

Bewährtes neu denken

vdz

**Umweltdaten der  
deutschen  
Zementindustrie  
Environmental  
Data of the German  
Cement Industry  
2022**



## Inhalt / Contents

	<b>Vorwort / Foreword</b>	5
<b>1</b>	<b>Zementherstellung / Cement manufacture</b>	7
<b>2</b>	<b>Produktions- und Strukturdaten / Production and structural data</b>	11
<b>3</b>	<b>Einsatzstoffe / Input materials</b>	15
	3.1 Rohstoffe / Raw materials	16
	3.2 Brennstoffe / Fuels	17
<b>4</b>	<b>Energie / Energy</b>	19
<b>5</b>	<b>Emissionen / Emissions</b>	23
	5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid / Greenhouse gases / Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	25
	5.2 Staub / Dust	26
	5.3 Stickstoffoxide / Nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> )	26
	5.4 Ammoniak / Ammonia (NH <sub>3</sub> )	28
	5.5 Schwefeldioxid / Sulphur dioxide (SO <sub>2</sub> )	29
	5.6 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (Σ C) / Carbon monoxide (CO) and total organic carbon (TOC)	30
	5.7 Dioxine und Furane / Dioxins und Furans (PCDD/F)	31
	5.8 Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls (PCB)	32
	5.9 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) / Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	33
	5.10 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX)	34
	5.11 Benzol / Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	35
	5.12 Formaldehyd / Formaldehyde (CH <sub>2</sub> O)	36
	5.13 Benzo(a)pyren / Benzo(a)pyren (C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> )	36
	5.14 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)	37
	5.15 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds (HF)	37
	5.16 Spurenelemente / Trace elements	38
	5.16.1 Cadmium / Cadmium (Cd)	40
	5.16.2 Thallium / Thallium (Tl)	40
	5.16.3 Quecksilber / Mercury (Hg)	41
	5.16.4 Antimon / Antimony (Sb)	41
	5.16.5 Arsen / Arsenic (As)	42
	5.16.6 Blei / Lead (Pb)	42
	5.16.7 Chrom / Chromium (Cr)	43
	5.16.8 Cobalt / Cobalt (Co)	43
	5.16.9 Kupfer / Copper (Cu)	44
	5.16.10 Mangan / Manganese (Mn)	44
	5.16.11 Nickel / Nickel (Ni)	45
	5.16.12 Vanadium / Vanadium (V)	45
	5.16.13 Zinn / Tin (Sn)	46
	5.16.14 Beryllium / Beryllium	46
	5.16.15 Selen / Selenium (Se)	47
	5.16.16 Tellur / Tellurium (Te)	47
	5.16.17 Zink / Zinc (Zn)	48
	<b>Literatur / Literature</b>	49
	<b>Impressum / Imprint</b>	51

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,

in bewährter Tradition geben wir auch in diesem Jahr mit unserer neuen Auflage der „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“ einen umfassenden Überblick sowohl zum Rohstoff- und Energieeinsatz als auch zu den verschiedenen Emissionen der deutschen Zementhersteller. Das betrifft sowohl den Staub, Staubinhaltsstoffe als auch die anorganischen und organischen Abgasbestandteile. Weiterhin umfassen unsere Umweltdaten die Emissionen an Kohlenstoffdioxid, auf deren Minderung im Sinne der Dekarbonisierung der Zementherstellung ein ganz besonderes Augenmerk liegt.

Ein klimaneutraler Herstellungsprozess von Zement – das ist das Ziel der Industrie, welches bis spätestens 2045 umgesetzt werden soll. Wie das konkret erfolgen kann, hat der VDZ in seiner 2020 veröffentlichten Roadmap gezeigt [1]. Die Studie beschreibt verschiedene Hebel zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und beziffert deren Beitrag in einem Klimaneutralitätsszenario. In diesem Szenario reduziert die Zementindustrie bis 2030 ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits um rund 27% gegenüber 2020 und um 45% gegenüber 1990. Neben einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils alternativer Brennstoffe (insbesondere durch den verstärkten Einsatz von Biomasse und grünem Wasserstoff) ist der Einsatz von CEM II/C- und CEM VI-Zementen ein wichtiger Baustein auf dem Weg zu einem Zementportfolio mit niedrigeren Klinker-Zement-Faktoren. Neben zum Teil neuen CO<sub>2</sub>-effizienten Rohstoffen für die Klinker- und Zementherstellung (z.B. calcinierte Tone und Betonbrechsand bzw. Recyclingmehl) und neben Innovationen in der Betonherstellung und im Betonbau werden die Bemühungen um eine vollständige Dekarbonisierung des Sektors auch auf der CO<sub>2</sub>-Abscheidung im Zementwerk und der anschließenden Nutzung und Speicherung (CCUS) beruhen. Hier gibt es bereits erste Pilotvorhaben, die vor allem auf die Nutzung des Treibhausgases abstellen.

Eine Schlüsselrolle hierbei kommt dem Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Transport- und Speicherinfrastruktur in Deutschland und Europa zu, wobei die Infrastrukturen für erneuerbaren Strom, Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zusammen gedacht und geplant werden sollten. Durch die Verknüpfung des Einsatzes von Wasserstoff, die Optionen zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> im Rahmen von CCU sowie der dauerhaften Speicherung könnten erhebliche Synergieeffekte gehoben und damit Transformationsprozesse beschleunigt werden. Unter anderem in den Niederlanden, Großbritannien und Skandinavien werden solche Projekte derzeit geplant und befinden sich zum Teil bereits in der Umsetzung. Auch Deutschland ist aufgrund der starken industriellen Basis, vorhandener Logistik und Umschlagmöglichkeiten an den Küsten sehr gut geeignet, um CO<sub>2</sub>-Emissionen dauerhaft durch CCS-Technologien zu senken sowie eine Rohstoffalternative durch CCU-Prozesse zu entwickeln und somit auf heimische Wertschöpfung zu setzen. Entscheidend ist dabei, alle Elemente entlang der Wertschöpfungskette technologieoffen zu betrachten und in einer Carbon-Management-Strategie zusammenzuführen.

Dear readers,

in keeping with our time-honoured tradition, this year's edition of the „Environmental data of the German cement industry“ again provides an in-depth insight into the use of raw materials, energy input and the various emissions produced by German cement manufacturers. This encompasses not only the dust and dust-bound constituents, but also the inorganic and organic exhaust gas compounds. A further aspect of our environmental data is information on carbon dioxide emissions, the reduction of which is a particular focal point in connection with the decarbonisation of cement production.

A climate-neutral manufacturing process for cement – that is the industry's goal, which is to be implemented by 2045 at the latest. The roadmap published by VDZ in 2020 outlines one means of bringing about the decarbonisation of cement and concrete [1]. This study describes various instruments designed to reduce CO<sub>2</sub> emissions and evaluates the contribution of these in a climate neutrality scenario. According to this scenario, by 2030 the cement industry will already have cut its CO<sub>2</sub> emissions by around 27%, when compared to those of 2020, and by about 45% with respect to emissions in 1990. In addition to further enhancing energy efficiency and increasing the proportion of alternative fuels (in particular by making greater use of biomass and green hydrogen), the use of CEM II/C and CEM VI cements represents an important step in progressing towards a cement portfolio with lower clinker factors. Together with – in some cases new – CO<sub>2</sub>-efficient raw materials for clinker and cement production (e.g. calcined clay and crushed sand) and innovations in the field of concrete production and construction, carbon capture at cement plants and its subsequent utilisation and storage (CCUS) will form the basis for attempting to achieve full decarbonisation in the sector. Initial pilot projects, primarily aimed at making use of the greenhouse gas, already exist in relation to this.

The development of a CO<sub>2</sub> transport and storage infrastructure in Germany and Europe has a key role to play here, whereby the infrastructures for renewable electricity, hydrogen and CO<sub>2</sub> should be thought about and planned together. By linking the use of hydrogen, the options for the material use of CO<sub>2</sub> within the framework of CCU as well as permanent storage, considerable synergy effects could be leveraged and thus transformation processes accelerated. In the Netherlands, Great Britain and Scandinavia, among others, such projects are currently being planned and some are already being implemented. Due to its strong industrial base, existing logistics and transshipment possibilities on the coasts, Germany is also very well suited to permanently reduce CO<sub>2</sub> emissions through CCS technologies and to develop a raw material alternative through CCU processes, thus relying on domestic value creation. It is crucial to consider all elements along the value chain in a technology-open manner and to combine them in a carbon management strategy.

