<br>einschl. Klinker /<br>Cement export (incl.<br>clinker export) | Zementversand gesamt /<br>Total cement<br>deliveries (incl.<br>clinker export) | Zementimport /<br>Cement import |
|                | 1.000 t                 | 1.000 t            | 1.000 t  | 1.000 t   | 1.000 t  | 1.000 t                         |
| 2006           | 24.921                  | 33.630             | 27.428   | 7.286   | 34.714   | 1.492                           |
| 2007           | 26.992                  | 33.382             | 26.064   | 8.658   | 34.722   | 1.288                           |
| 2008           | 25.366                  | 33.581             | 26.274   | 8.912   | 35.193   | 1.317                           |
| 2009           | 23.232                  | 30.441             | 24.057   | 7.354   | 31.411   | 1.199                           |
| 2010           | 22.996                  | 29.915             | 23.406   | 7.301   | 30.707   | 1.285                           |
| 2011           | 24.775                  | 33.540             | 26.767   | 7.935   | 34.702   | 1.305                           |
| 2012           | 24.581                  | 32.432             | 25.492   | 7.018   | 32.510   | 1.277                           |
| 2013           | 23.127                  | 31.308             | 25.201   | 6.498   | 31.699   | 1.344                           |
| 2014           | 23.871                  | 32.099             | 25.850   | 6.168   | 32.018   | 1.325                           |
| 2015           | 23.355                  | 31.160             | 25.334   | 6.646   | 31.980   | 1.304                           |

Quellen / Sources: VDZ, Destatis

**Tabelle 2-2** Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 2014 bis 2016.

**Table 2-2** Number and capacity of kilns with operating permits in the Federal Republic of Germany in the years from 2014 to 2016.

|  | Stand: 01.01.2014/<br>As at 01. Jan 2014 |                        |       | Stand: 01.01.2015/<br>As at 01. Jan 2015 |                        |       | Stand: 01.01.2016/<br>As at 01. Jan 2016 |                        |       |
|--|--|------------------------|-------|--|------------------------|-------|--|------------------------|-------|
|  | Anzahl/<br>Number                        | Kapazität/<br>Capacity |       | Anzahl/<br>Number                        | Kapazität/<br>Capacity |       | Anzahl/<br>Number                        | Kapazität/<br>Capacity |       |
|  |  | t/d                    | %     |  | t/d                    | %     |  | t/d                    | %     |
| Ofen mit Zyklonvorwärmer/<br>Kilns with cyclone preheaters         | 39                                       | 100.460                | 93,8  | 39                                       | 100.460                | 93,8  | 39                                       | 100.760                | 93,8  |
| Ofen mit Rostvorwärmer/<br>Kilns with grate preheaters             | 6  | 5.500                  | 5,1   | 6  | 5.500                  | 5,1   | 6  | 5.500                  | 5,1   |
| Schächtofen / Shaft kilns  | 8  | 1.200                  | 1,1   | 8  | 1.200                  | 1,1   | 8  | 1.200                  | 1,1   |
| Summe / Total  | 53                                       | 107.160                | 100   | 53                                       | 107.160                | 100   | 53                                       | 107.460                | 100   |
| mittlere Ofenkapazität<br>in t/d / Average kiln<br>capacity in t/d |  |                        | 2.355 |  |                        | 2.355 |  |                        | 2.361 |
|  | Drehöfen / Rotary kilns                  |                        |       |  |                        |       |  |                        |       |
|  | Schächtofen / Shaft kilns                |                        | 150   |  |                        | 150   |  |                        | 150   |

Quelle / Source: VDZ

## 2 Production and structural data ■

Cement is a homogeneous bulk commodity that, given the high cost of road transport by truck is mainly delivered to local markets. Production facilities of the German cement industry are spread over the Federal Republic of Germany according to the appropriate mineral resources and located in the immediate vicinity of the respective limestone deposits. In 2015, 22 companies with their 55 works produced about 31.2 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 (58 % of domestic cement deliveries) and the manufacturers of concrete elements (24 % of domestic cement deliveries) are among the principal buyers of cement. 7 % of the cement is dispatched as bagged cement.

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

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

| Jahr/<br>Year      | CEM     |        |                |      |      |                |       |       |    |    |                   |                  |
|--------------------|---------|--------|----------------|------|------|----------------|-------|-------|----|----|-------------------|------------------|
|                    | I       | II     | Darunter/Among |      |      |                |       | III   | IV | V  | Sonst./<br>Others | Gesamt/<br>Total |
|                    |         |        | II/S           | II/P | II/V | II/T+<br>II/LL | II/M  |       |    |    |                   |                  |
|                    | 1.000 t |        |                |      |      |                |       |       |    |    |                   |                  |
| 2004               | 13.728  | 7.163  | 3.296          | 50   | 0    | 3.772          | 45    | 2.438 | 4  | 0  | 212               | 23.545           |
| 2005 <sup>1)</sup> | 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 <sup>1)</sup> | 7.404   | 12.060 | 4.328          | 62   | 245  | 5.075          | 2.350 | 5.530 | 6  | 0  | 246               | 25.246           |
| 2013 <sup>1)</sup> | 7.130   | 11.851 | 4.216          | 50   | 162  | 5.356          | 2.067 | 5.498 | 6  | 0  | 235               | 24.720           |
| 2014               | 7.554   | 11.826 | 4.296          | 36   | 124  | 5.477          | 1.893 | 5.677 | 6  | 10 | 263               | 25.336           |
| 2015               | 7.554   | 11.350 | 4.301          | 49   | 111  | 5.001          | 1.888 | 5.653 | 5  | 19 | 268               | 24.849           |

**Anmerkung/Note:**

CEM I = Portlandzement; CEM II/S = Portlandhüttenzement; CEM II/P = Portlandpuzzolanzement; CEM II/V = Portlandflugaschezement;  
 CEM II/T = Portlandschieferzement; CEM II/LL = Portlandkalksteinzement; CEM II/M = Portlandkompositzement; CEM III = Hochofenzement;  
 CEM IV = Puzzolanzement; CEM V = Kompositzement; Sonstige = sonstige bauaufsichtlich zugelassene Zemente, Boden- und Tragschichtbinder  
 (Festigkeit  $\geq 32,5$  N/mm<sup>2</sup>), Klinkermehl

CEM I = Portland cement; CEM II/S = Portland-slag cement; CEM II/P = Portland pozzolana cement; CEM II/V = Portland-fly ash cement;  
 CEM II/T = Portland-burnt shale cement; CEM II/LL = Portland-limestone cement; CEM II/M = Portland-composite cement; CEM III = blastfurnace cement;  
 CEM IV = pozzolana cement; CEM V = composite cement; Other = other cements approved by the building supervisory authorities, road binders  
 (strength  $\geq 32.5$  N/mm<sup>2</sup>), clinker meal

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

Quelle / Source: VDZ



## 3 Einsatzstoffe ■

### 3.1 Rohstoffe

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

In Tabelle 3-1 werden die im Jahr 2015 eingesetzten Rohstoffe aufgeführt. Ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechend lassen sie sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Der Einsatz erfolgt hauptsächlich als Rohmaterialkomponente beim Klinkerbrennprozess. Hüttensand, ein geringer Teil des Kalksteins, Ölschiefer (in gebrannter Form) sowie Trass werden als Hauptbestandteil im Zement verwendet.

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

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

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

**Tabelle 3-1** Rohstoffeinsatz 2015.

**Table 3-1** Raw materials input in 2015.

| Gruppe / Group | Rohstoff / Raw material  | Einsatz / Input quantity<br>1.000 t/a |
|----------------|--|---------------------------------------|
| Ca             | Kalkstein / Mergel / Kreide / Limestone / Marl / Chalk   | 36.858                                |
|                | Sonstige, wie: / Others, such as:<br>- Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung / Lime sludge from drinking water and sewage treatment<br>- Kalkhydrat / Hydrated lime<br>- Porenbetongranulat / Foam concrete granulates<br>- Calciumfluorid / Calcium fluoride   | 81                                    |
| Si             | Sand / Sand  | 1.096                                 |
|                | Gießereialsand / Used foundry sand   | 178                                   |
| Si-Al          | Ton / Clay   | 1.150                                 |
|                | Bentonit / Kaolinit / Bentonite / Kaolinite  | 26                                    |
| Fe             | Eisenerz / Iron ore  | 115                                   |
|                | Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie, wie: / Other input materials from the iron and steel industries, such as:<br>- Kiesabbrand / Roasted pyrite<br>- verunreinigtes Erz / Contaminated ore<br>- Eisenoxid/Flugasche-Gemisch / Iron oxide/fly ash blends<br>- Stahlwerksstäube / Dusts from steel plants<br>- Walzzunder / Mill scale | 95                                    |
| Si-Al-Ca       | Hüttensand / Granulated blastfurnace slag  | 6.821                                 |
|                | Flugasche / Fly ash  | 341                                   |
|                | Ölschiefer / Oil shale   | 113                                   |
|                | Trass / Trass  | 32                                    |
|                | Sonstige, wie: / Others, such as:<br>- Papierreststoffe / Paper residuals<br>- Aschen aus Verbrennungsprozessen / Ashes from incineration processes<br>- Mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden / Mineral residuals, e. g. soil contaminated by oil  | 58                                    |
| S              | Natürlicher Gips / Natural gypsum  | 734                                   |
|                | Natürlicher Anhydrit / Natural anhydrite   | 533                                   |
|                | Gips aus der Rauchgasentschwefelung / Gypsum from flue gas desulphurisation  | 301                                   |
| Al             | Einsatzstoffe aus der Metallindustrie, wie: / Input materials from the metal industry, such as:<br>- Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken / Residues from reprocessing salt slag<br>- Aluminiumhydroxid / Aluminium hydroxide   | 28                                    |

Quellen / Sources: VDZ, Fachverband Eisenhüttenschlacken

### 3.2 Brennstoffe

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

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage in hohem Maße alternative Brennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementindustrie betrug über 64 % im Jahr 2015. Eine Aufstellung der eingesetzten alternativen Brennstoffe sowie deren durchschnittliche Heizwerte enthält Tabelle 3-3.

## 3 Input materials ■

### 3.1 Raw materials

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

Table 3-1 lists the raw materials utilised in the year 2015. They can be classified into different groups, according to their chemical composition. Most of them are utilised as raw material components in the clinker burning process. Blastfurnace slag, a small proportion of the limestone, oil shale (burnt) and trass are used as main constituents of cement.

**Tabelle 3-2** Brennstoffenergieeinsatz nach Energieträgern.

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

| Brennstoff / Fuel   |                          | 2006  | 2007  | 2008  | 2009  | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  |
|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Steinkohle / Coal   | Mio. GJ/a / million GJ/a | 11,4  | 13,9  | 13,9  | 10,2  | 9,0   | 10    | 9,8   | 7,8   | 8,9   | 8,1   |
|   | Anteil % / share %       | 12,4  | 13,5  | 14,5  | 11,6  | 10,2  | 10,6  | 10,4  | 8,7   | 9,6   | 9,0   |
| Braunkohle / Lignite  | Mio. GJ/a / million GJ/a | 27,6  | 25,2  | 23,1  | 20,0  | 20,7  | 23,7  | 22,3  | 19,7  | 19,5  | 18,7  |
|   | Anteil % / share %       | 30,0  | 23,1  | 24,1  | 22,7  | 23,5  | 25,1  | 23,7  | 21,8  | 21,1  | 20,8  |
| Petrolkoks / Petcoke  | Mio. GJ/a / million GJ/a | 4,4   | 5,6   | 4,9   | 4,4   | 3,3   | 2,1   | 3,2   | 3,2   | 4,1   | 3,4   |
|   | Anteil % / share %       | 4,7   | 5,6   | 5,1   | 5,0   | 3,8   | 2,2   | 3,4   | 3,5   | 4,4   | 3,7   |
| Heizöl S / Heavy fuel oil   | Mio. GJ/a / million GJ/a | 1,9   | 2,1   | 0,9   | 1,1   | 0,6   | 0,4   | 0,3   | 0,2   | 0,2   | 0,3   |
|   | Anteil % / share %       | 2,0   | 2,1   | 0,9   | 1,2   | 0,6   | 0,5   | 0,4   | 0,2   | 0,2   | 0,4   |
| Heizöl EL / Fuel oil  | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,3   | 0,2   | 0,7   | 1,2   | 0,7   | 0,7   |
|   | Anteil % / share %       | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,3   | 0,2   | 0,7   | 1,3   | 0,8   | 0,8   |
| Erdgas u.a. Gase /<br>Natural gas and other<br>gases                  | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,3   | 0,1   | 0,3   | 0,1   | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,3   | 0,5   | 0,4   |
|   | Anteil % / share %       | 0,3   | 0,1   | 0,3   | 0,2   | 0,1   | 0,2   | 0,2   | 0,4   | 0,5   | 0,5   |
| Sonstige fossile<br>Brennstoffe /<br>Other fossil fuels               | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,3   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,4   | 0,1   | 0,1   | 1,4   | 0,0   | 0,3   |
|   | Anteil % / share %       | 0,4   | 0,3   | 0,5   | 0,6   | 0,5   | 0,1   | 0,2   | 1,6   | 0,0   | 0,3   |
| Fossile Brennstoffe<br>gesamt /<br>Total fossil fuels                 | Mio. GJ/a / million GJ/a | 46    | 47,3  | 43,7  | 36,7  | 34,4  | 36,7  | 36,6  | 33,8  | 33,9  | 31,9  |
|   | Anteil % / share %       | 50,0  | 47,5  | 45,6  | 41,6  | 39,0  | 38,9  | 39,0  | 37,5  | 36,6  | 35,4  |
| Alternative Brennstoffe<br>gesamt /<br>Total alternative fuels        | Mio. GJ/a / million GJ/a | 46,1  | 52,2  | 52,1  | 51,5  | 53,7  | 57,7  | 57,3  | 56,6  | 58,6  | 58,2  |
|   | Anteil % / share %       | 50,0  | 52,2  | 54,4  | 58,4  | 61,0  | 61,1  | 61,0  | 62,5  | 63,4  | 64,6  |
| Thermische Energie<br>gesamt /<br>Total thermal energy<br>consumption | Mio. GJ/a / million GJ/a | 92,1  | 99,5  | 95,8  | 88,2  | 88,1  | 94,4  | 93,9  | 90,4  | 92,5  | 90,1  |
|   | Anteil % / share %       | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

**Tabelle 3-3** Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe 2015.**Table 3-3** Used quantity and average calorific value of alternative fuels in 2015.

| Alternative Brennstoffe /<br>Alternative fuel   | 1.000 t/a | MJ/kg |
|---|-----------|-------|
| Altreifen / Waste tyres   | 221       | 28    |
| Altöl / Waste oil   | 24        | 31    |
| Fraktionen aus Industrie-/Gewerbe-<br>abfällen / Fractions of industrial<br>and commercial waste: |           |       |
| - Zellstoff, Papier und Pappe /<br>Pulp, paper and cardboard                                      | 93        | 4     |
| - Kunststoff / Plastics   | 654       | 22    |
| - Verpackungen / Packaging  | –         | –     |
| - Abfälle aus der Textilindustrie /<br>Wastes from the textile industry                           | –         | –     |
| - Sonstige / Others   | 1.127     | 21    |
| Tiermehle und -fette / Meat and<br>bone meal and animal fat                                       | 149       | 18    |
| Aufbereitete Fraktionen aus Sied-<br>lungsabfällen / Mixed fractions of<br>municipal waste        | 317       | 16    |
| Altholz / Waste wood  | 0         | 3     |
| Lösungsmittel / Solvents  | 145       | 24    |
| Bleicherde / Fuller's earth   | –         | –     |
| Klärschlamm / Sewage sludge   | 382       | 3     |
| Sonstige, wie: / Others, such as:   | 65        | 11    |
| - Ölschlamm / Oil sludge  |           |       |
| - Organische Destillations-<br>rückstände /<br>Organic distillation residues                      |           |       |

Quelle / Source: VDZ

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

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

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

### 3.2 Fuels

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

Apart from fossil fuels, the use of alternative fuels in the clinker burning process is gaining in importance nowadays. Alternative fuels accounted over 64 % of the total fuel energy demand of the German cement industry in 2015. Table 3-3 lists the alternative fuels utilised and their average calorific values.