Teils eng verzahnt mit der Dekarbonisierung ist die Schonung natürlicher Ressourcen bei der Herstellung von Zement und Beton. In einer 2022 veröffentlichten Studie [2] hat der VDZ ermittelt, dass unter bestimmten Voraussetzungen bis 2050 ca. 40 % der Primärrohstoffe eingespart werden können. Neben ressourceneffizienterem Bauen wird der Schlüssel zur Einsparung von Primärressourcen bei der Zement- und Betonherstellung in der Mobilisierung von Betonfraktionen aus dem Rückbau von Gebäuden und Infrastrukturen liegen. Als Betonbrechsand und rezyklierte Gesteinskörnung können sie in die Klinker-, Zement- und Betonproduktion zurückfließen. Gleichwohl wird auch nach Ausschöpfen der ambitionierten Potenziale der Großteil des Rohstoffbedarfs in 2050 durch natürliche Rohstoffe gedeckt werden müssen. Somit bleibt deren Sicherung neben der Schaffung grüner Leitmärkte für ressourcenschonende Zemente und Betone sowie der Förderung des Urban Mining ein weiteres zentrales Handlungsfeld, das für die Zement- und Betonherstellung eine existenzielle Grundlage darstellt.

Um den verschiedenen Erfordernissen des Klima- und Ressourcenschutzes sowie der Luftreinhaltung gerecht zu werden, sind enorme Investitionen nötig. Allein in den Jahren 2019 bis 2021 hat die deutsche Zementindustrie ungefähr 700 Mio. Euro in ihren Maschinenpark investiert, was rund 8 % des in diesem Zeitraum erwirtschafteten Branchenumsatzes entspricht. Nicht zuletzt dies zeigt, dass die deutschen Zementhersteller sich den zahlreichen umweltpolitischen Herausforderungen stellen. Sie werden auch künftig weitere Anstrengungen und Investitionen tätigen, um die Zementproduktion zukunftssicher und nachhaltig zu gestalten.

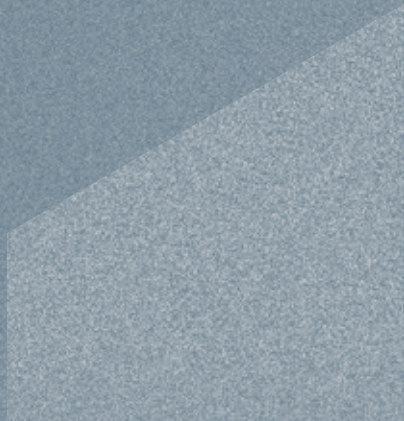
Düsseldorf, im Juli 2023

In part closely linked to decarbonisation is the conservation of natural resources in the production of cement and concrete. In a study published in 2022 [2], the VDZ determined that, under certain conditions, around 40 % of primary raw materials can be saved by 2050. In addition to more resource-efficient construction, the key to saving primary resources in cement and concrete production will be the mobilisation of concrete fractions from the deconstruction of buildings and infrastructures. As crushed concrete sand and recycled aggregates, they can be fed back into clinker, cement and concrete production. Nevertheless, even after the ambitious potentials have been exhausted, the majority of the raw material demand in 2050 will have to be covered by natural raw materials. Thus, in addition to the creation of green-lead markets for resource-conserving cements and concretes and the promotion of urban mining, their safeguarding remains another central field of action that represents an existential basis for cement and concrete production.

In order to meet the various requirements of climate and resource protection as well as air pollution control, enormous investments are necessary. In the years 2019 to 2021 alone, the German cement industry has invested around 700 million Euro in its plant and equipment, which corresponds to around 8 % of the industry turnover generated in this period. Not least, this shows that the German cement manufacturers are facing up to the numerous environmental challenges it faces. They will continue to make further efforts and investments in order to make cement production future-proof and sustainable.

Düsseldorf, July 2023

# 1 Zementherstellung/ Cement manufacture



## 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 Puzzolane (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

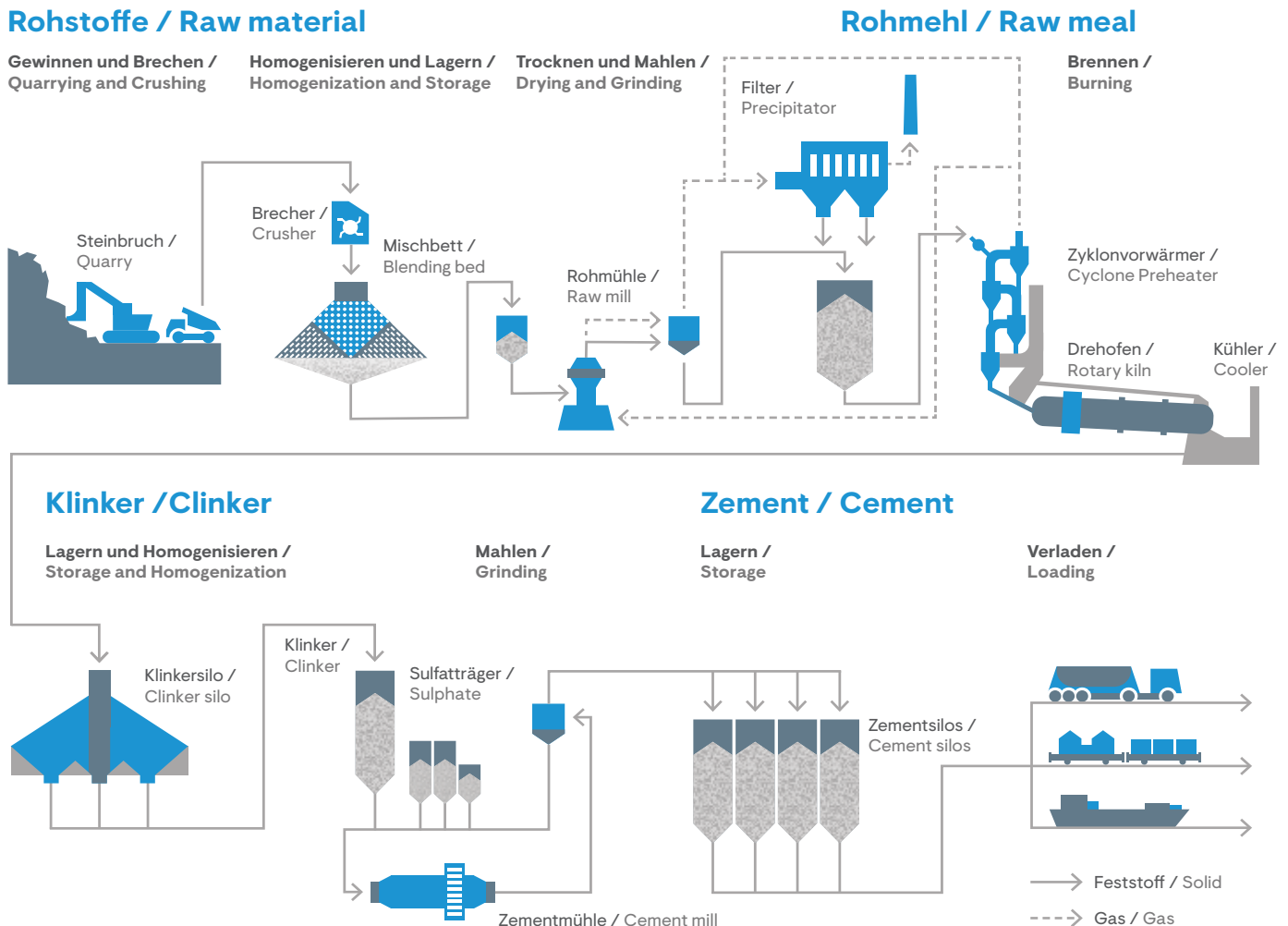
## 1 Cement manufacture

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 gyps um 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 car-

**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**





aus Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Wesentliche Bestandteile des natürlichen Verwitterungsprodukts Ton sind feinkörnige und glimmerartige Minerale sowie in geringer Menge Quarz und Feldspat als Reste des Ausgangsmaterials. Tonminerale und Feldspat sind Verbindungen von Aluminiumoxid und Siliciumdioxid (Alumosilicate) und Alkalien wie Natrium und Kalium.

bonate ( $\text{CaCO}_3$ ). The major constituents of clay, which is a natural product of weathering processes, are fine-grained mica-like minerals and smaller quantities of quartz and feldspar, which constitute residues of the starting material. Clay minerals and feldspar are compounds of aluminium oxide and silicon dioxide (aluminosilicates) with alkalis, such as so-

**Bild 1-2 Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2023**  
**Fig. 1-2 Cement works in the Federal Republic of Germany in the year 2023**



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.