## 4 Energie ■

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurden in Deutschland 2015 durchschnittlich 2.869 MJ Brennstoffenergie und 111,2 kWh elektrische Energie eingesetzt (Tabellen 4-1 und 4-2). Brennstoffenergie wird im Wesentlichen für das Brennen des Klinkers benötigt; elektrische Energie wird vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 35 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 22 %) und für die Mahlung der Zemente (ca. 38 %) verwendet.

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

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

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

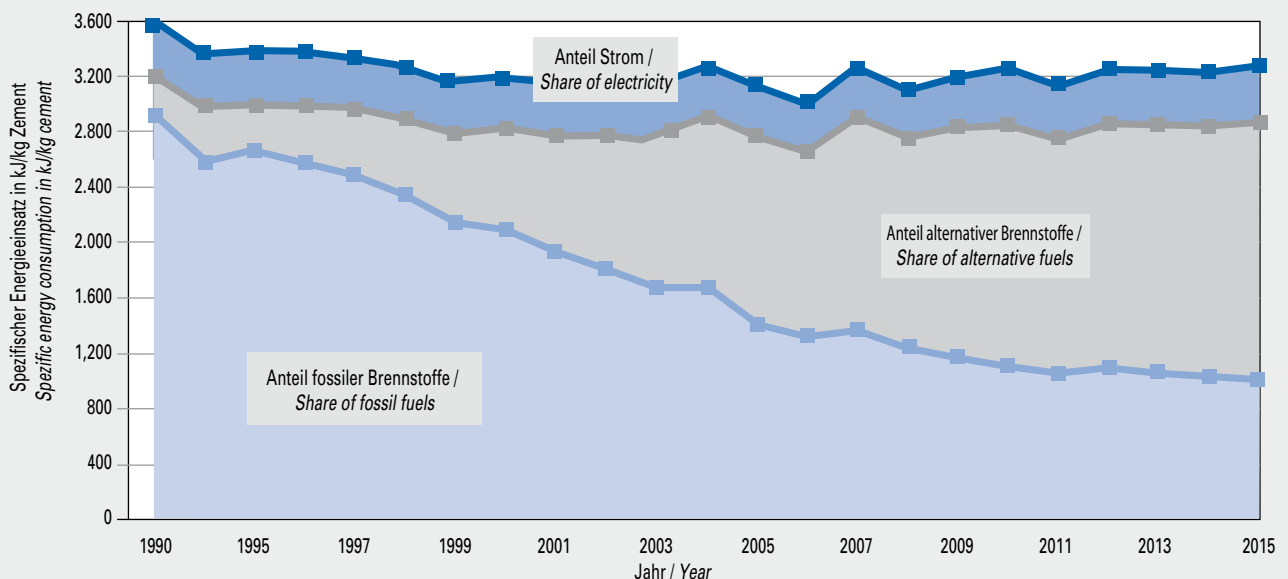
Höhere Anforderungen an die Produktqualität sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes waren die wesentlichen Ursachen für den tendenziell steigenden elektrischen Energieeinsatz der letzten Jahrzehnte (Bild 4-2). Nach einigen Jahren der Stabilisierung, zu der u. a. Verbesserungen in der Mahltechnik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

**Tabelle 4-1** Absoluter und spezifischer thermischer Brennstoffenergieeinsatz.

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

| Jahr / Year | Thermischer Brennstoffenergieeinsatz<br>Thermal fuel energy consumption |  |
|-------------|---|--|
|             | absolut in Mio. GJ/a<br>Absolute in million GJ/a                        | spezifisch in MJ/t Zement<br>Specific in MJ/t cement |
| 1990        | 109,5   | 3.200  |
| 1993        | –   | –  |
| 1994        | 102,9   | 3.000  |
| 1995        | 102,8   | 3.000  |
| 1996        | 97,6  | 2.995  |
| 1997        | 99,3  | 2.975  |
| 1998        | 100,7   | 2.905  |
| 1999        | 102,3   | 2.800  |
| 2000        | 99,3  | 2.835  |
| 2001        | 89,8  | 2.790  |
| 2002        | 85,8  | 2.790  |
| 2003        | 91,3  | 2.740  |
| 2004        | 94,9  | 2.920  |
| 2005        | 88,7  | 2.785  |
| 2006        | 92,1  | 2.674  |
| 2007        | 99,5  | 2.915  |
| 2008        | 95,8  | 2.764  |
| 2009        | 88,2  | 2.848  |
| 2010        | 88,1  | 2.874  |
| 2011        | 94,4  | 2.759  |
| 2012        | 93,9  | 2.866  |
| 2013        | 90,4  | 2.857  |
| 2014        | 92,5  | 2.849  |
| 2015        | 90,1  | 2.869  |

Quelle / Source: VDZ



**Bild 4-1** Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes.

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

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

| Jahr /<br>Year | Elektrischer Energieeinsatz<br>Electrical power consumption |  |
|----------------|---|--|
|                | absolut in Mio. MWh/a<br>Absolute in million<br>MWh/a       | spezifisch in kWh/t Zement<br>Specific in kWh/t cement |
| 1990           | 3,67  | 107,4  |
| 1993           | –   | –  |
| 1994           | 3,72  | 107,8  |
| 1995           | 3,64  | 106,5  |
| 1996           | 3,50  | 107,4  |
| 1997           | 3,47  | 103,9  |
| 1998           | 3,63  | 104,7  |
| 1999           | 3,73  | 102,0  |
| 2000           | 3,55  | 101,5  |
| 2001           | 3,21  | 99,8   |
| 2002           | 3,17  | 103,0  |
| 2003           | 3,32  | 99,5   |
| 2004           | 3,32  | 102,1  |
| 2005           | 3,24  | 101,9  |
| 2006           | 3,42  | 99,4   |
| 2007           | 3,40  | 99,7   |
| 2008           | 3,43  | 99,0   |
| 2009           | 3,15  | 101,8  |
| 2010           | 3,37  | 109,8  |
| 2011           | 3,74  | 109,4  |
| 2012           | 3,63  | 110,8  |
| 2013           | 3,49  | 110,0  |
| 2014           | 3,57  | 110,0  |
| 2015           | 3,49  | 111,2  |

Quelle / Source: VDZ

## 4 Energy ■

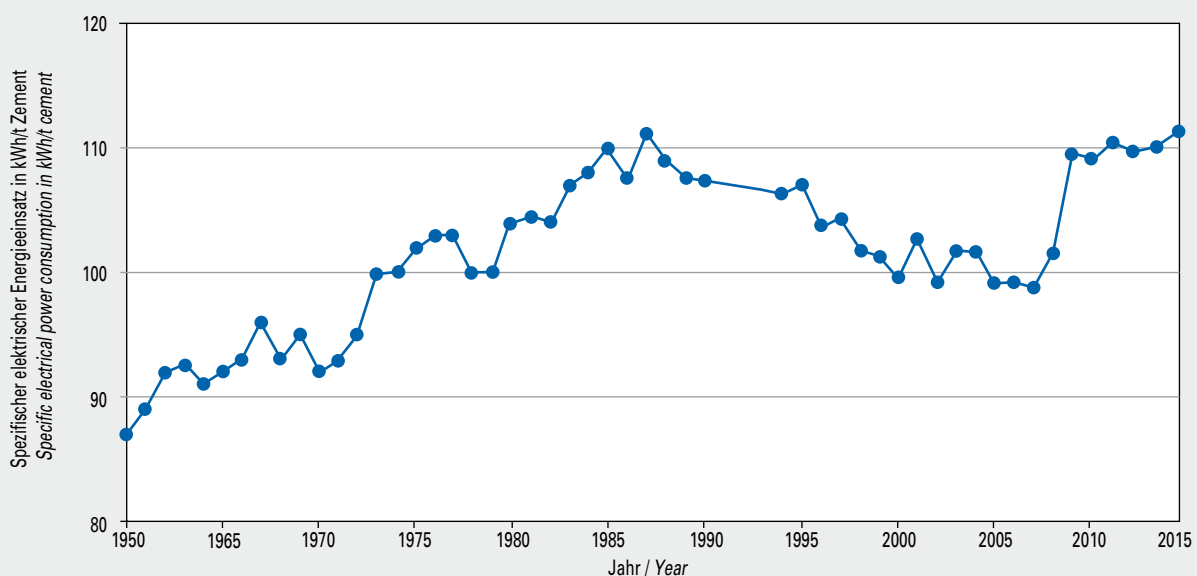
In Germany, the production of one tonne of cement consumed an average of 2,869 MJ fuel energy and 111.2 kWh electrical energy in 2015 (Tables 4-1 and 4-2). Fuel energy is primarily required for clinker burning, while electrical energy is chiefly used for raw material pre-treatment (about 35 %), for burning and cooling the clinker (about 22 %) and for cement grinding (about 38 %).

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

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

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

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



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

## 5 Emissionen ■

In Deutschland unterliegen die Errichtung und der Betrieb von Zementwerken den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach Brennstoffeinsatz werden unterschiedliche Anforderungen an die 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 (Tabelle 5-1). Kontinuierlich werden hauptsächlich Staub, Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) sowie Quecksilber (Hg), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und die Summe organischer Verbindungen gemessen; die anderen immissionsrechtlich relevanten Parameter werden in der Regel diskontinuierlich auf der Basis von Einzelmessungen bestimmt.

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

## 5 Emissions ■

In Germany, the erection and operation of cement works are subject to the provisions of the Federal Ambient Pollution Protection Act. Depending on the type of fuel utilised, different specifications for the emission concentrations to be complied with are laid down. If standard fuels are used exclusively, the regulations of the Clean Air Act (TA Luft) are decisive. If a proportion of the standard fuels is replaced by waste used as alternative fuels, the provisions of the German regulation on waste incineration (17<sup>th</sup> 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,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  as well as Hg,  $\text{NH}_3$  and total organic carbon (TOC), while the remaining parameters relevant to ambient pollution legislation are usually determined discontinuously by individual measurements.

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

In some of the figures the ranges for detection limits are marked in grey to facilitate assessment. Detection limits depend on sampling, sample preparation and analysis methods and are thus not identical

**Tabelle 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<br>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 zum Teil auch deutlich niedrigere Nachweisgrenzen genannt; sie beziehen sich dann jedoch im Allgemeinen nur auf den analytischen Teil des Prüfverfahrens.

### 5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Zum weit überwiegenden Teil ist dies CO<sub>2</sub>. Andere klimarelevante Gase, wie z. B. Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O) oder Methan (CH<sub>4</sub>), werden nur in sehr geringem Maße emittiert. CO<sub>2</sub>-Emissionen sind sowohl rohstoff- als auch energiebedingt. Rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen bei der Entsäuerung des Kalksteins und haben einen Anteil von etwa 60 % an den CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen. Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Tabelle 5-2 werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen diesen Anteilen entsprechend aufgeführt.

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie verpflichtet, ihren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und den spezifischen Brennstoffenergiebedarf von 1987 bis 2005 um 20 % zu senken. Diese Verpflichtung wurde weiterentwickelt und sieht seit dem 9. November 2000 eine 28%ige Minderung der energiebedingten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2008/2012 vor. Die deutsche Zementindustrie hatte ihr Ziel im Jahr 2012 erfüllt.

Am 01.01.2005 wurde in der EU ein Handelssystem für CO<sub>2</sub>-Emissionen eingeführt. Der Emissionshandel erstreckt sich auf die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung aller Brennstoffe

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.

### 5.1 Greenhouse gases / carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)

During the clinker burning process greenhouse gases are emitted. CO<sub>2</sub> accounts for the main share of these gases. Other greenhouse gases, such as dinitrogen monoxide (N<sub>2</sub>O) or methane (CH<sub>4</sub>), are emitted in very small quantities only.

CO<sub>2</sub> emissions are both raw material-related and energy-related. Raw material-related emissions are produced during limestone decarbonation (CaCO<sub>3</sub>) and account for about 60 % of total CO<sub>2</sub> emissions. Energy-related emissions are generated both directly through fuel combustion and indirectly through the use of electrical power. Table 5-2 lists the proportions of CO<sub>2</sub> emissions accordingly.

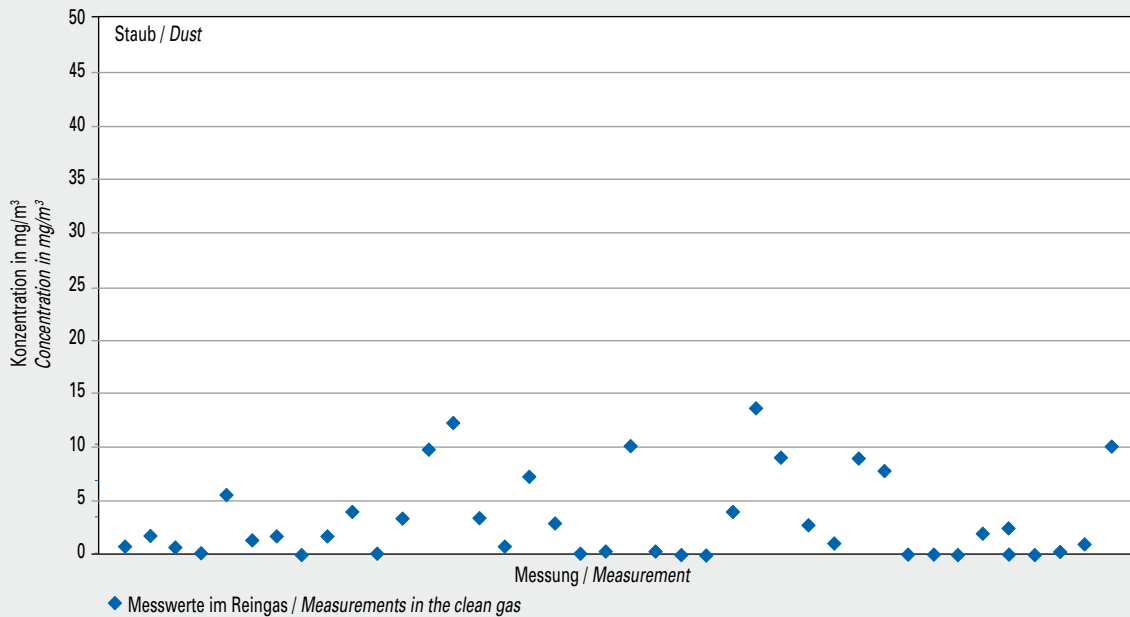
In the year 1995, the German cement industry committed itself to make its contribution to global warming prevention and lower its specific fuel energy demand by 20 % between 1987 and 2005. This commitment has been updated into a negotiated agreement and, since November 9, 2000, has provided for a 28 % reduction in energy-related specific CO<sub>2</sub> emissions from 1990 to 2008/2012. 2012, the German cement industry had achieved this target.