Das Rohstoffgemisch wird in einem Drehofen bei einer Temperatur von etwa 1.450 °C bis zum Sintern erhitzt. Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei neue Verbindungen, die sogenannten Klinkerphasen. Das sind bestimmte Calciumsilicate und Calciumaluminat, die dem Zement seine charakteristische Eigenschaft der Erhärtung in Gegenwart von Wasser verleihen.

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

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

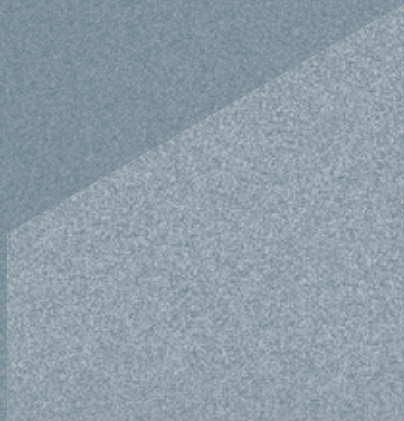
dium and potassium. The iron oxide required for melt formation is either contained in the clay minerals in the form of ferrous hydroxide or it is added in the form of iron ore. For the cement to conform to the quality requirements stipulated, a precisely defined raw material composition must be complied with. Only a small margin of deviation can be tolerated.

The raw material mix is heated up to a temperature of approximately 1,450°C in a rotary kiln until it starts sintering. This results in the starting materials forming new compounds known as clinker phases. These are certain calcium silicates and calcium aluminates which confer on the cement its characteristic feature of setting in the presence of water.

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

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

## **2 Produktions- und Strukturdaten/ Production and structural data**



## 2 Produktions- und Strukturdaten

Zement ist ein homogenes Massengut, das zu Lande überwiegend 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 2022 produzierten 21 Unternehmen in 53 Werken etwa 32,9 Mio. Tonnen Zement [3] (Bild 1-2).

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. 54% sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 22% des inländischen Zementversandes. Etwa sieben Prozent des Zements wird als Sackzement versandt.

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

**Tabelle 2-1**      **Produktion, Versand, Export und Import**  
**Table 2-1**      **Output, deliveries, export and import**

Jahr / Year	Produktion / Production		Zementversand / Cement deliveries			
	Klinker / Clinker	Zement / Cement	Zementversand Inland <sup>1)</sup> / Domestic deliveries	Zementexporte / Cement exports	Zementversand gesamt / Total cement deliveries	Zementimport / Cement import
	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t
2011	24.775	33.532	26.767	7.174	33.941	1.305
2012	24.581	31.925	25.492	6.542	32.034	1.277
2013	23.127	30.927	25.201	6.055	31.256	1.344
2014	23.871	31.717	25.850	5.748	31.598	1.325
2015	23.355	31.160	25.334	6.262	31.596	1.308
2016	23.423	32.674	26.185	6.093	32.278	1.320
2017	24.802	33.991	27.265	6.211	33.476	1.603
2018	24.469	33.655	27.449	6.324	33.773	1.680
2019	24.578	34.185	27.554	6.571	34.125	1.198
2020	24.709	35.478	29.013	6.083	35.096	1.116
2021	25.232	34.966	28.051	6.749	34.800	1.116
2022 <sup>2)</sup>	23.193	32.901	27.019	6.173	33.192	1.009

<sup>1)</sup> inkl. Schätzung Inlandsversand Nicht-VDZ-Mitglieder / incl. estimation of domestic deliveries for non VDZ members

<sup>2)</sup> Außenhandelsdaten vorläufig / Foreign trade data preliminary

## 2 Production and structural data

Cement is a homogeneous bulk commodity that, is predominantly transported by truck on land and is therefore transport cost-intensive. It 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 2022, 21 companies with their 53 works produced about 32.9 million t of cement in Germany [3] (Fig. 1-2).

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 (54% of domestic cement deliveries) and the manufacturers of concrete elements (22% of domestic cement deliveries) are among the principal buyers of cement. Seven percent 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 2-2 Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in Deutschland**  
**Table 2-2 Number and capacity of kilns with operating permits in Germany**

	Stand: 01.01.2021 / As of 1st Jan 2021			Stand: 01.01.2022 / As of 1st Jan 2022			Stand: 01.01.2023 / As of 1st Jan 2023		
	Anzahl / Number	Kapazität / Capacity		Anzahl / Number	Kapazität / Capacity		Anzahl / Number	Kapazität / Capacity	
		t/d	%		t/d	%		t/d	%
Ofen mit Zyklonvorwärmer / Kilns with cyclone preheaters	36	99.060	96,3	36	99.060	96,3	36	99.060	96,3
Ofen mit Rostvorwärmer / Kilns with grate preheaters	2	2.600	2,5	2	2.600	2,5	2	2.600	2,5
Schachtöfen / Shaft kilns	8	1.200	1,2	8	1.200	1,2	8	1.200	1,2
Summe / Total	46	102.860	100	46	102.860	100	46	102.860	100
mittlere Ofenkapazität in t/d / Average kiln capacity in t/d		Drehöfen / Rotary kilns		2.675				2.675	
		Schachtöfen / Shaft kilns		150				150	

Quelle / Source: VDZ

**Tabelle 2-3 Inlandsversand der Verbandsmitglieder nach Zementarten**  
**Table 2-3 Domestic deliveries of VDZ members by cement types**

Jahr/ Year	CEM						IV + V + Sonst. <sup>3)/ Others</sup>	Gesamt/ Total
	I	II <sup>2)</sup>	II/S + II/P <sup>2)</sup>	II/T + II/LL + II/M	III			
	1.000 t							
2005 <sup>1)</sup>	13.226	8.055	3.740	4.315	3.621		193	25.095
2006	11.189	10.628	5.202	5.426	4.764		263	26.843
2007	8.932	11.299	5.259	6.040	4.883		286	25.399
2008	7.710	12.514	5.710	6.801	5.289		251	25.764
2009	8.031	11.122	3.075	8.047	4.212		223	23.588
2010	7.694	10.550	3.017	7.533	4.549		179	22.972
2011	8.286	12.000	3.987	8.013	5.664		268	26.218
2012	7.404	12.060	4.635	7.425	5.530		275	25.269
2013 <sup>1)</sup>	7.130	11.851	4.428	7.423	5.498		241	24.720
2014	7.554	11.826	4.456	7.370	5.677		279	25.336
2015	7.554	11.350	4.461	6.889	5.653		292	24.849
2016 <sup>1)</sup>	7.305	11.955	4.880	7.074	6.095		187	25.542
2017	7.342	12.262	5.029	7.233	6.752		240	26.596
2018 <sup>1)</sup>	7.344	12.589	5.012	7.578	6.214		249	26.396
2019	7.251	12.982	5.103	7.879	6.008		251	26.492
2020 <sup>1)</sup>	7.437	14.100	5.223	8.877	6.195		313	28.045
2021	7.262	13.974	4.582	9.392	5.428		515	27.179
2022	6.364	13.729	3.658	10.071	5.779		297	26.169

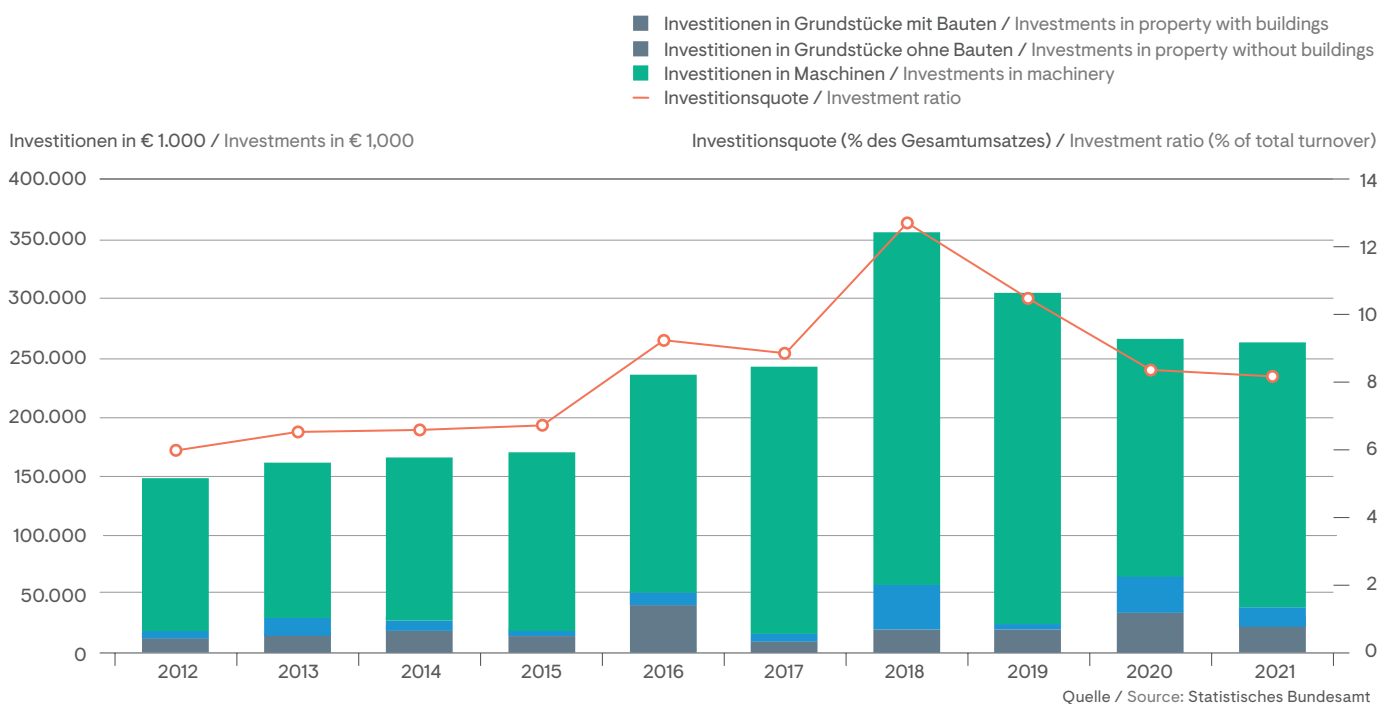
Anmerkung/Note:

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

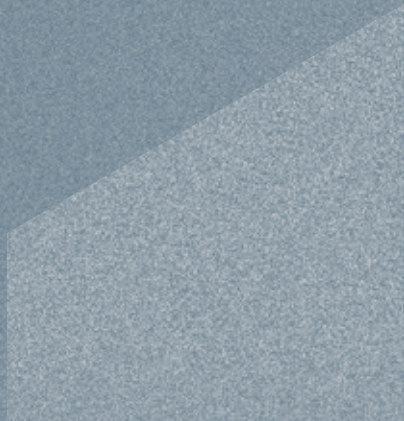
<sup>1)</sup> Änderung des Berichtskreises. / Reporting different from that of the previous year.<sup>2)</sup> Bis einschließlich 2018 inkl. CEM II/V-Zemente, die aus Gründen der Geheimhaltung ab 2019 in der Spalte IV+V+Sonst. enthalten sind. / Until 2018 incl. CEM II/V cements, which are from 2019 included in column IV+V+other for reasons of secrecy.<sup>3)</sup> Ab 2019 inklusive CEM II/V-Zemente. / From 2019 incl. CEM II/V cements.

Quelle / Source: VDZ

**Bild 2-1 Investitionen der deutschen Zementindustrie**  
**Fig. 2-1 Investments of the German cement industry**



### **3 Einsatzstoffe/ Input materials**



### 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 müssen, 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 2022 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 Hauptbestandteile 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 Kreislaufwirtschaftsgesetzes 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 unter anderem zur Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet. Perspektivisch können auch calcinierte Tone zunehmend eine Rolle als Klinkerersatz spielen [1].

Der Bedarf an Sulfatträgern, mit denen die Verarbeitungseigenschaften der Zemente gesteuert werden, wird zu fast 90 % durch natürlichen Gips und/oder Anhydrit gedeckt. Bei dem restlichen Anteil handelt es sich um Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen und synthetischen Anhydrit.

**Tabelle 3-1 Rohstoffeinsatz 2022**  
**Table 3-1 Raw materials input in 2022**

Gruppe / Group	Rohstoff / Raw material	Einsatz / Input quantity 1.000 t/a
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide / Limestone / Marl / Chalk	36.893
	Sonstige, wie: / Others, such as: - Kalkschlämme aus der Trink- und Ab- wasseraufbereitung / Lime sludge from drinking water and sewage treatment - Kalkhydrat / Hydrated lime - Porenbetongranulat / Foam concrete granulates - Calciumfluorid / Calcium fluoride	100
Si	Sand / Sand	1.083
	Gießereialsand / Used foundry sand	225
Si-Al	Ton / Clay	1.094
	Bentonit / Kaolinit / Bentonite / Kaolinite	33
Fe	Eisenerz / Iron ore	150
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahl- industrie, wie: / Other input materials from the iron and steel industries, such as: - Kiesabbrand / Roasted pyrite - verunreinigtes Erz / Contaminated ore - Eisenoxid-Flugasche-Gemisch / Iron oxide fly ash blends - Stahlwerksstäube / Dusts from steel plants - Walzzunder / Mill scale	149
Si-Al-Ca	Hüttensand / Granulated blastfurnace slag	7.136
	Flugasche / Fly ash	318
	Ölschiefer / Oil shale	129
	Trass / Trass	46
	Sonstige, wie: / Others, such as: - Papierreststoffe / Paper residuals - Aschen aus Verbrennungsprozessen / Ashes from incineration processes - Mineralische Reststoffe, z. B. ölver- unreinigte Böden / Mineral residuals, e. g. soil contaminated by oil	64
S	Natürlicher Gips / Natural gypsum	938
	Natürlicher Anhydrit / Natural anhydrite	629
	Synthetischer Anhydrit / Synthetic anhydrite	6
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung / Gypsum from flue gas desulphurisation	195
Al	Einsatzstoffe aus der Metallindustrie, wie: / Input materials from the metal industry, such as: - Aufbereitungsrückstände von Salz- schlacken / Residues from reprocess- ing salt slag - Aluminiumhydroxid / Aluminium hydroxide	51

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 Zementhauptbestandteilen, 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, 3].

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage in hohem Maße alternative Brennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementindustrie betrug 71,6 % im Jahr 2022. 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 2022. 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		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Steinkohle / Coal	Mio. GJ/a / million GJ/a	7,8	8,9	8,1	8,3	8,2	7,9	7,3	6,6	7,1	4,3
	Anteil % / share %	8,7	9,6	9,0	9,1	8,4	8,2	7,6	6,8	7,3	4,7
Braunkohle / Lignite	Mio. GJ/a / million GJ/a	19,7	19,5	18,7	18,9	20,5	19,2	18,1	19,0	18,9	18,8
	Anteil % / share %	21,8	21,1	20,8	20,8	21,2	20,0	18,9	19,8	19,4	20,5
Petrolkoks / Petcoke	Mio. GJ/a / million GJ/a	3,2	4,1	3,4	3,2	3,5	2,7	2,4	2,1	2,1	1,3
	Anteil % / share %	3,5	4,4	3,7	3,6	3,7	2,8	2,5	2,2	2,1	1,4
Heizöl S / Heavy fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,2	0,2	0,3	0,6	0,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
	Anteil % / share %	0,2	0,2	0,4	0,6	0,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
Heizöl EL / Fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	1,2	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Anteil % / share %	1,3	0,8	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Erdgas und andere Gase / Natural gas and other gases	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,3	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,6
	Anteil % / share %	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,7
Sonstige fossile Brennstoffe / Other fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	1,4	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	0,4	0,3	0,2
	Anteil % / share %	1,6	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	0,4	0,3	0,3
Fossile Brennstoffe gesamt / Total fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	33,8	33,9	31,9	32,1	33,9	31,2	29,9	29,6	30,1	26,0
	Anteil % / share %	37,5	36,6	35,4	35,2	35,0	32,5	31,1	30,8	30,8	28,4
Alternative Brennstoffe gesamt / Total alternative fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	56,6	58,6	58,2	59,1	63,0	64,8	66,1	66,4	67,6	65,5
	Anteil % / share %	62,5	63,4	64,6	64,8	65,0	67,5	68,9	69,2	69,3	71,6
Thermische Energie gesamt / Total thermal energy consumption	Mio. GJ/a / million GJ/a	90,4	92,5	90,1	91,2	96,9	96,0	96,0	96,0	97,7	91,5
	Anteil % / share %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

**Tabelle 3-3 Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe 2022**  
**Table 3-3 Used quantity and average calorific value of alternative fuels in 2022**

Alternative Brennstoffe / Alternative fuel	1.000 t/a	MJ/kg
Altreifen / Waste tyres	143	28
Altöl / Waste oil	47	25
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen / Fractions of industrial and commercial waste:		
- Zellstoff, Papier und Pappe / Pulp, paper and cardboard	60	5
- Kunststoff / Plastics	895	22
- Verpackungen / Packaging	-	-
- Abfälle aus der Textilindustrie / Wastes from the textile industry	-	-
- Sonstige / Others	974	21
Tiermehle und -fette / Meat and bone meal and animal fat	120	18
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen / Mixed fractions of municipal waste		
Altholz / Waste wood	4	14
Lösungsmittel / Solvents	120	24
Bleicherde / Fuller's earth	-	-
Klärschlamm / Sewage sludge	675	3
Sonstige, wie: / Others, such as:		
- Ölschlamm / Oil sludge		
- Organische Destillationsrückstände / Organic distillation residues	129	4

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 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, among others, in the manufacture of Portland slag and blastfurnace cements. In the future, calcined clays may also play an increasingly important role as clinker substitutes [1].