On January 1, 2005 a trading system for CO<sub>2</sub> emissions was introduced in the EU. Direct CO<sub>2</sub> 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

**Tabelle 5-2** CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie. / **Table 5-2** CO<sub>2</sub> emissions by the cement industry.

| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen in t CO <sub>2</sub> /t Zement / Specific CO <sub>2</sub> emissions in t CO <sub>2</sub> /t Zement |  |  |   |               |  |
|--|--|--|---|---------------|--|
| Jahr / Year  | Thermisch bedingt <sup>1)</sup> / Thermal energy-related <sup>1)</sup> | Elektrisch bedingt / Electrical energy-related | Rohstoff-bedingt / Raw-material-related | Summe / Total | Veränderung in % / Rate of change in % |
| 1999   | 0,199  | 0,068  | 0,427                                   | 0,694         | -5,2                                   |
| 2000   | 0,195  | 0,068  | 0,431                                   | 0,694         | 0,0                                    |
| 2001   | 0,179  | 0,067  | 0,415                                   | 0,661         | -4,8                                   |
| 2002   | 0,168  | 0,069  | 0,413                                   | 0,650         | -1,7                                   |
| 2003   | 0,156  | 0,067  | 0,401                                   | 0,624         | -4,0                                   |
| 2004   | 0,155  | 0,068  | 0,428                                   | 0,651         | 4,3                                    |
| 2005   | 0,132  | 0,068  | 0,406                                   | 0,606         | -6,9                                   |
| 2006   | 0,123  | 0,067  | 0,383                                   | 0,573         | -5,4                                   |
| 2007   | 0,128  | 0,067  | 0,419                                   | 0,614         | 7,2                                    |
| 2008   | 0,117  | 0,066  | 0,388                                   | 0,571         | -4,3                                   |
| 2009   | 0,110  | 0,068  | 0,398                                   | 0,575         | 0,7                                    |
| 2010   | 0,104  | 0,074  | 0,398                                   | 0,575         | 0,0                                    |
| 2011   | 0,100  | 0,073  | 0,383                                   | 0,556         | -1,9                                   |
| 2012   | 0,103  | 0,074  | 0,398                                   | 0,576         | 3,6                                    |
| 2013   | 0,099  | 0,074  | 0,387                                   | 0,559         | -3,0                                   |
| 2014   | 0,096  | 0,074  | 0,390                                   | 0,560         | 0,2                                    |
| 2015   | 0,094  | 0,074  | 0,394                                   | 0,562         | 0,4                                    |

<sup>1)</sup> nur Regelbrennstoffe / only regular fuels



**Bild 5-1** Mittelwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Staub im Reingas von 41 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-1** Average (year 2015) dust concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns.

(ohne biogene Anteile) und der Entsäuerung des Kalksteins. Die Selbstverpflichtung der Zementindustrie umfasste dagegen auch indirekte Emissionen aus dem elektrischen Energieverbrauch. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus alternativen Brennstoffen wurden hierbei nicht berücksichtigt, da sie fossile Brennstoffe ersetzen und somit zu einer CO<sub>2</sub>-Minderung an anderer Stelle führen. Da sich der Emissionshandel weiterhin nur auf den Klinkerbrennprozess bezieht, die Selbstverpflichtung aber auf die gesamte Zementherstellung, ergeben sich unterschiedliche Emissionsmengen in den entsprechenden Berichtssystemen.

## 5.2 Staub

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

## 5.3 Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>)

Der Klinkerbrennprozess ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) entstehen. Im Abgas von Drehofenanlagen liegen sie zu einem Anteil von etwa 95 % in Form von Stickstoffmonoxid (NO) und zu etwa 5 % als Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) vor. Da NO in der Atmosphäre weitgehend zu NO<sub>2</sub> umgewandelt wird, werden die Emissionen als NO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Abgas angegeben.

Die prozessbedingten NO<sub>x</sub>-Gehalte im Abgas von Drehofenanlagen würden ohne Minderungsmaßnahmen in den meisten Fällen die heute gültige Vorgabe der europäischen Industrieemissionsrichtlinie von 0,50 g/m<sup>3</sup> deutlich übersteigen.

deriving from the electrical energy demand. CO<sub>2</sub> emissions from the combustion of alternative fuels have not been taken into account, because they substitute fossil fuels and thereby reduce CO<sub>2</sub> 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/m<sup>3</sup> were measured at the stack of cement rotary kiln plants as recently as in the 1950ies, these can be limited to 10-20 mg/m<sup>3</sup> today.

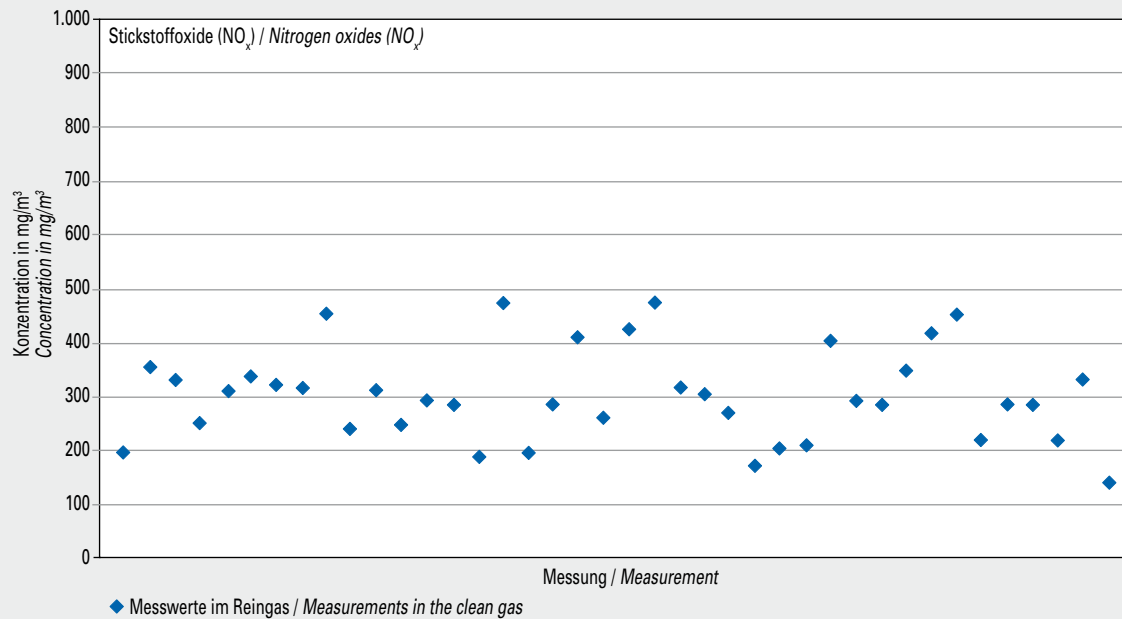
Figure 5-1 shows average values of dust concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns.

## 5.3 Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>)

The clinker burning process is a high-temperature process resulting in the formation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>). Nitrogen monoxide (NO) accounts for about 95 %, and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) for about 5 % of this compound present in the exhaust gas of rotary kiln plants. As most of the NO is converted to NO<sub>2</sub> in the atmosphere, emissions are given as NO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> exhaust gas.

Without reduction measures, process-related NO<sub>x</sub> 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/m<sup>3</sup>.





**Bild 5-2** Mittelwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) im Reingas von 41 Drehhofenanlagen.  
**Fig. 5-2** Average nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) concentrations (year 2015) in the clean gas of 41 rotary kilns.

Primäre Minderungsmaßnahmen betreffen eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Darüber hinaus wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um auf verschiedene Weise die anspruchsvollen NO<sub>x</sub>-Grenzwerte einhalten zu können. In 2015 wurden zehn Anlagen mit gestufter Verbrennung und 38 Anlagen mit SNCR-Verfahren betrieben. Weiterhin sind zwei Anlagen mit SCR-Technologie in Betrieb.

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

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

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

Bild 5-2 zeigt Mittelwerte der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) aus Messungen im Reingas von 41 Drehhofenanlagen.

Primary reduction measures are aimed at smoothing and optimizing plant operation. Furthermore, considerable efforts were made to achieve compliance with the demanding NO<sub>x</sub> values in different ways. In 2015, ten plants were equipped with staged combustion, and the SNCR technique was applied at about 38 plants. Furthermore two plants with SCR technology are in operation.

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

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

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

Figure 5-2 shows average values of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) concentrations in the clean gas of 41 rotary kilns.

#### 5.4 Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)

Schwefel wird dem Klinkerprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen. Ursache für höhere SO<sub>2</sub>-Emissionen von den Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370 °C und ca. 420 °C zu SO<sub>2</sub> oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor. Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die SO<sub>2</sub>-Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu 1,2 g/m<sup>3</sup> betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO<sub>2</sub>-Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11 Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der SO<sub>2</sub>-Emissionen eingesetzt.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung im Drehofen vollständig zu SO<sub>2</sub> umgewandelt. Dieses SO<sub>2</sub> reagiert im Vorwärmer- und Ofenbereich zu Alkalisulfaten, die überwiegend im Klinker gebunden werden.

Bild 5-3 zeigt 38 Jahresmittelwerte der Konzentration von Schwefeldioxid aus kontinuierlicher Überwachung an 38 Ofenanlagen.

#### 5.5 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (Σ C)

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

#### 5.4 Sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>)

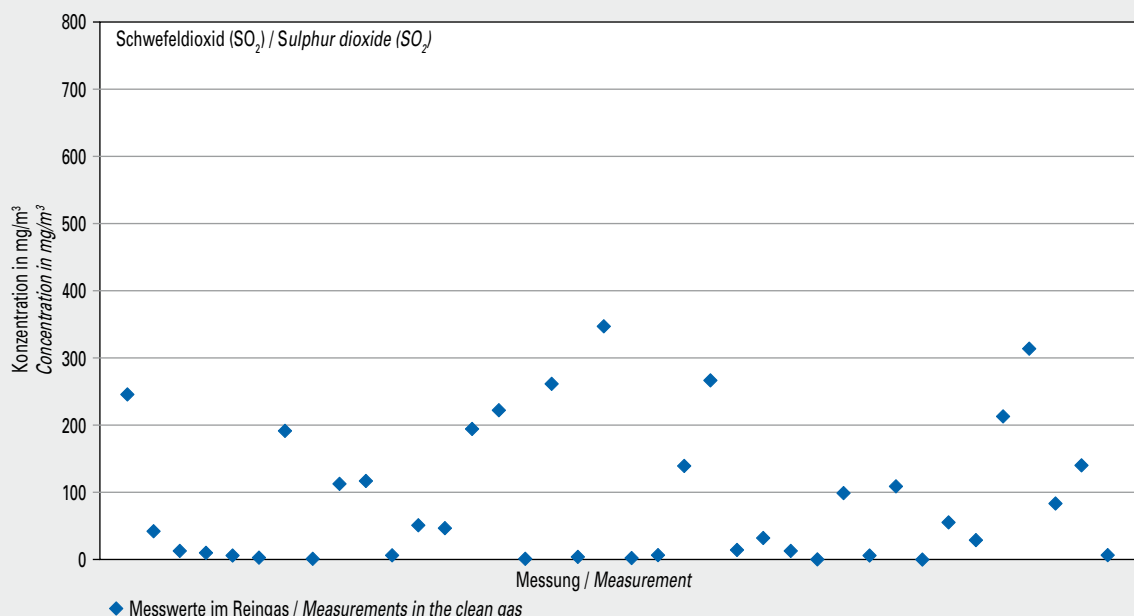
Sulphur is fed into the clinker burning process via raw materials and fuels. Depending on their respective deposits, the raw material so may contain sulphur bound as sulphide or sulphate. Higher SO<sub>2</sub> emissions by rotary kiln systems of the cement industry might be attributable to the sulphides contained in the raw material, which become oxidised to form SO<sub>2</sub> at temperatures between 370 °C and 420 °C prevailing during the kiln feed preheating process. Most of the sulphides are pyrite or marcasite contained in the raw materials. Given the sulphide concentrations found in German raw material deposits, SO<sub>2</sub> emission concentrations can total up to 1.2 g/m<sup>3</sup> depending on the site location. The cement industry has made great efforts to reduce SO<sub>2</sub> emissions. For example, lime hydrate is utilised at 11 kiln systems to lower SO<sub>2</sub> emissions.

The sulphur input with the fuels is completely converted to SO<sub>2</sub> during combustion in the rotary kiln. In the area of the preheater and the kiln, this SO<sub>2</sub> reacts to form alkali sulphates, which are predominantly bound in the clinker.

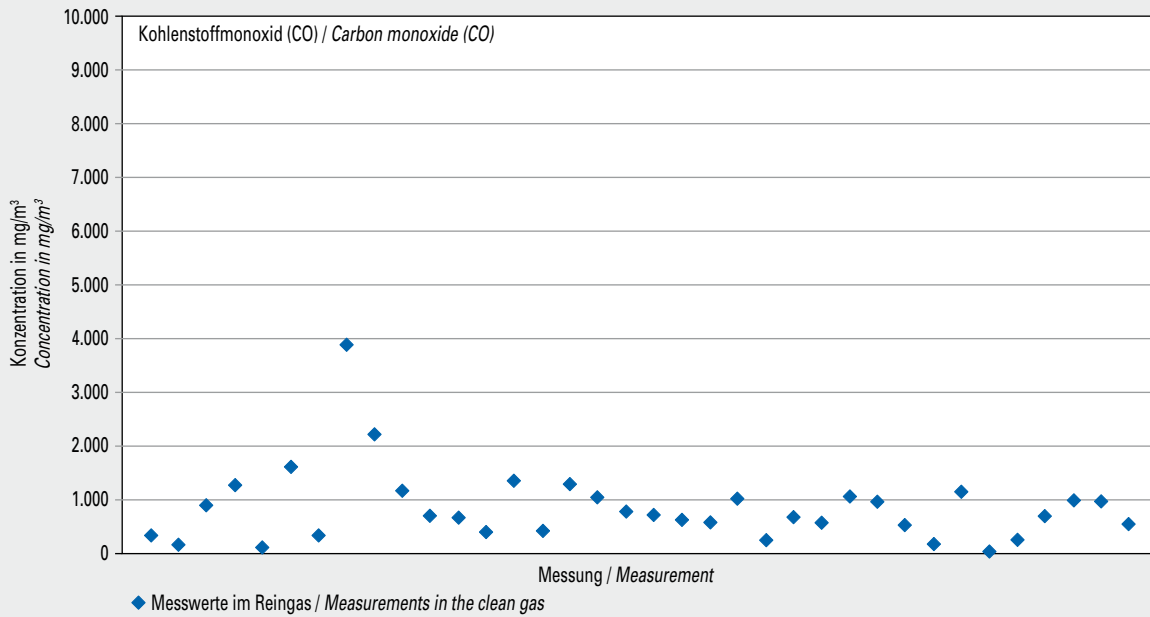
Figure 5-3 shows 38 annual average values of the concentration of sulphur dioxide from continuous monitoring at 38 rotary kilns.

#### 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 conjunction with long residence times in the high temperature range this practically leads to a complete fuel burn-out. The thermal decomposition of organic material in the preheater leads to the corresponding emissions of carbon monoxide and total carbon.



**Bild 5-3** Mittelwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-3** Average sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.



**Bild 5-4** Mittelwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid (CO) im Reingas von 36 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-4** Average carbon monoxide (CO) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 36 rotary kilns.

Ursache der Emissionen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff beim Klinkerbrennprozess sind vor allem die mit den natürlichen Rohstoffen in geringen Mengen zugeführten organischen Bestandteile (Überreste von Organismen und Pflanzen, die im Laufe der Erdgeschichte im Gestein eingebaut wurden). Sie werden beim Vorwärmen des Brennguts umgesetzt und weitgehend zu CO und CO<sub>2</sub> 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.

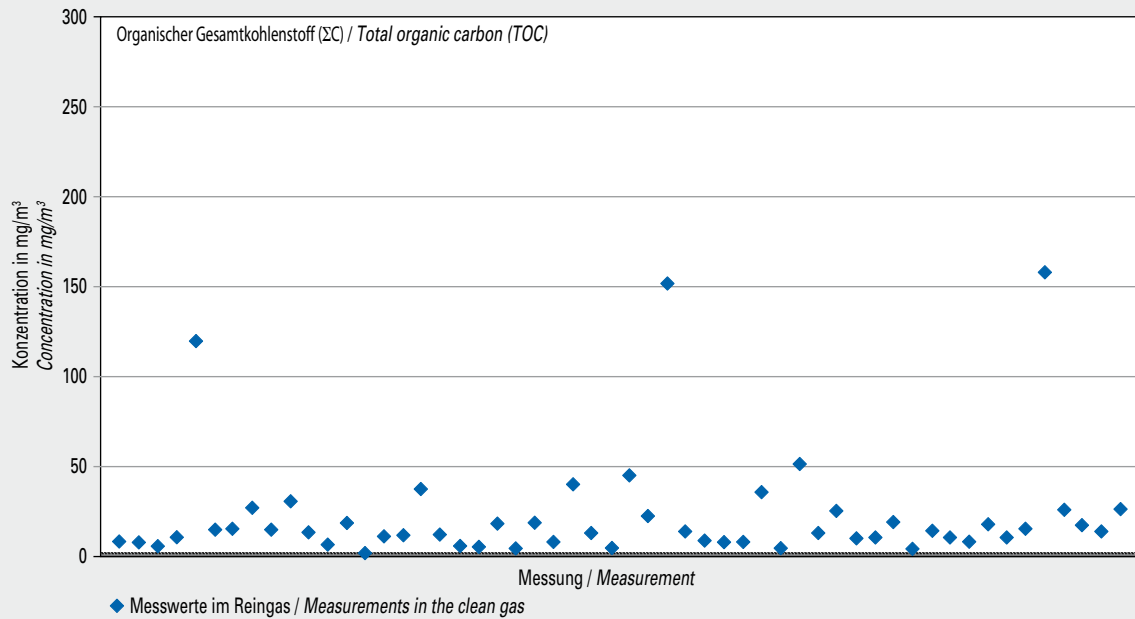
Bild 5-4 zeigt 36 Mittelwerte der CO-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung an 36 Ofenanlagen.

Bild 5-5 zeigt 54 Messwerte der Konzentration von organischem Gesamtkohlenstoff im Reingas von 33 Ofenanlagen.

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 CO<sub>2</sub>. 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 5-4 shows 36 average values of the concentration from continuous monitoring at 36 rotary kilns.

Figure 5-5 shows 54 total organic carbon concentration values in the clean gas of 33 rotary kilns.



**Bild 5-5** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von organischem Gesamtkohlenstoff (ΣC) im Reingas von 33 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-5** Total organic carbon (TOC) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 33 rotary kilns.

### 5.6 Dioxine und Furane (PCDD/F)

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

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

Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Nachweisgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Laboratorien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948  $\pm 0,05$  ng ITEQ/m<sup>3</sup> (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent).

Im Bild 5-6 sind 106 Messwerte der Konzentration von Dioxinen und Furanen aus 2015 im Reingas von 36 Ofenanlagen dargestellt. In sieben Fällen konnte kein PCDD/F nachgewiesen werden.

### 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.

### 5.6 Dioxins and furans (PCDD/F)

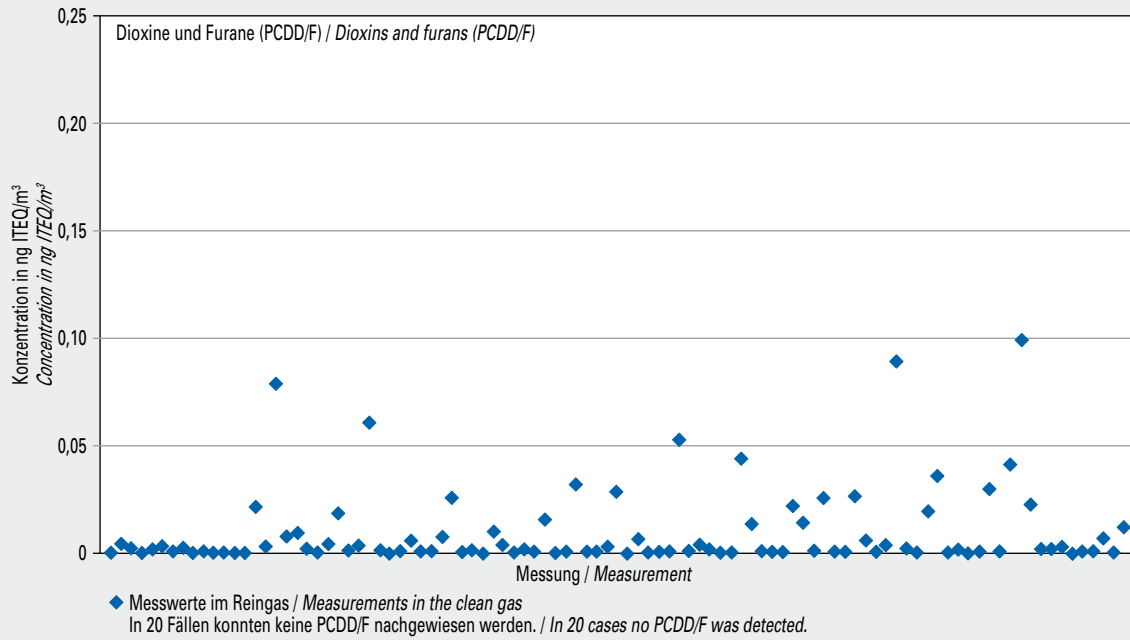
Rotary kilns of the cement industry and classic combustion plants mainly differ in terms of the combustion conditions prevailing during clinker burning. Kiln feed and rotary kiln exhaust gases are conveyed in counter-flow and mixed thoroughly. Thus, temperature distribution and residence time in rotary 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<sup>3</sup> (ITEQ: international toxicity equivalent).

Figure 5-6 shows 106 dioxin and furan concentration values from measurements in the clean gas at 39 rotary kilns in 2015. In seven cases no PCDD/F was detected.

### 5.7 Polychlorinated biphenyls (PCB)

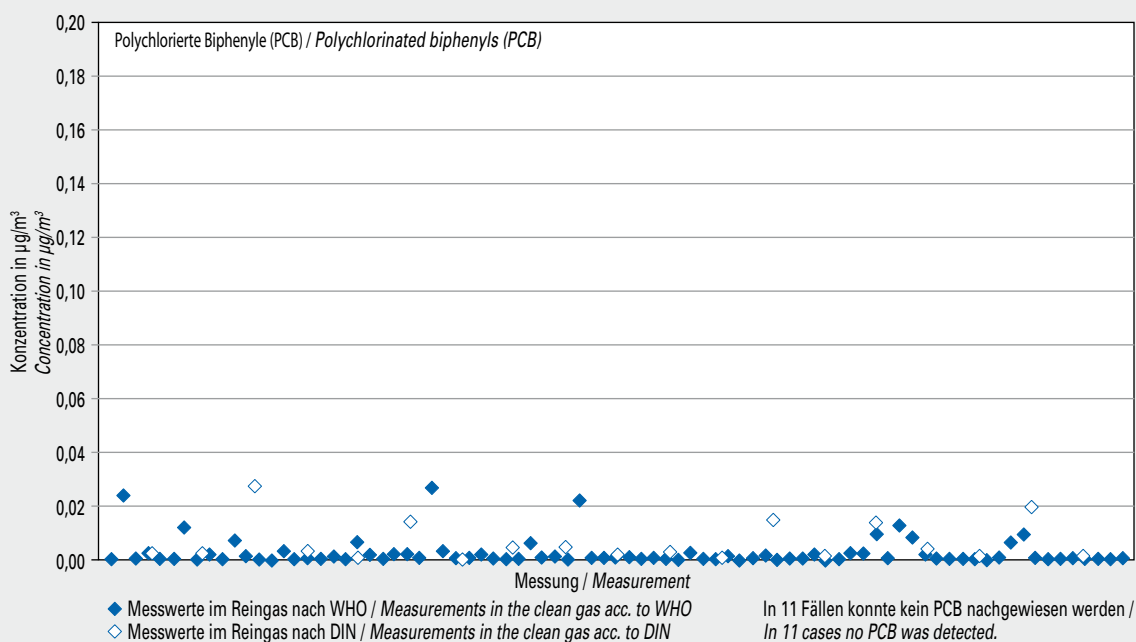
The emission behaviour of PCB is comparable to that of dioxins and furans. PCB may be introduced into the process via alternative raw materials and fuels. The rotary kiln systems of the cement industry guarantee a virtually complete destruction of these trace components.



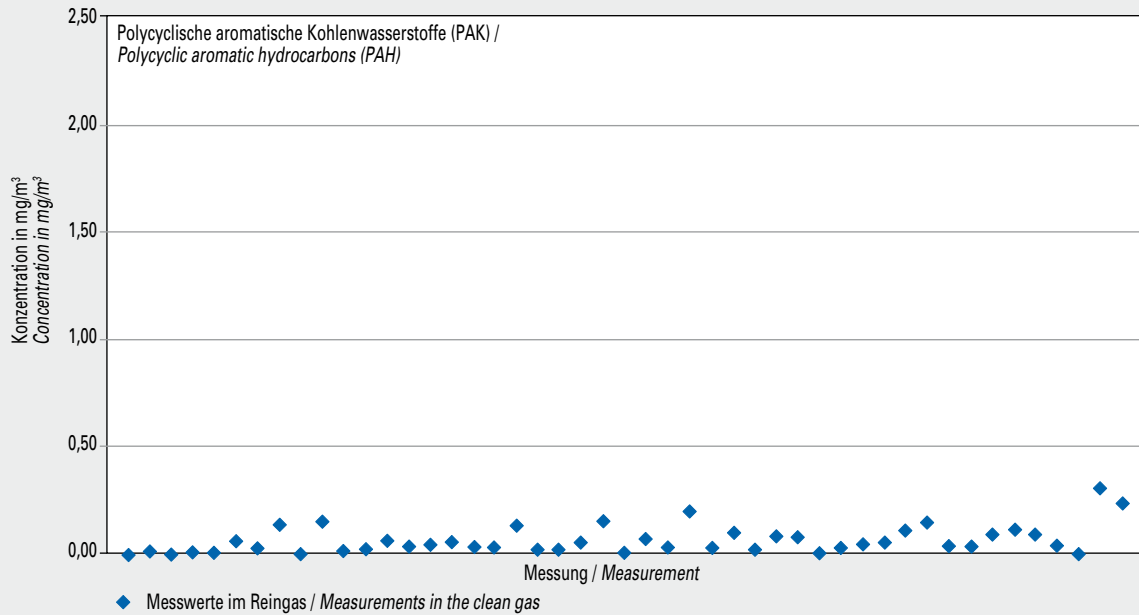
**Bild 5-6** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) im Reingas von 36 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-6** Dioxin and furan (PCDD/F) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 36 rotary kilns.

Bild 5-7 zeigt 113 Werte aus Messungen im Reingas von 35 Ofenanlagen, 24 Werte nach DIN, 89 Werte nach WHO. In elf 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  $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht abgesichert.

Figure 5-7 shows 113 values from measurements in the clean gas at 35 rotary kilns, 24 values acc. to DIN, 89 values acc. to WHO. In eleven 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  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  the measurement methods currently used do not provide secured emission concentrations.



**Bild 5-7** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von polychlorierten Biphenylen (PCB) im Reingas von zehn Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-7** Polychlorinated biphenyl (PCB) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of ten rotary kilns.



**Bild 5-8** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von PAK (nach EPA 610) im Reingas von 16 Drehofenanlagen.

**Fig. 5-8** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610) concentration values (year 2015) in the clean gas of 16 rotary kilns.

### 5.8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

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

Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten. Bei den derzeit eingesetzten Messverfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,01 mg/m<sup>3</sup> nicht abgesichert.

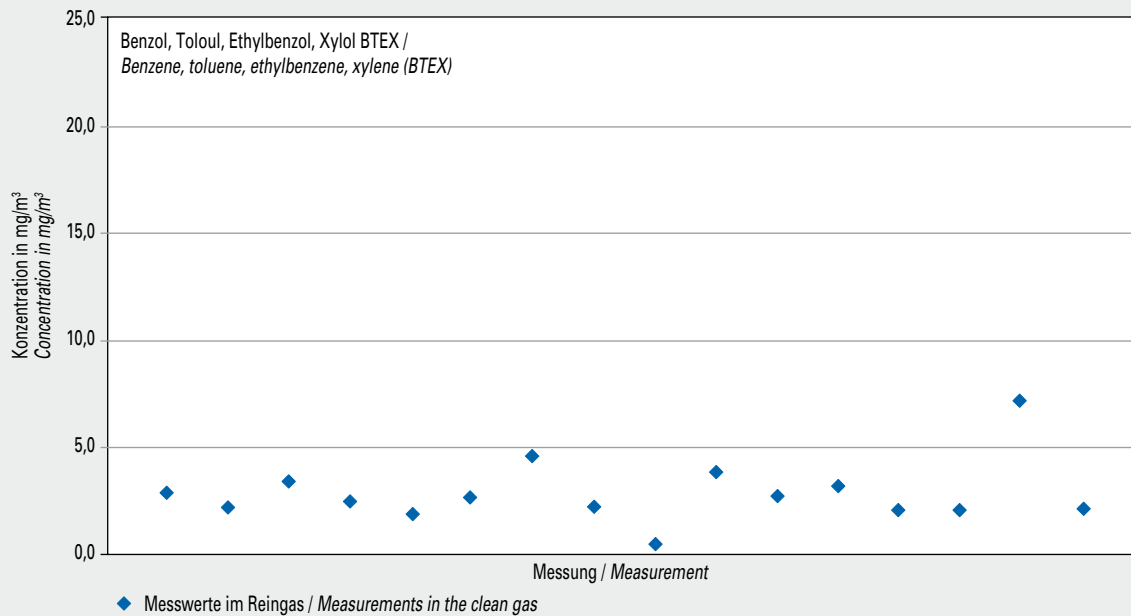
Bild 5-8 zeigt 47 Werte aus Messungen im Reingas von 16 Ofenanlagen.

### 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/m<sup>3</sup> the measuring methods currently used do not provide secured emission concentrations.

Figure 5-8 shows 47 values from measurements in the clean gas at 16 rotary kilns.



**Bild 5-9** Messwerte (2015) der Konzentration von Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol (BTEX) im Reingas von 6 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-9** Benzene, Toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 6 rotary kilns.

### 5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX)

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

Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten. Bei den eingesetzten Messverfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,013 mg/m<sup>3</sup> nicht abgesichert.

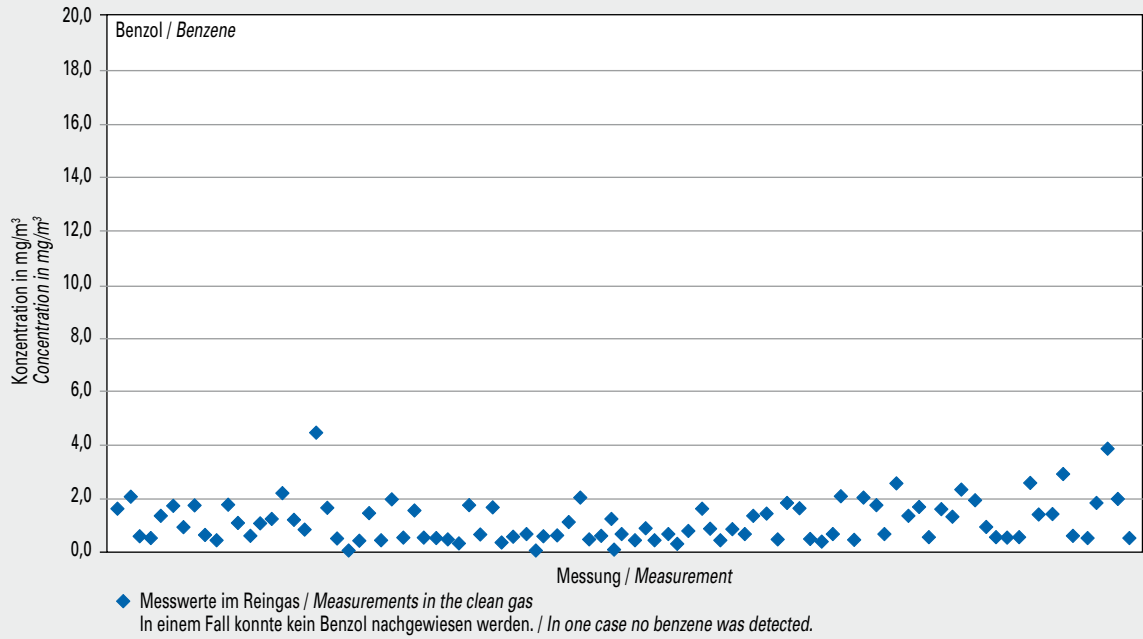
In 2015 wurden 16 Werte aus Messungen der BTEX-Konzentration im Reingas von sechs Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-9).