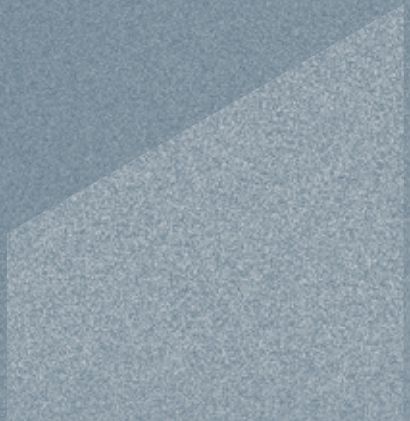
Natural gypsum and/or anhydrite cover almost 90 % of the demand for sulphate agents, which serve to adjust the working properties of the cements. Gypsum from flue gas desulphurisation and synthetic anhydrite accounts for the remaining share.

### 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, 3].

Apart from fossil fuels, the use of alternative fuels in the clinker burning process is gaining in importance nowadays. Alternative fuels accounted 71,4 % of the total fuel energy demand of the German cement industry in 2022. Table 3-3 lists the alternative fuels utilised and their average calorific values.

## 4 Energie/ Energy



## 4 Energie

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurden in Deutschland 2022 durchschnittlich 2.787 MJ Brennstoffenergie und 113,1 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. 25 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 24 %) und für die Mahlung der Zementbestandteile (ca. 46 %) 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 etwa 28 % des Brennstoffenergieeinsatzes aus. Die hohe Energieeffizienz des Zementherstellungsprozesses wurde dadurch nicht beeinflusst [4, 6, 7].

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

**Tabelle 4-1**      **Thermischer Brennstoffenergieeinsatz**  
**Table 4-1**      **Thermal fuel energy consumption**

Jahr / Year	Thermischer Brennstoffenergieeinsatz Thermal fuel energy consumption	
	absolut in Mio. GJ/a Absolute in million GJ/a	spezifisch in MJ/t Zement Specific in MJ/t cement
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
2016	91,2	2.763
2017	96,9	2.824
2018	96,0	2.804
2019	96,0	2.772
2020	96,0	2.733
2021	97,6	2.798
2022	91,5	2.787

Quelle / Source: VDZ

## 4 Energy

In Germany, the production of one tonne of cement consumed an average of 2,787 MJ fuel energy and 113,1 kWh electrical energy in 2022 (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 25 %), for burning and cooling the clinker (about 24 %) and for grinding of the cement constituents (about 46 %).

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 appr. 28 % 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 [4, 6, 7].

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

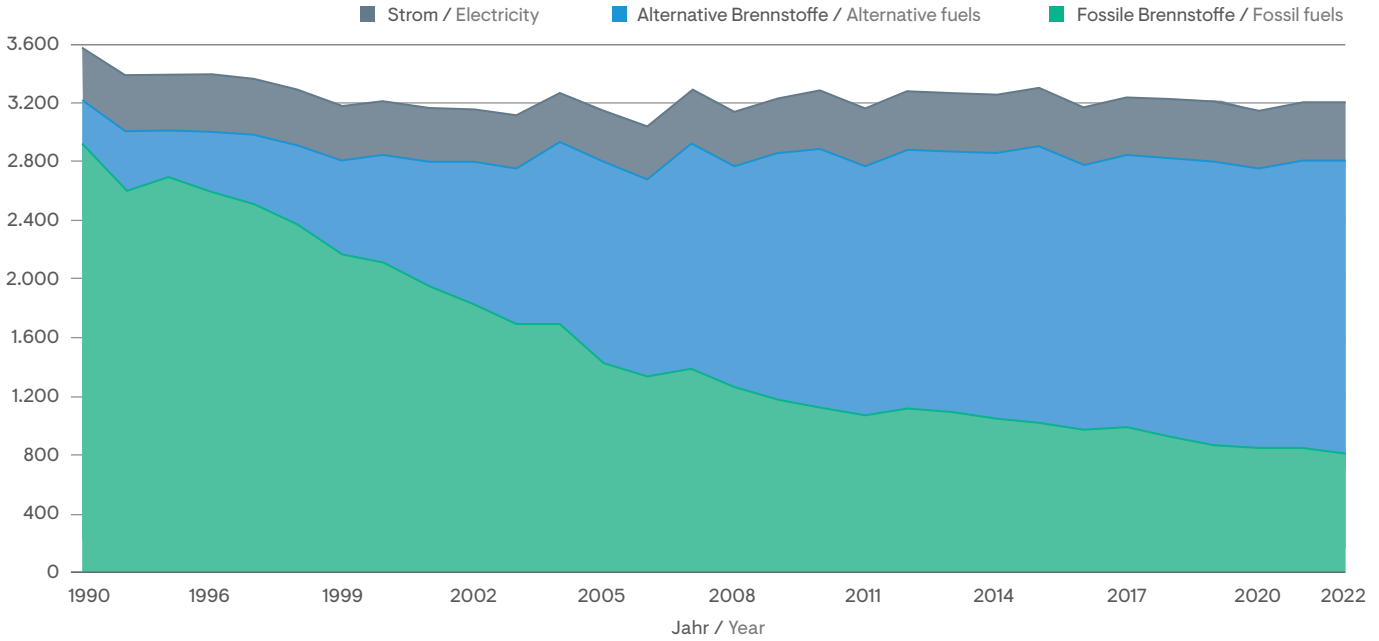
**Tabelle 4-2 Elektrischer Energieeinsatz**  
**Table 4-2 Electrical power consumption**

Jahr / Year	Elektrischer Energieeinsatz Electrical power consumption	
	absolut in Mio. MWh/a Absolute in million MWh/a	spezifisch in kWh/t Zement Specific in kWh/t cement
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
2016	3,62	109,8
2017	3,77	110,0
2018	3,78	110,9
2019	3,85	111,9
2020	3,84	109,4
2021	3,92	112,4
2022	3,88	113,1

Quelle / Source: VDZ

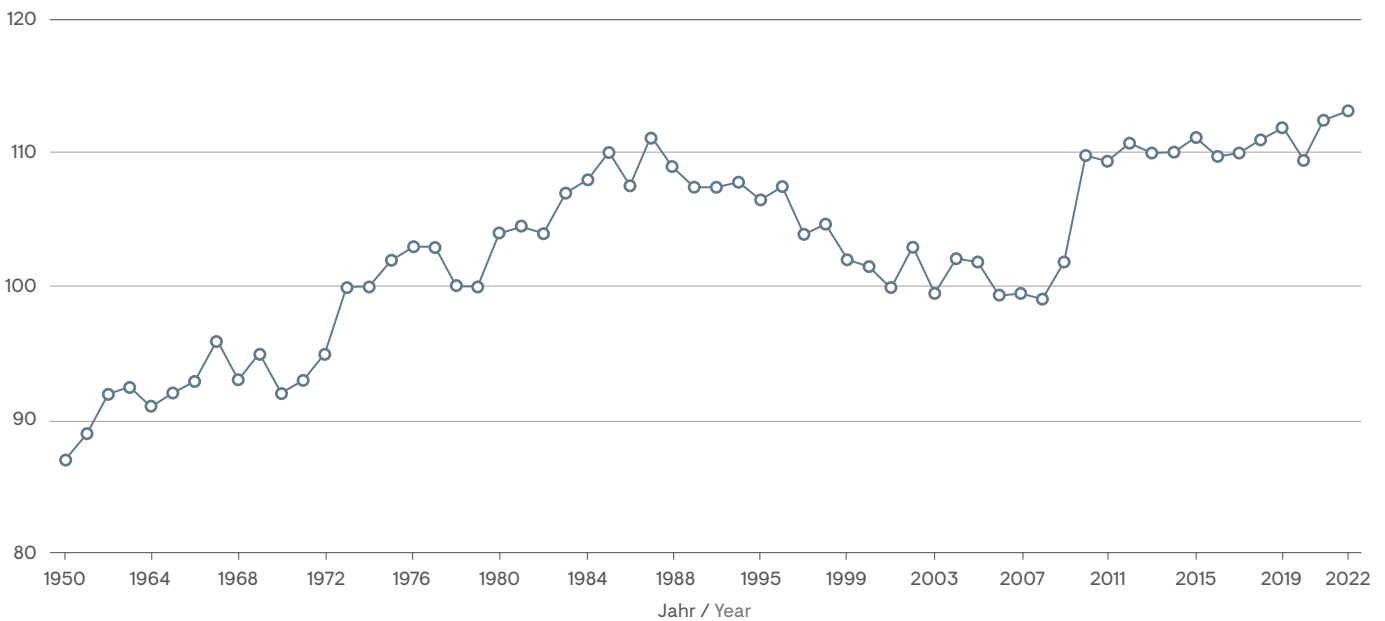
**Bild 4-1 Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes**  
**Fig. 4-1 Development of the specific fuel energy consumption**