### 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/m<sup>3</sup> the measuring methods currently used do not provide secured emission concentrations.

Figure 5-9 shows 16 BTEX concentration values from measurements in the clean gas at six rotary kilns.



**Bild 5-10** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Benzol im Reingas von 26 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-10** Benzene concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 26 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.

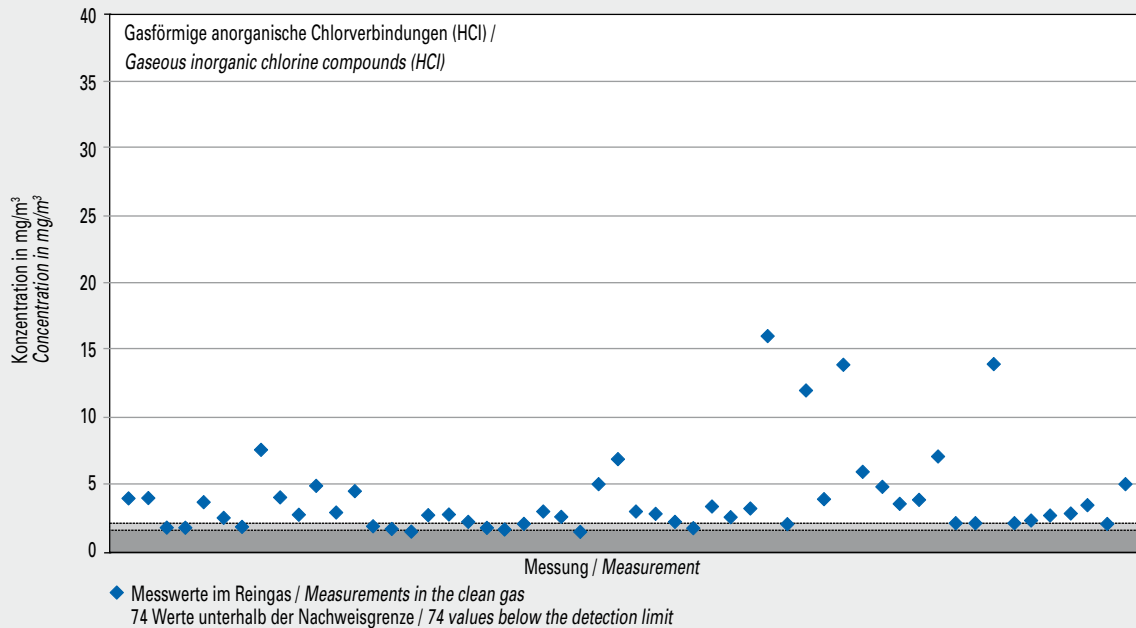
Bild 5-10 zeigt 94 Werte aus Messungen der Benzol-Konzentration im Reingas von 26 Ofenanlagen. In einem Fall konnte kein Benzol nachgewiesen werden. Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten. Bei den derzeit eingesetzten Messverfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von 0,013 mg/m<sup>3</sup> nicht abgesichert.

### 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 5-10 shows 94 benzene concentration values from measurements in the clean gas at 26 rotary kilns. In one case no benzene was detected. No detection limit can be deduced from the standard. Below 0.013 mg/m<sup>3</sup> the measuring methods currently used do not provide secured emission concentrations.





**Bild 5-11** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentrationen gasförmiger anorg. Chlorverbindungen (HCl) im Reingas von 38 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-11** Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 38 rotary kilns.

### 5.11 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl)

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

Bild 5-11 zeigt 128 Werte aus Messungen der HCl-Konzentration im Reingas von 38 Ofenanlagen. 74 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 1,5 und 2,1 mg/m<sup>3</sup>.

### 5.12 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF)

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

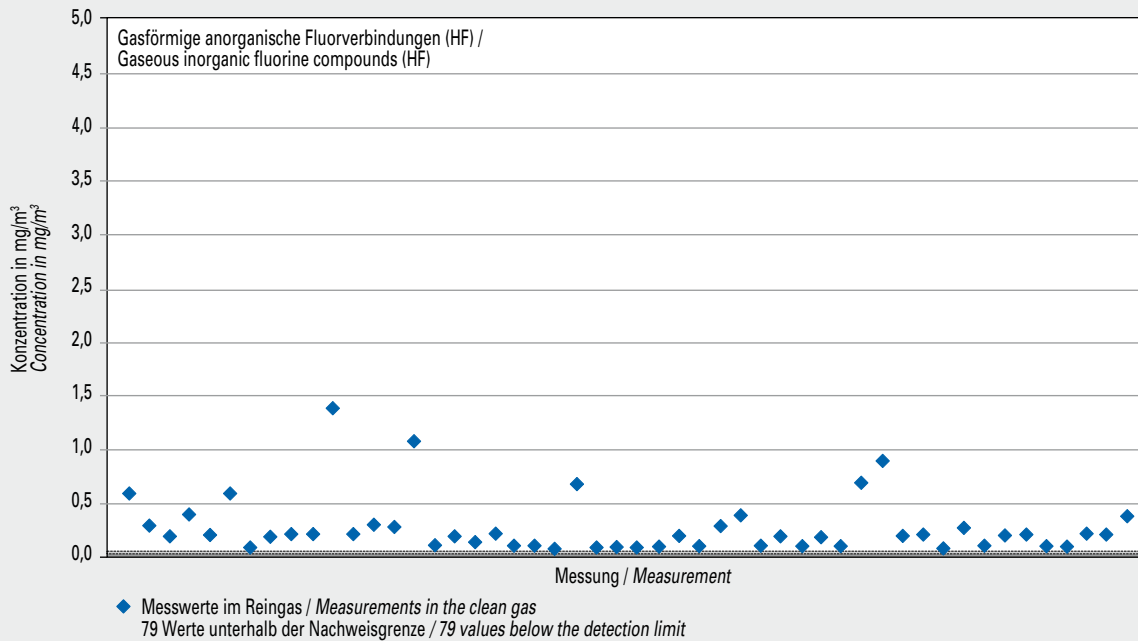
### 5.11 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)

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 5-11 shows 128 HCl concentration values from measurements in the clean gas at 38 rotary kilns. 74 values were below the detection limit, which ranges between 1.5 and 2.1 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

### 5.12 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF)

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



**Bild 5-12** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration gasförm. anorg. Fluorverbindungen (HF) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-12** Gaseous inorganic fluorine compounds (HF) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das Messgasfilter passieren, können bei Drehofenanlagen der Zementindustrie geringe Gehalte an gasförmigen Fluorverbindungen vortäuschen.

Bild 5-12 zeigt 129 Werte aus Messungen der HF-Konzentration im Reingas von 37 Ofenanlagen. 79 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,04 und 0,06 mg/m<sup>3</sup>.

### 5.13 Spurenelemente

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

Spurenelemente aus den Brennstoffen gelangen zunächst in die Verbrennungsgase, werden jedoch aufgrund des Rückhaltevermögens von Ofen und Vorwärmer nur in äußerst geringem Maße emittiert. Tabelle 5-3 enthält repräsentative Transferkoeffizienten für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer. Mit ihnen lässt sich berechnen, welcher Anteil der Spurenelemente aus den Brennstoffen mit dem Reingas emittiert wird.

Figure 5-12 shows 129 HF concentration values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 79 values were below the detection limit, which ranges between 0.04 and 0.06 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

### 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 5-3 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

Die in der Tabelle aufgeführten Emissionsfaktoren sind dagegen höher als die jeweiligen Transferkoeffizienten. Sie berücksichtigen neben den brennstoffbedingten Emissionen auch die rohstoffbedingten Emissionen, die in der Regel deutlich überwiegen. Für die Emissionsfaktoren werden Bandbreiten angegeben, die sich aus Bilanzuntersuchungen ergaben. Auf Angaben für das Element Quecksilber wird verzichtet, da die Messergebnisse vor allem von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängen.

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

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

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

Aufgrund des Verhaltens der Spurenelemente beim Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheideleistung der Entstaubungseinrichtungen liegen die Emissionskonzentrationen der Spurenelemente insgesamt auf einem niedrigen Niveau. So liegen die im Jahr 2015 gemessenen Werte der in der 17. BImSchV genannten Spurenelemente nur in ca. 23 % aller Fälle oberhalb der Nachweisgrenze.

bandwidths indicated for the emission factors result from inventory investigations. No values are given for mercury since measurement results primarily depend on the respective operating conditions.

Under the conditions prevailing in the clinker burning process, 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.

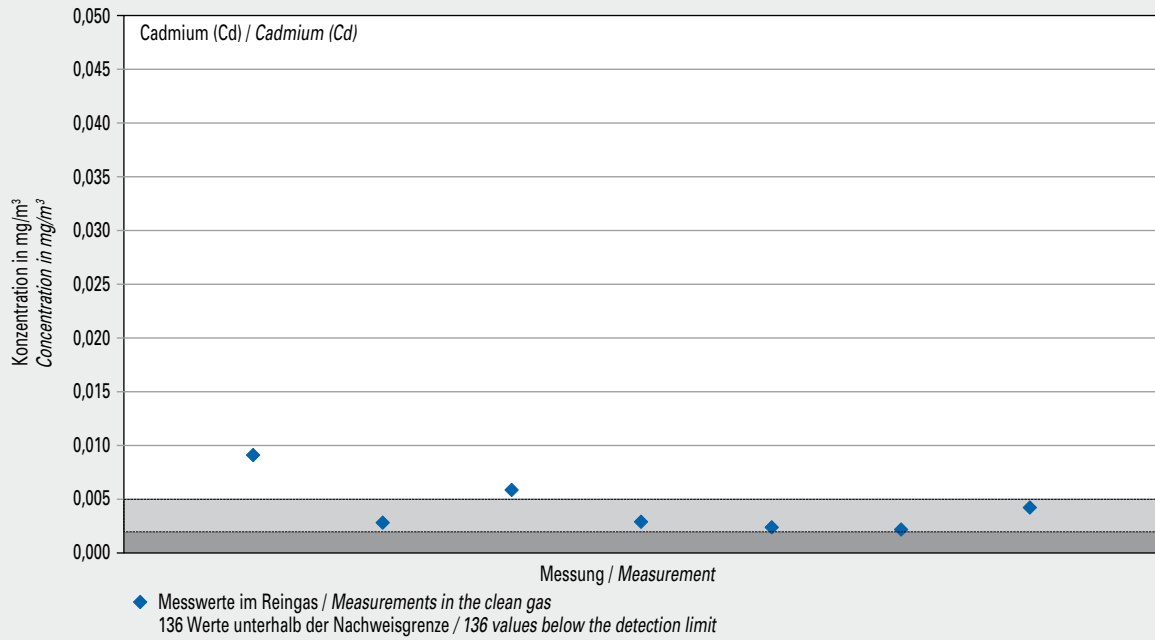
Mercury and its compounds are not precipitated in the kiln and the preheater. They condense on the exhaust gas route due to the cooling of the gas and are partially adsorbed by the raw material particles. This portion is precipitated in the kiln exhaust gas filter.

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 2015 of the trace elements listed in the German regulation on waste incineration (17<sup>th</sup> BImSchV) were above the detection limit in merely about 23 % of all cases.

**Tabelle 5-3** Emissionsfaktoren (EF, emittierter Anteil des Gesamteintrags) und Transferkoeffizienten (TK, emittierter Anteil des Brennstoffeintrags) für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer.

**Table 5-3** 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 5-13** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Cadmium (Cd) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-13** Cadmium (Cd) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

#### 5.13.1 Cadmium (Cd)

In 2015 wurden 143 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 136 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,002 und 0,005 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-13).

#### 5.13.1 Cadmium (Cd)

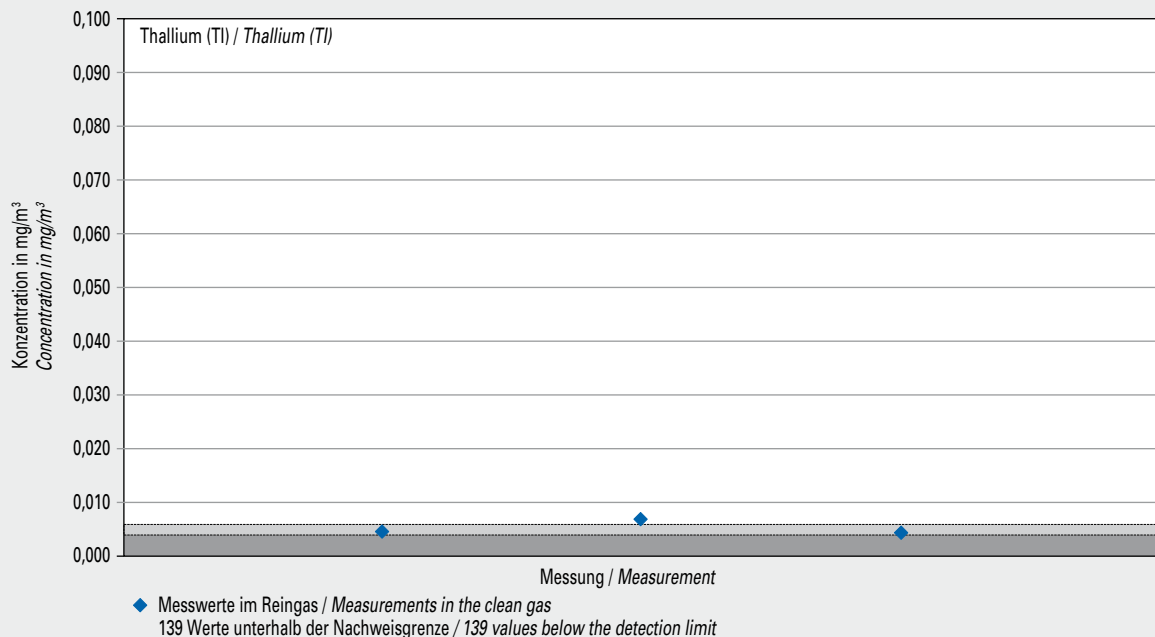
Figure 5-13 shows 143 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 136 values were below the detection limit, which ranges between 0.002 and 0.005 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

#### 5.13.2 Thallium (Tl)

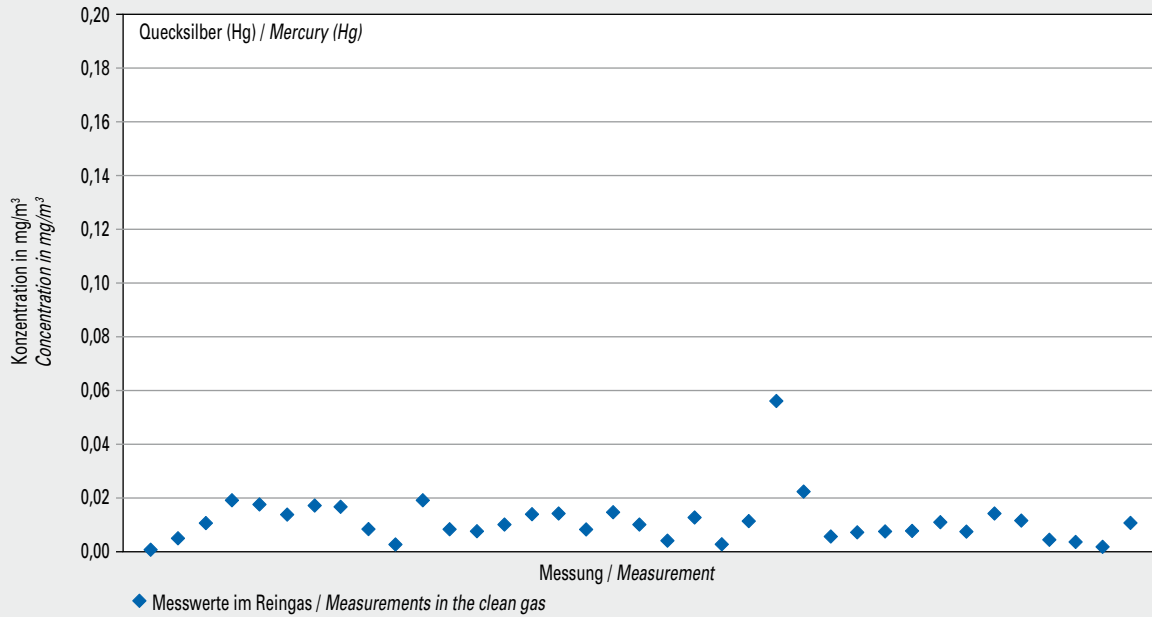
In 2015 wurden 142 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Ofenanlagen ermittelt. 139 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,004 und 0,006 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-14).