Spezifischer Energieeinsatz in kJ/kg Zement / Specific energy demand in kJ/kg cement



**Bild 4-2 Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes**  
**Fig. 4-2 Development of the specific electrical power consumption**

Spezifischer elektrischer Energieeinsatz in kWh/t Zement / Specific electrical power consumption in kWh/t cement



Anmerkung/Note:  
 Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987 / New Federal States included since 1987

# 5 Emissionen/ Emissions



## 5 Emissionen

In Deutschland unterliegen die Errichtung und der Betrieb von Zementwerken den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach Brennstoffeinsatz werden unterschiedliche Anforderungen an die einzuhaltenden Emissionskonzentrationen gestellt. Falls ausschließlich Regelbrennstoffe eingesetzt werden, sind die Regelungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) 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 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 ( $\text{SO}_2$ ), Kohlenmonoxid (CO), Quecksilber (Hg) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) sowie 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 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 an-

## 5 Emissions

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

Emissions from cement works can be determined both by continuous and discontinuous measuring methods, which are described in corresponding VDI guidelines and DIN standards (Table 5-1). Continuous measurement is primarily used for dust,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , CO, Hg and  $\text{NH}_3$  as well as total organic carbon (TOC), while the remaining parameters relevant to ambient pollution legislation are usually determined discontinuously by individual measurements.

The measurement results 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 %.

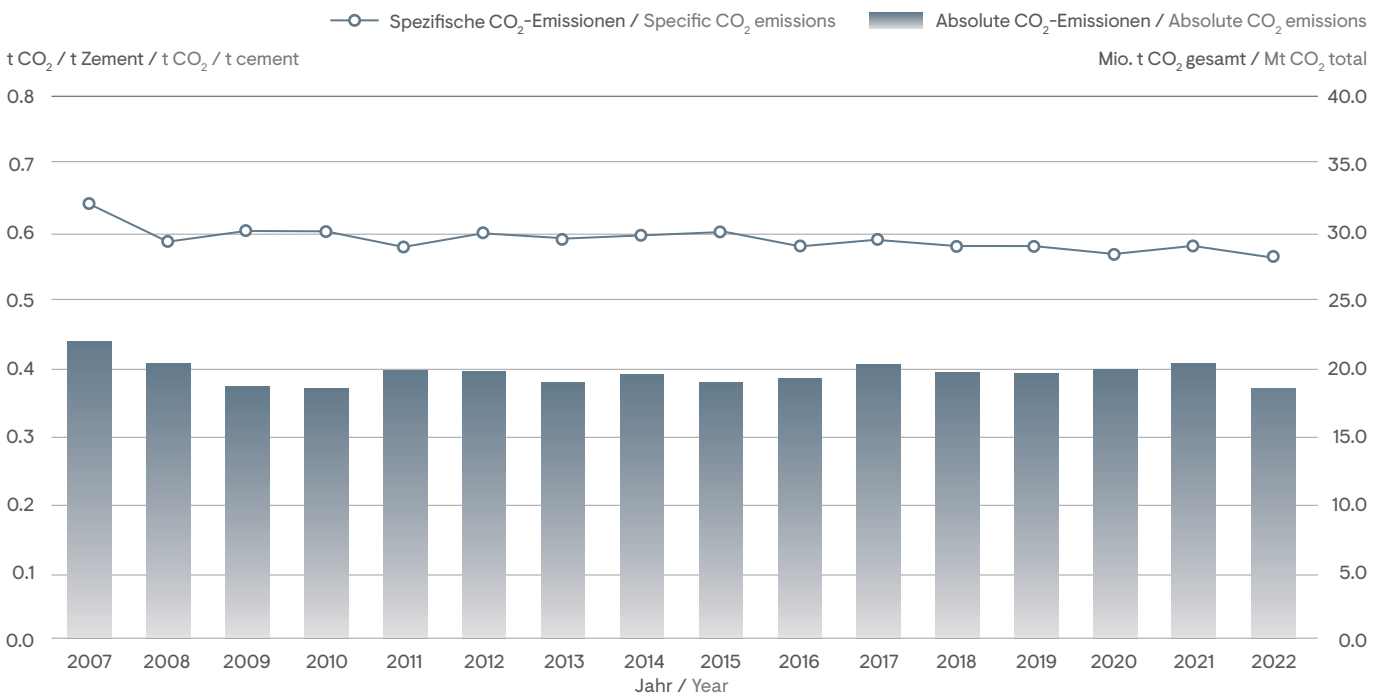
**Tabelle 5-1 Messverfahren für Emissionen**

**Table 5-1 Emission measuring methods**

Messobjekt / Object of measurement	Norm, Richtlinie / Standard, guideline
Gesamtstaub / Total dust	DIN EN 13284-1
Schwermetalle / Heavy metals	DIN EN 13211, 14385
Schwefeloxide / Sulphur oxides	DIN EN 14791
Stickstoffoxide / Nitrogen oxides	DIN EN 14792
Kohlenstoffmonoxid / Carbon monoxide	DIN EN 15058
Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds	DIN EN 1911
Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds	DIN CEN/TS 17340
Dioxine, Furane / Dioxins, furans	
- Probenahme / Sampling	DIN EN 1948, Teil 1
- Analyse / Analysis	DIN EN 1948, Teile 2 - 3
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / Polycyclic aromatic hydrocarbons	VDI 3874
Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls	DIN EN 1948, Teil 4
Organisch gebundener Kohlenstoff / Total gaseous organic carbon	DIN EN 12619
Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene	DIN CEN/TS 13649



**Bild 5-1 Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie**  
**Fig. 5-1 Direct CO<sub>2</sub> emissions by the cement industry**



Quelle / Source: DEHSt

gegeben. Sämtliche Messwerte sind auf einen Kubikmeter (m<sup>3</sup>) trockenes Abgas im Normzustand mit einem Sauerstoffgehalt von 10 % bezogen.

Aufgrund von Änderungen in den normativen Anforderungen zur Darstellung der Messergebnisse diskontinuierlich bestimmter Parameter werden sogenannte Feldblindwerte als kleinste darstellbare Konzentrationen ausgewiesen. Auf die bislang erfolgte Darstellung von Bestimmungsgrenzen wird deshalb verzichtet.

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

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Dies ist fast ausschließlich 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 direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Bild 5-1 ist die Entwicklung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt.

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 (ohne biogene Anteile) und der Entsäuerung des Kalksteins.

Due to regulatory changes in corresponding standards, so-called field blank values (as the smallest representative concentration for parameters that are measured discontinuously) are shown. The previous presentation of quantification limits is no longer used.

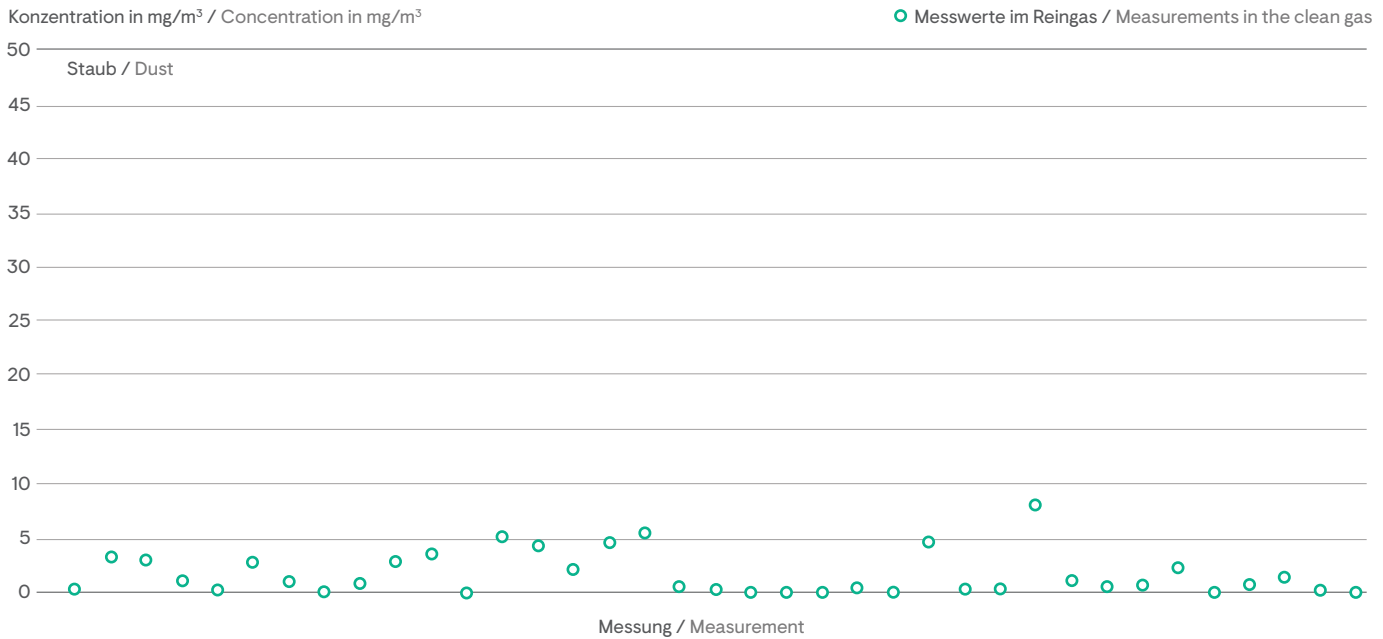
### 5.1 Greenhouse gases / carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)

During the clinker burning process greenhouse gases are emitted. This is almost entirely CO<sub>2</sub>. 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 direct CO<sub>2</sub> emissions. Energy-related emissions are generated both directly through fuel combustion and indirectly through the use of electrical power. Figure 5-1 depicts the development of direct CO<sub>2</sub> emissions.

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.

**Bild 5-2 Staub (Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-2 Dust (Annual mean values 2022)**



## 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, sind diese heute in Deutschland auf 10 mg/m<sup>3</sup> begrenzt. Bild 5-2 zeigt 37 Jahresmittelwerte der Konzentration von Staub aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 37 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.

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

## 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 are limited in Germany to 10 mg/m<sup>3</sup> today.

Figure 5-2 shows 37 annual average values of dust concentrations from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

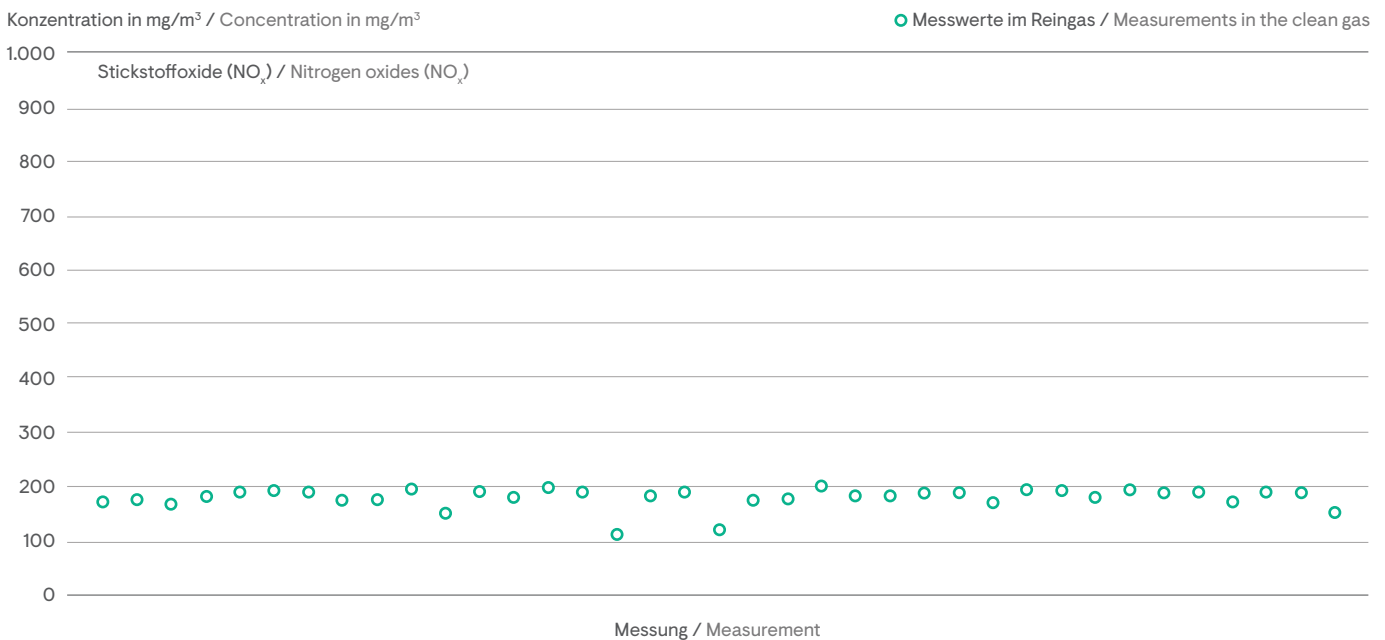
## 5.3 Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>)

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>.

Primary reduction measures are aimed at smoothing and optimising plant operation. Furthermore, considerable efforts were made to achieve compliance with the demanding NO<sub>x</sub> values in different ways. In 2022, 38 rotary kilns had an operating licence in Germany, of which 37 were in operation.

**Bild 5-3 Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>, Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-3 Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>, annual mean values 2022)**



einhalten zu können. Im Jahr 2022 hatten in Deutschland 38 Drehofenanlagen eine Betriebsgenehmigung, davon waren 37 in Betrieb. An 21 dieser Anlagen wird das SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion) zur NO<sub>x</sub>-Minderung angewendet. Darunter sind die High-Dust- und Low-Dust-Variante des SCR-Verfahrens vertreten als auch an zwei Ofenanlagen das DeCONO<sub>x</sub>-Verfahren und in einem Fall eine Lösung mit katalytischen Filterschläuchen.

In Deutschland sind 12 Vorcalcineranlagen in Betrieb, an denen eine gestufte Zweitfeuerung zur Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen betrieben wird bzw. werden kann. An 11 Vorcalcineranlagen wird zusätzlich das SNCR-Verfahren (selektive nicht-katalytische Reduktion) und an zweien das SCR-Verfahren angewendet. Ofenanlagen mit SCR-Anlagen sind zusätzlich mit SNCR-Technologie ausgestattet, mit der bei einem Ausfall der SCR-Anlage die Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen erfolgt. An allen weiteren Ofenanlagen (Anlagen mit Zyklonvorwärmer oder mit Rostvorwärmer) wird bis auf eine Ausnahme ebenfalls das SNCR-Verfahren angewendet. Somit sind diese Minderungsverfahren an insgesamt 37 Ofenanlagen installiert.

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.

At 21 of these plants the SCR process (selective catalytic reduction) is used for NO<sub>x</sub> reduction. These include the high-dust and low-dust variants of the SCR process as well as the DeCONO<sub>x</sub> process at two kiln plants and, in one case, a solution with catalytic filter bags.