#### 5.13.2 Thallium (Tl)

Figure 5-14 shows 142 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns. 139 values were below the detection limit, which ranges between 0.004 and 0.006 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-14** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Thallium (Tl) im Reingas von 36 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-14** Thallium (Tl) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 36 rotary kilns.



**Bild 5-15** Mittelwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Quecksilber (Hg) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-15** Mercury (Hg) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

#### 5.13.3 Quecksilber (Hg)

In 2015 wurden 37 Jahresmittelwerte aus kontinuierlicher Überwachung von 37 Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-15).

#### 5.13.3 Mercury (Hg)

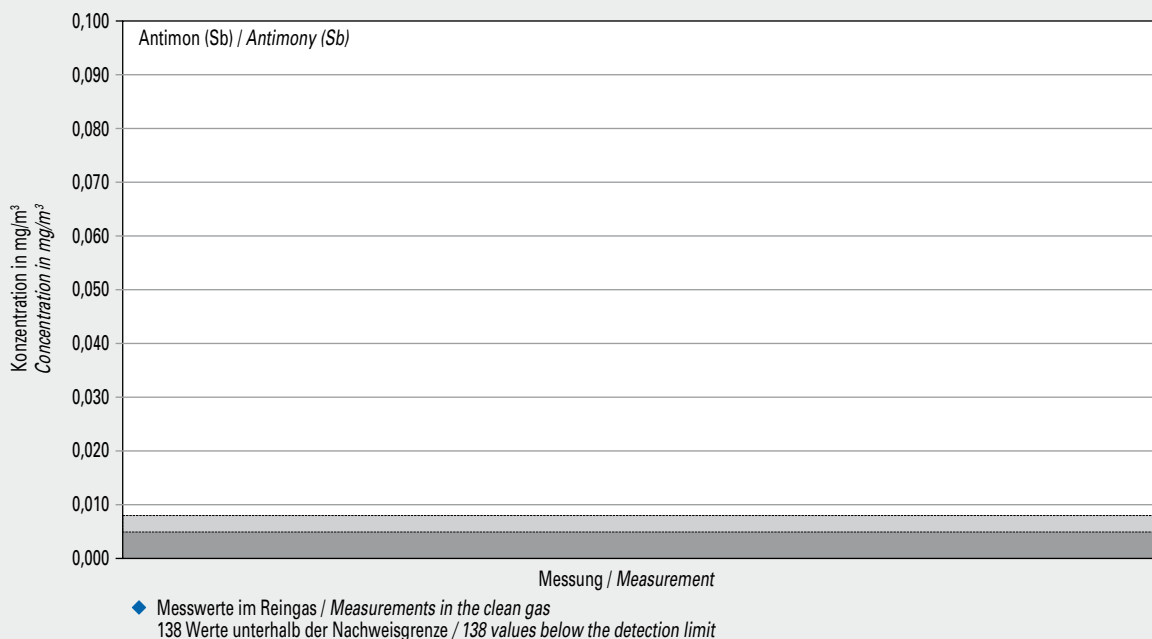
Figure 5-15 shows 37 annual average values from continuous monitoring at 37 rotary kilns.

#### 5.13.4 Antimon (Sb)

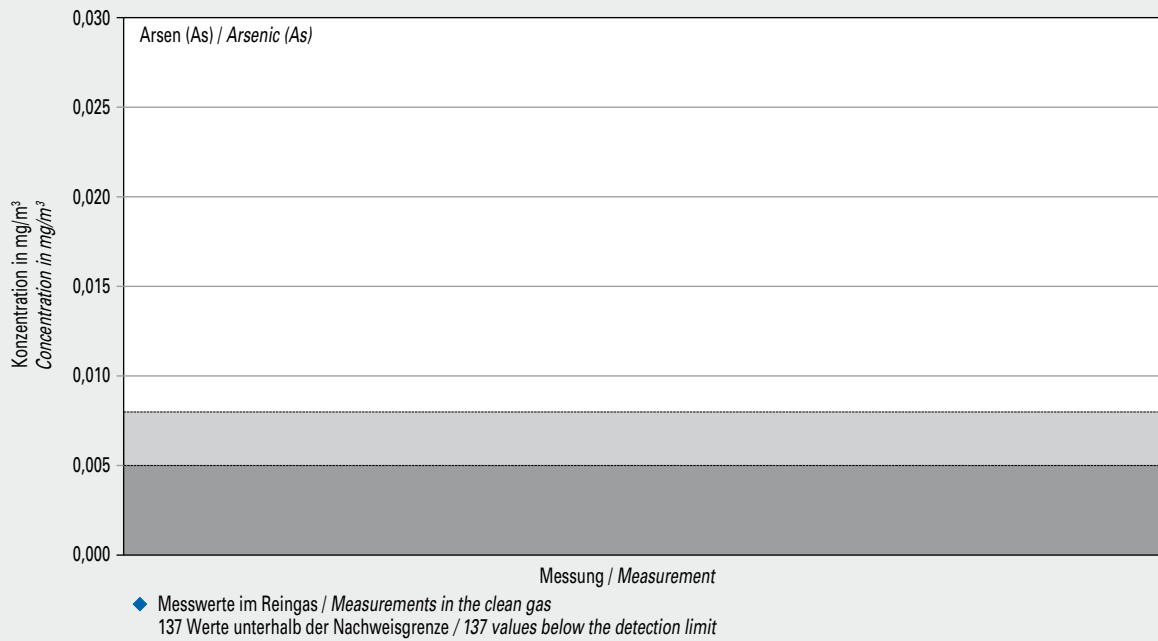
In 2015 wurden 138 Werte aus Messungen im Reingas von 35 Ofenanlagen ermittelt. 138 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-16).

#### 5.13.4 Antimony (Sb)

Figure 5-16 shows 138 values from measurements in the clean gas at 35 rotary kilns. 138 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-16** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Antimon (Sb) im Reingas von 35 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-16** Antimon (Sb) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 35 rotary kilns.



**Bild 5-17** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Arsen (As) im Reingas von 35 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-17** Arsenic (As) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 35 rotary kilns.

#### 5.13.5 Arsen (As)

In 2015 wurden 137 Werte aus Messungen im Reingas von 35 Ofenanlagen ermittelt. 137 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-17).

#### 5.13.5 Arsenic (As)

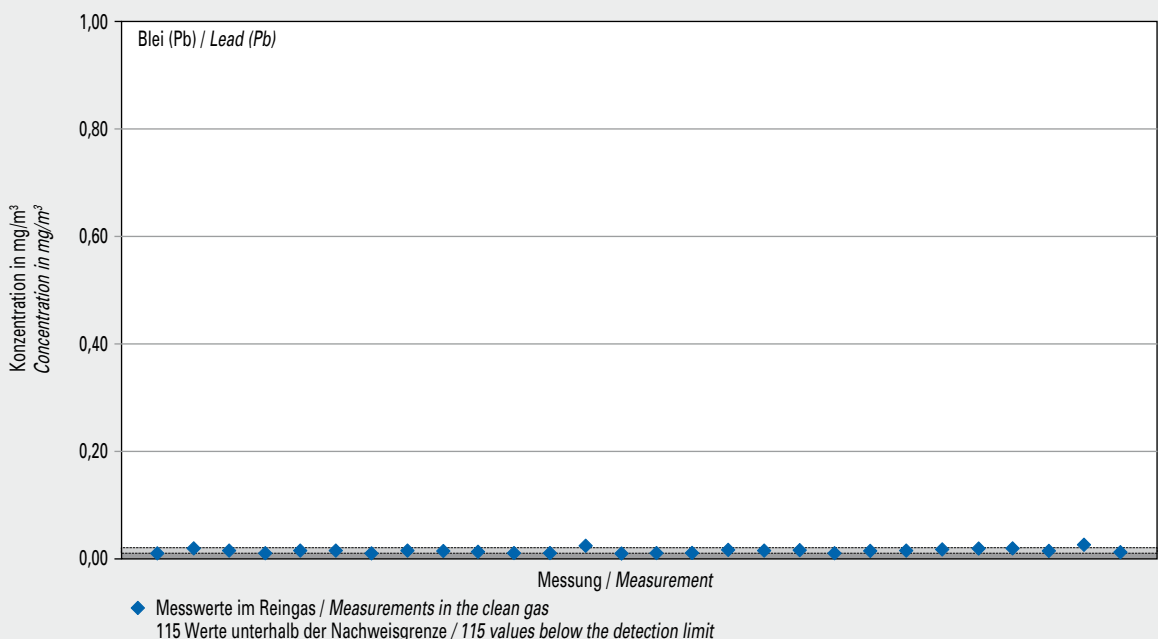
Figure 5-17 shows 137 values from measurements in the clean gas at 35 rotary kilns. 137 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

#### 5.13.6 Blei (Pb)

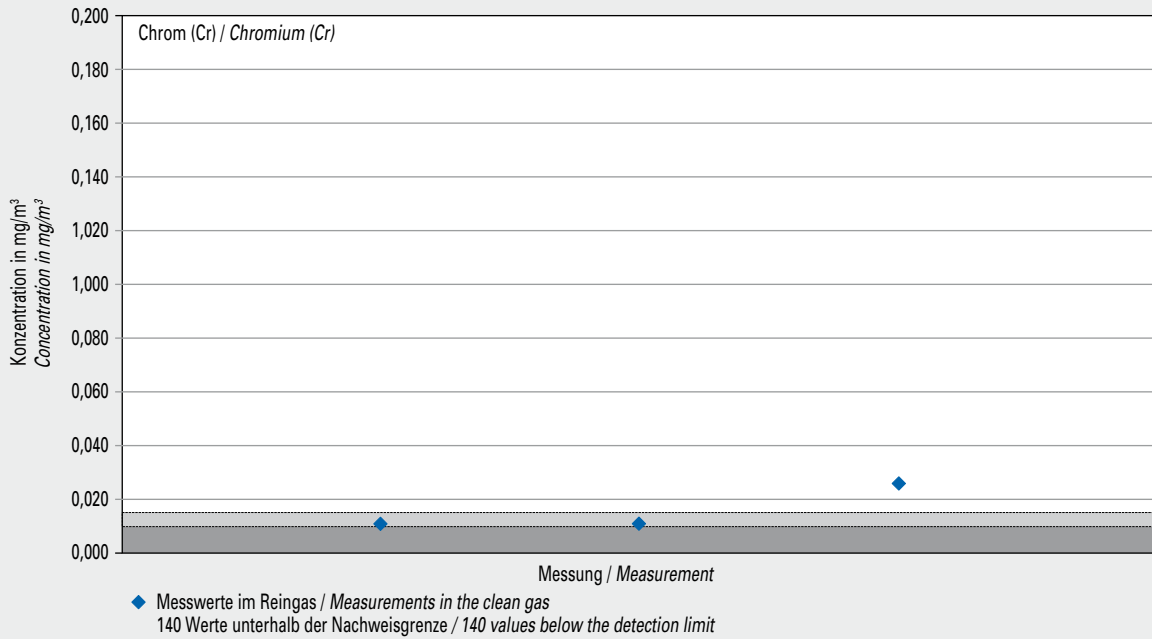
In 2015 wurden 143 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 115 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,01 und 0,02 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-18).

#### 5.13.6 Lead (Pb)

Figure 5-18 shows 143 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 115 values were below the detection limit, which ranges between 0.01 and 0.02 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-18** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Blei (Pb) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-18** Lead (Pb) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.



**Bild 5-19** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Chrom (Cr) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-19** Chromium (Cr) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

#### 5.13.7 Chrom (Cr)

In 2015 wurden 143 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 140 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,01 und 0,015 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-19).

#### 5.13.7 Chromium (Cr)

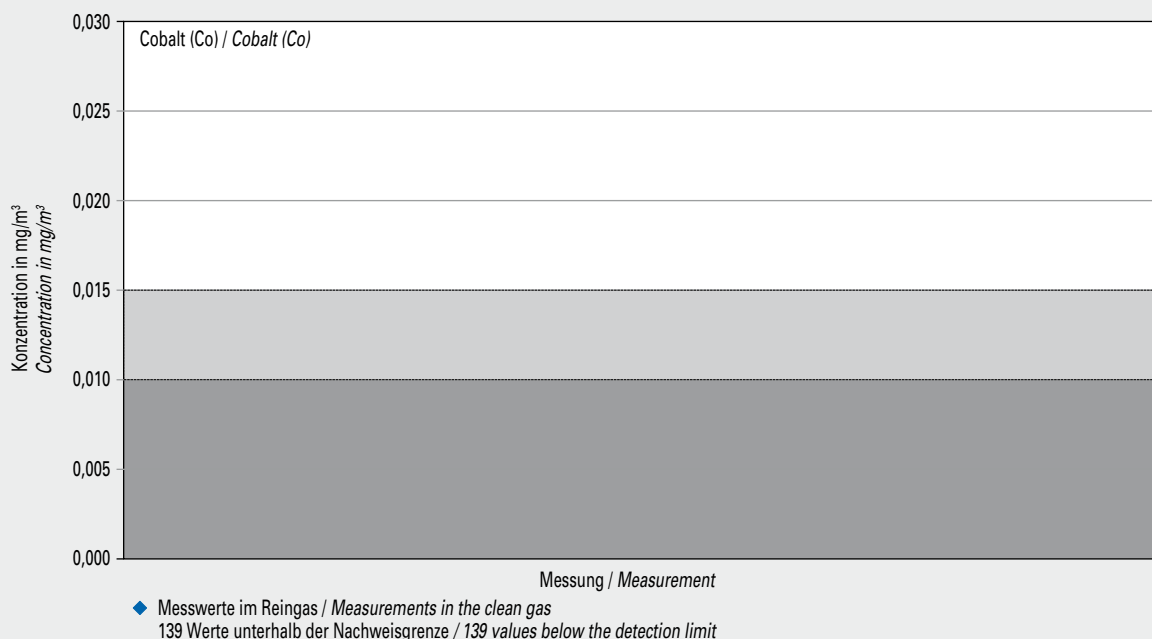
Figure 5-19 shows 143 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 140 values were below the detection limit, which ranges between 0.01 and 0.015 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

#### 5.13.8 Cobalt (Co)

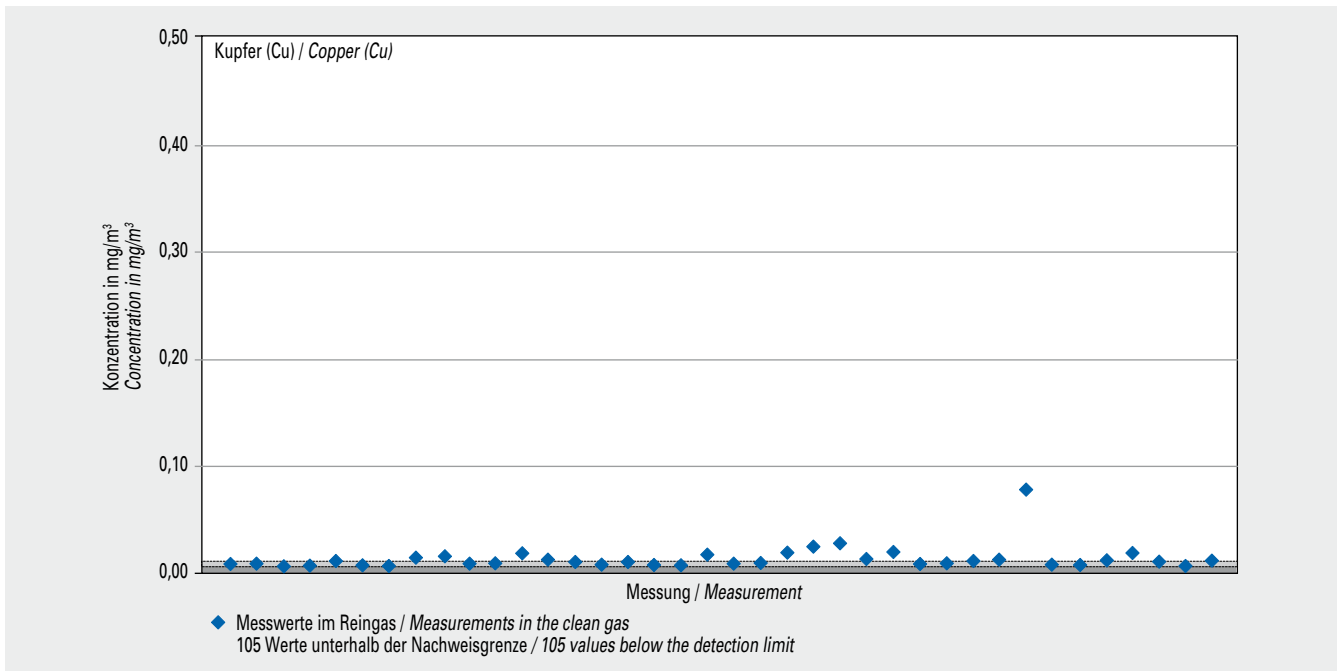
In 2015 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Ofenanlagen ermittelt. 139 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,01 und 0,015 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-20).

#### 5.13.8 Cobalt (Co)

Figure 5-20 shows 139 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns. 139 values were below the detection limit, which ranges between 0.01 and 0.015 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-20** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Cobalt (Co) im Reingas von 36 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-20** Cobalt (Co) concentration values (year 2015) in the clean gas of 36 rotary kilns.



**Bild 5-21** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Kupfer (Cu) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-21** Copper (Cu) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

5.13.9 Kupfer (Cu)

In 2015 wurden 143 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 105 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,008 und 0,012 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-21).

5.13.9 Copper (Cu)

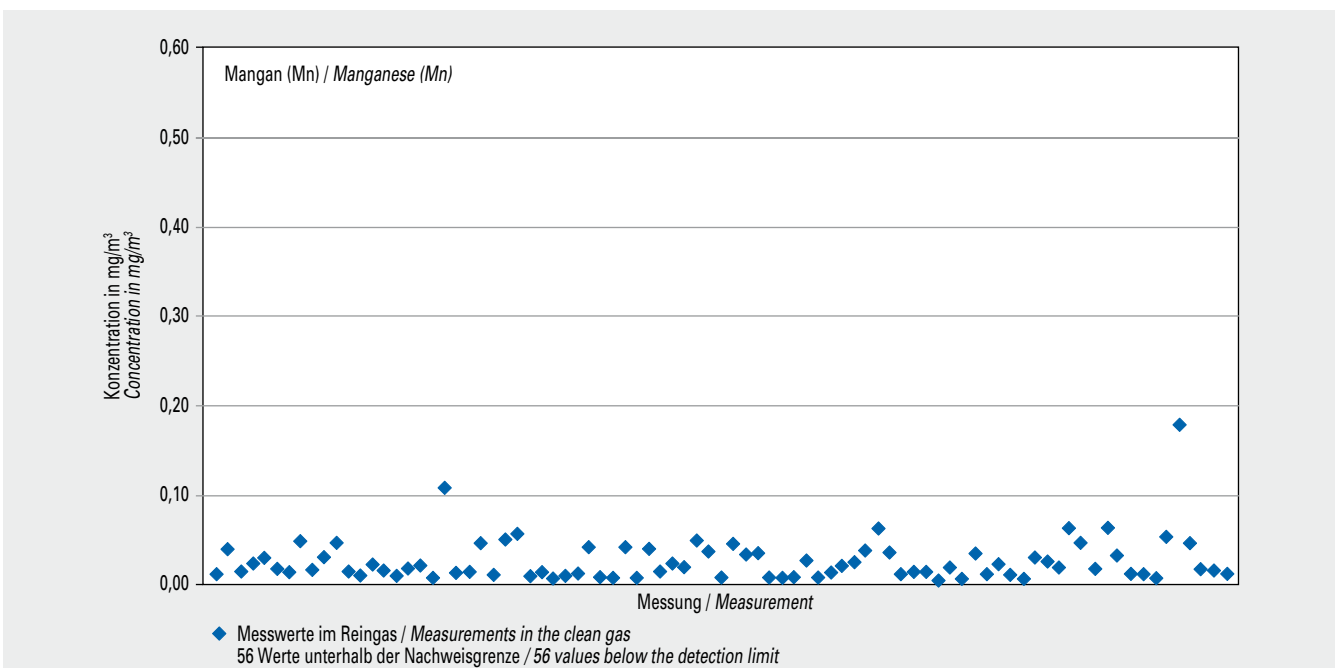
Figure 5-21 shows 143 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 105 values were below the detection limit, which ranges between 0.008 and 0.012 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

5.13.10 Mangan (Mn)

In 2015 wurden 141 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 56 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-22).

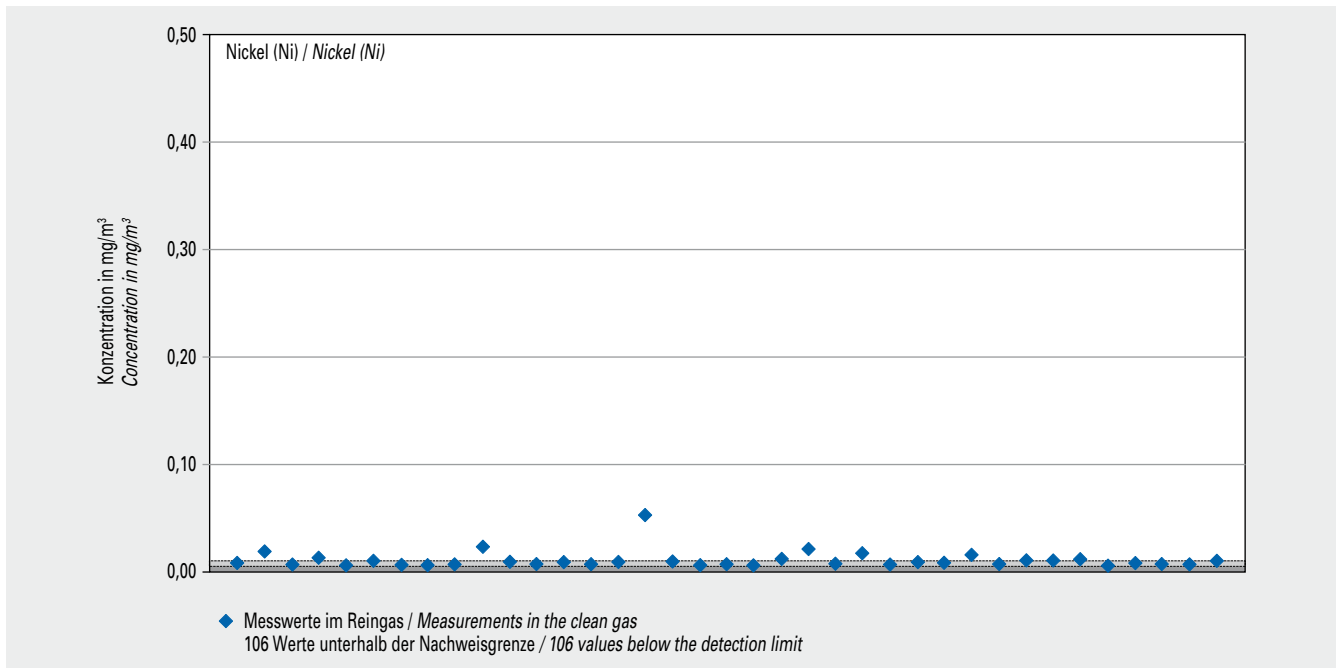
5.13.10 Manganese (Mn)

Figure 5-22 shows 141 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 56 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-22** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Mangan (Mn) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-22** Manganese (Mn) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.





**Bild 5-23** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Nickel (Ni) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-23** Nickel (Ni) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of 37 rotary kilns.

#### 5.13.11 Nickel (Ni)

In 2015 wurden 143 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 106 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,006 und 0,009 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-23).

#### 5.13.11 Nickel (Ni)

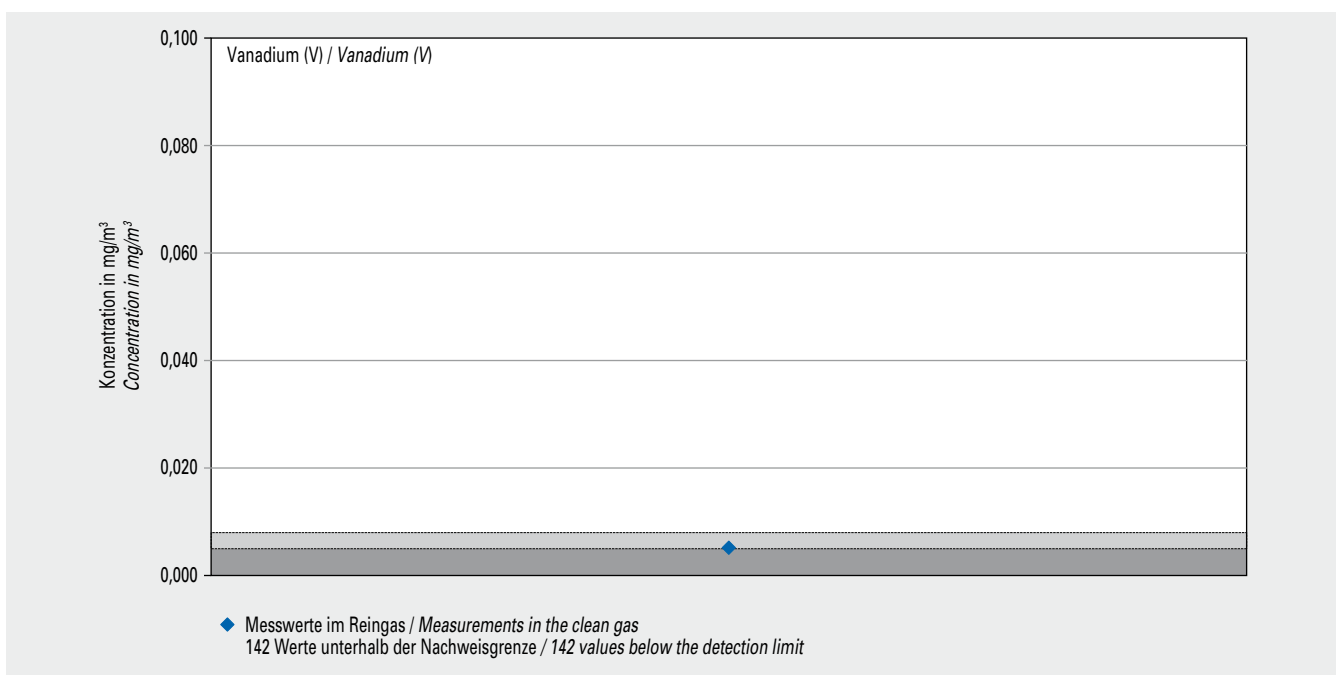
Figure 5-23 shows 143 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 106 values were below the detection limit, which ranges between 0.006 and 0.009 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

#### 5.13.12 Vanadium (V)

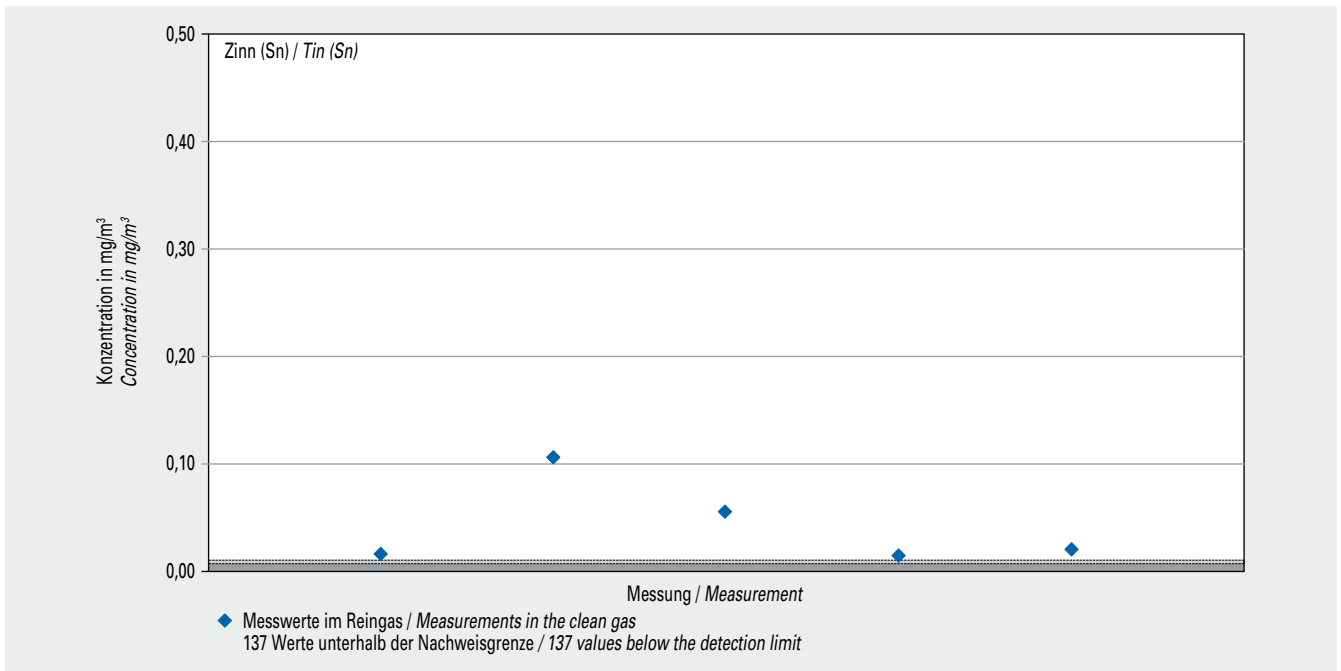
In 2015 wurden 143 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 142 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,005 und 0,008 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-24).

#### 5.13.12 Vanadium (V)

Figure 5-24 shows 143 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 142 values were below the detection limit, which ranges between 0.005 and 0.008 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-24** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Vanadium (V) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-24** Vanadium (V) concentration values (year 2015) in the clean gas of 37 rotary kilns.



**Bild 5-25** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Zinn (Sn) im Reingas von 37 Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-25** Tin (Sn) concentration values (year 2015) in the clean gas of 37 rotary kilns.

5.13.13 Zinn (Sn)

In 2015 wurden 142 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Ofenanlagen ermittelt. 137 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,0075 und 0,011 mg/m³ (Bild 5-25).

5.13.13 Tin (Sn)

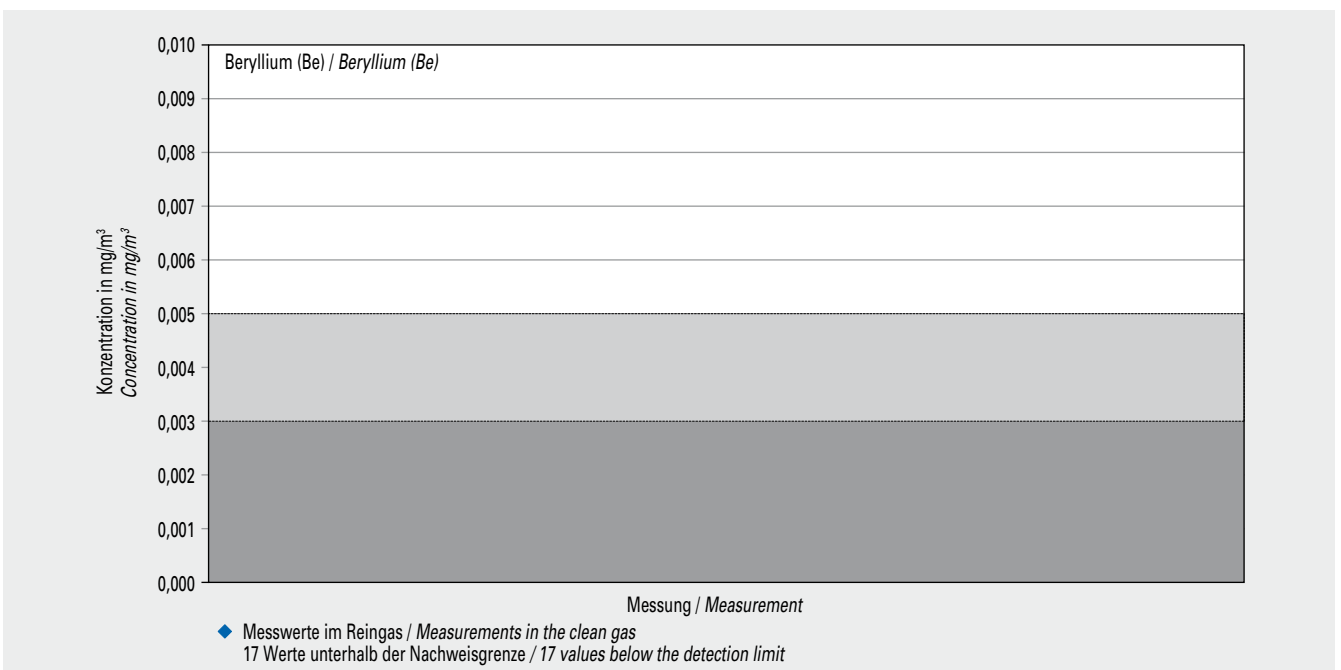
Figure 5-25 shows 142 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns. 137 values were below the detection limit, which ranges between 0.0075 and 0.011 mg/m³ depending on the measurement.

5.13.14 Beryllium (Be)

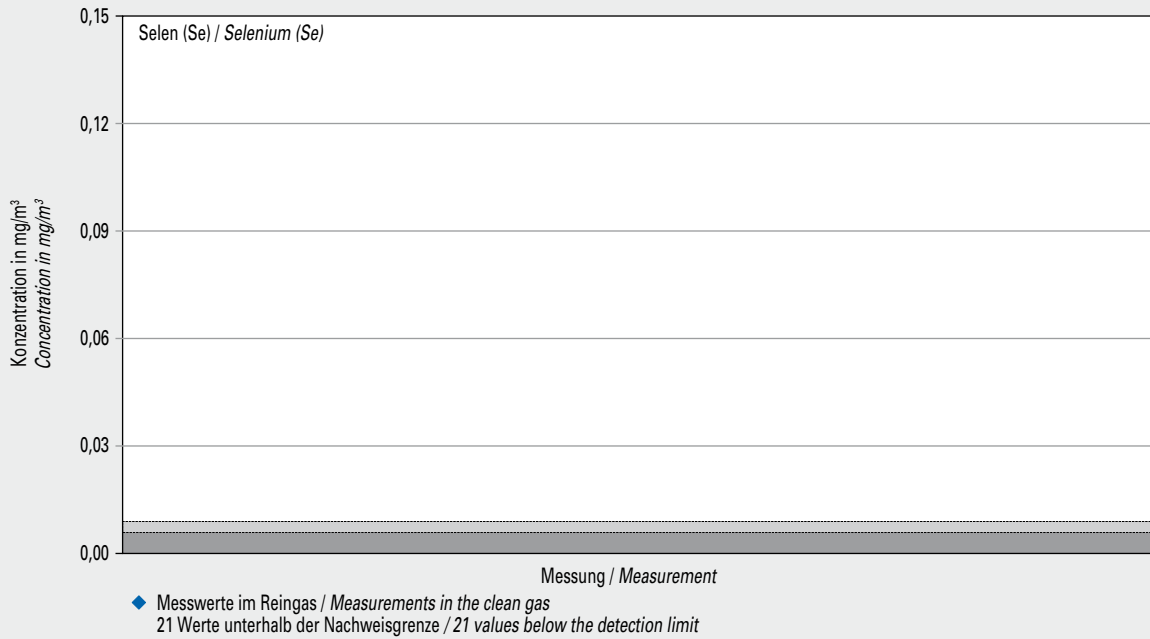
In 2015 wurden 17 Werte aus Messungen im Reingas von fünf Ofenanlagen ermittelt. 17 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,003 und 0,005 mg/m³ (Bild 5-26).

5.13.14 Beryllium (Be)

Figure 5-26 shows 17 values from measurements in the clean gas at five rotary kilns. 17 values were below the detection limit, which ranges between 0.003 and 0.005 mg/m³ depending on the measurement.



**Bild 5-26** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Beryllium (Be) im Reingas von fünf Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-26** Beryllium (Be) concentration values (year 2015) in the clean gas of five rotary kilns.



**Bild 5-27** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Selen (Se) im Reingas von sieben Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-27** Selen (Se) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of seven rotary kilns.

#### 5.13.15 Selen (Se)

In 2015 wurden 21 Werte aus Messungen im Reingas von sieben Ofenanlagen ermittelt. 21 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,006 und 0,009 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-27).

#### 5.13.15 Selenium (Se)

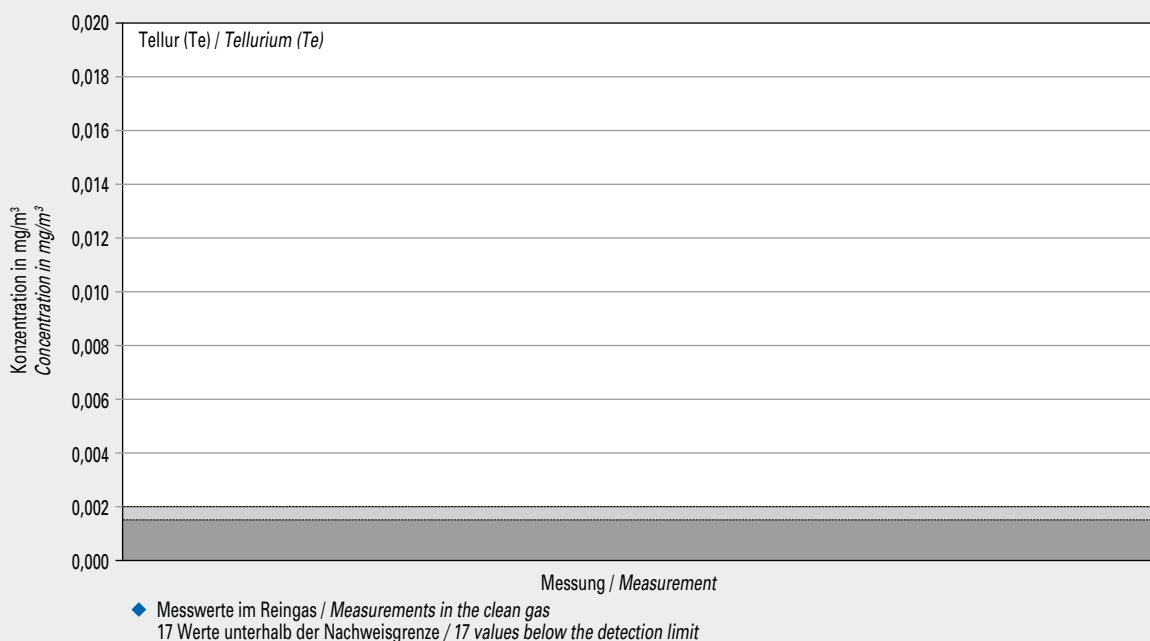
Figure 5-27 shows 21 values from measurements in the clean gas at seven rotary kilns. 21 values were below the detection limit, which ranges between 0.006 and 0.009 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

#### 5.13.16 Tellur (Te)

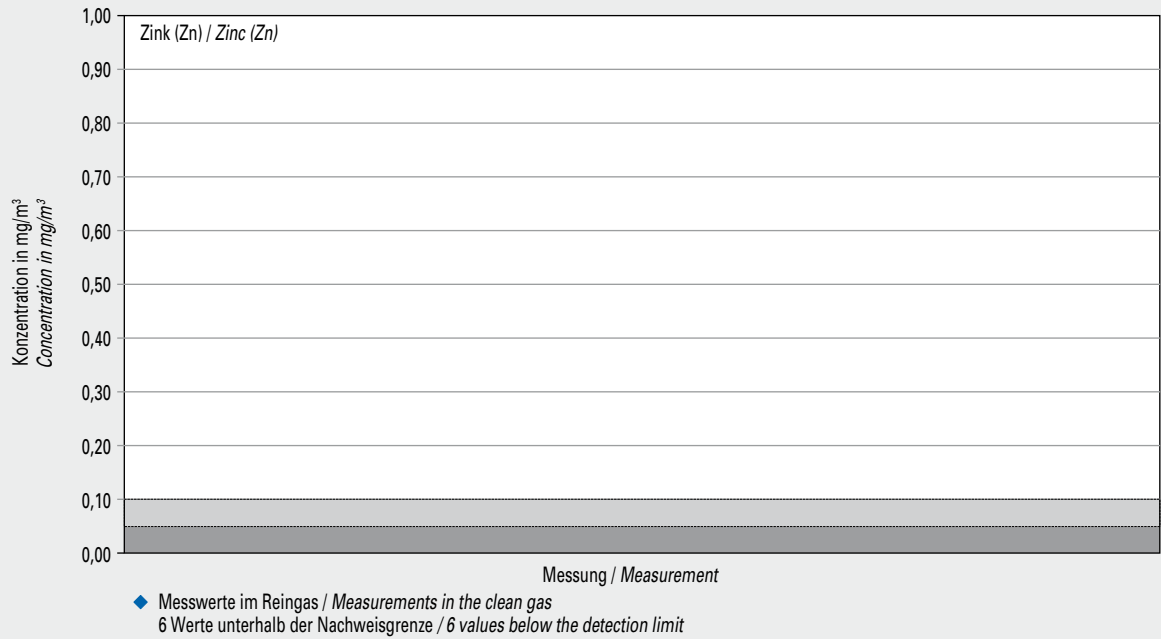
In 2015 wurden 17 Werte aus Messungen im Reingas von fünf Ofenanlagen ermittelt. 17 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,0015 und 0,002 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-28).

#### 5.13.16 Tellurium (Te)

Figure 5-28 shows 17 values from measurements in the clean gas at five rotary kilns. 17 values were below the detection limit, which ranges between 0.0015 and 0.002 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.



**Bild 5-28** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Tellur (Te) im Reingas von fünf Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-28** Tellurium (Te) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of five rotary kilns.



**Bild 5-29** Messwerte (Jahr 2015) der Konzentration von Zink (Zn) im Reingas von zwei Drehofenanlagen.  
**Fig. 5-29** Zinc (Zn) concentration values (year 2015) measured in the clean gas of two rotary kilns.

5.13.17 Zink (Zn)

In 2015 wurden 6 Werte aus Messungen im Reingas von zwei Ofenanlagen ermittelt. 6 Werte unterschritten die Nachweisgrenze. Sie liegt je nach Messung zwischen 0,05 und 0,1 mg/m<sup>3</sup> (Bild 5-29).

5.13.17 Zinc (Zn)

Figure 5-29 shows 6 values from clean gas measurements at two rotary kilns. 6 values were below the detection limit, which ranges between 0.05 and 0.1 mg/m<sup>3</sup> depending on the measurement.

**Literatur ■**

- [1] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2016, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [2] Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [3] Klein, H.; Hoenig, V.: Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [4] Verordnung (EG) 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG
- [5] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 1; Cement International 3/2013
- [6] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 2, Cement International 4/2013

**Ergänzende Literatur ■**

- Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (1998 - 2014), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Ökologische Positionierung von Zement und Beton. IZB, Köln; BDZ, Berlin; VDZ, Düsseldorf, 3. Auflage, 2001
- Naturschutz und Zementindustrie (Projektteil 1), Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Beton – Hart im Nehmen, Stark in der Leistung, Fair zur Umwelt, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf
- Altöl – Wo Abfall Wunder wirkt, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Alte Steinbrüche – Neues Leben, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Richtlinie VDI 2094:2003-03. Zementwerke: Emissionsminderung
- Norm DIN 1164-10:2013-03. Zement mit besonderen Eigenschaften
- Norm DIN EN 197-1:2011-11. Zement: Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

**Literature ■**

- [1] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2016, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [2] Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [3] Klein, H.; Hoenig, V.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [4] Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and the Council of 18 January 2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/EC
- [5] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 1; Cement International 3/2013
- [6] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 2; Cement International 4/2013

**Additional Literature ■**

- Environmental Data of the German Cement Industry (1998 - 2014), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Ökologische Positionierung von Zement und Beton. IZB, Cologne; BDZ, Berlin; VDZ, Duesseldorf, 3. Auflage, 2001
- Naturschutz und Zementindustrie (Projektteil 1). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Cologne; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Beton – Hart im Nehmen, Stark in der Leistung, Fair zur Umwelt, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Altöl – Wo Abfall Wunder wirkt, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Alte Steinbrüche – Neues Leben, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- VDI-Guideline 2094:2003-03. Cement plants: Emission control
- Standard DIN 1164-10: 2013-03. Special cement - Part 10
- Standard DIN EN 197-1:2011-11. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements



Copyright/Herausgeber:

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

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichung und  
Gesamtproduktion:  
Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Redaktionsschluss: Dezember 2016

*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](mailto:vdz@vdz-online.de)  
Internet: <http://www.vdz-online.de>*

*All rights reserved*

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

*Press deadline: December 2016*



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

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