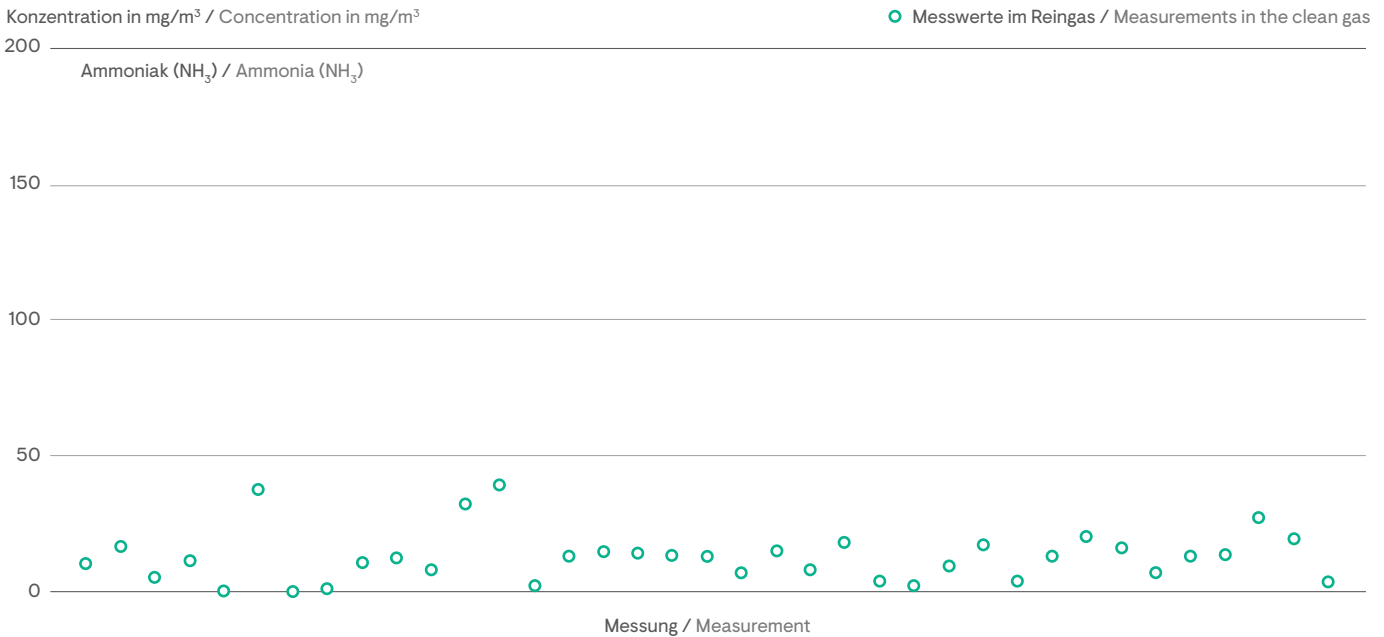
In Germany 13 precalcining plants are in operation at which a staged secondary firing system is or can be operated to reduce NO<sub>x</sub> emissions. The SNCR process (selective non-catalytic reduction) is also used at 11 precalcining plants. The SCR process is used at two precalcining plants. Furnaces with SCR systems are additionally equipped with SNCR technology, which is used to reduce NO<sub>x</sub> emissions in the event of SCR system failure. At all other kiln plants (plants with cyclone preheater or with grate preheater), with one exception, the SNCR process is also applied. Thus, these abatement processes are installed at a total of 37 kiln plants.

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.

**Bild 5-4 Ammoniak (NH<sub>3</sub>, Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-4 Ammonia (NH<sub>3</sub>, annual mean values 2022)**



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 sogenannten brennstoffbedingten NO führen.

Bild 5-3 zeigt 37 Jahresmittelwerte der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

#### 5.4 Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

Emissionen von Ammoniak können beim Klinkerbrennprozess zum einen durch Ausgasen und Verdampfen ammoniumhaltiger Verbindungen in den Rohmaterialien entstehen. Zum anderen kann der Einsatz des SNCR-Verfahrens, bei dem eine ammoniakalische Lösung im Steigschacht bzw. Calcinator der Ofenanlage eingedüst wird, zu einem gewissen NH<sub>3</sub>-Schlupf führen, wenn die Umsetzung des Reduktionsmittels nicht vollständig ist.

Die rohstoffbedingten Ammoniakemissionen variieren zum Teil signifikant von Werk zu Werk bzw. Steinbruch zu Steinbruch sowie auch innerhalb eines Steinbruches. Bei der NO<sub>x</sub>-Minderung mit dem SNCR-Verfahren spielen verschiedene prozesstechnische Parameter, wie die Temperatur an der Eindüsetelle, die Verweilzeit für die Reaktion mit Stickstoffmonoxid sowie die erforderliche NO<sub>x</sub>-Minderung, eine Rolle, inwiefern NH<sub>3</sub> als Schlupf den Vorwärmer verlässt.

Im Abgasweg wird Ammoniak vor allem in der Rohmühle wieder eingebunden und mit dem Ofenmehl wieder zum Prozess zurückgeführt. Im Direktbetrieb der Ofenanlage (Stillstand der Rohmühle) entfällt diese Einbindung und i.d.R. treten höhere Ammoniakemissionen auf als im Verbundbetrieb. Bei Verwendung der SCR-Technologie zur NO<sub>x</sub>-Minderung in der High-Dust-Variante

Figure 5-3 shows 37 annual average values of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) concentrations from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

#### 5.4 Ammonia (NH<sub>3</sub>)

Ammonia (NH<sub>3</sub>) emissions can occur from the clinker burning process on the one hand by the outgassing and vaporizing of ammonium-containing compounds in the raw materials. On the other hand, when using SNCR technology an ammonia-containing solution is injected into the riser duct or calciner of a cement kiln system. This can lead to a NH<sub>3</sub> slip if the conversion of the reducing agent is not complete.

Raw material-related ammonia emissions vary significantly from plant to plant, from quarry to quarry and within a quarry. If SNCR technology is applied for NO<sub>x</sub> abatement, different process parameters like the temperature at the injection location, the residence time available for the reaction with nitrogen oxide and the required NO<sub>x</sub> reduction have an impact on the ammonia slip from the preheater.

In the exhaust gas path, ammonia is mainly bound in the raw mill and is re-routed back to the process with the kiln feed. In direct operation of the kiln system (raw mill-off) this binding does not occur and normally higher NH<sub>3</sub> emissions occur compared to raw mill-on operation. When using High Dust-SCR technology (SCR catalyst installed after the preheater), ammonia leaving the preheater with the exhaust gas can be utilised as a reducing agent and the ammonia injection can be reduced.

Figure 5.4 shows 37 annual average values of ammonia (NH<sub>3</sub>) concentration from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

(Installation des Katalysators nach Vorwärmer) kann  $\text{NH}_3$ , das den Vorwärmer mit dem Rohgas verlässt, als Reduktionsmittel genutzt und somit die Eindüsung von Ammoniaklösung reduziert werden.

Bild 5.4 zeigt 37 Jahresmittelwerte der Konzentration von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

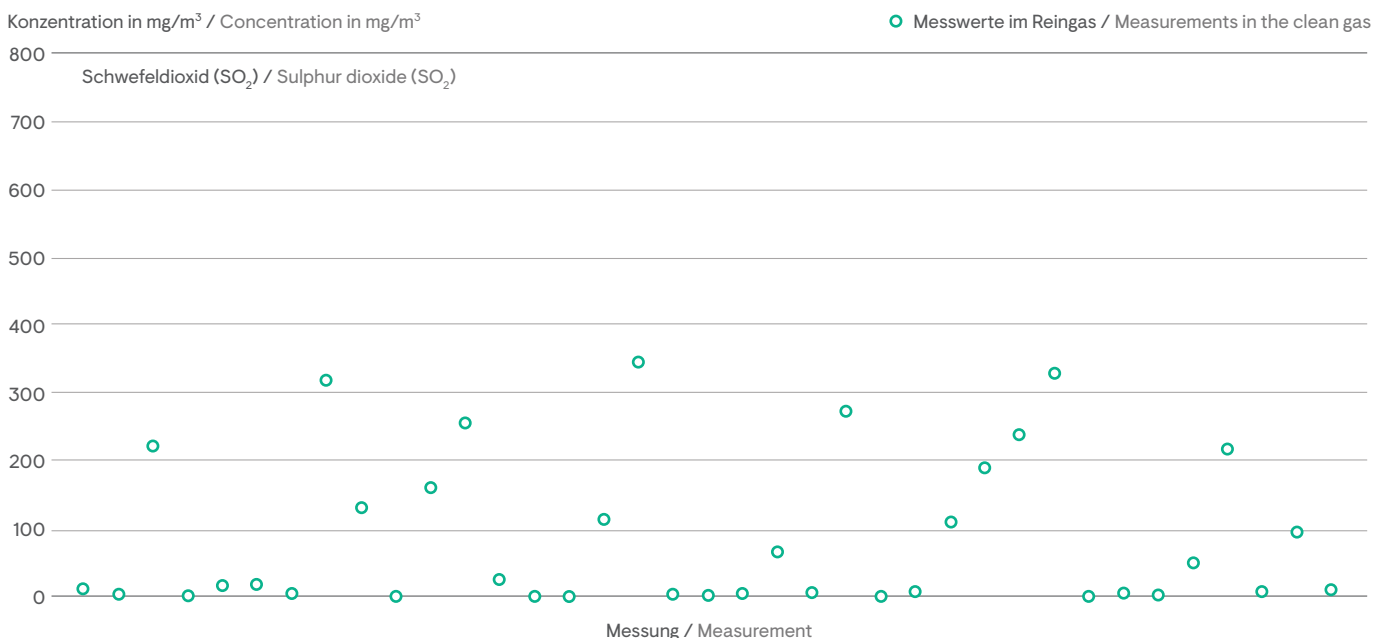
### 5.5 Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ )

Schwefel wird dem Klinkerprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen. Ursache für höhere  $\text{SO}_2$ -Emissionen von den Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen  $370^\circ\text{C}$  und ca.  $420^\circ\text{C}$  zu  $\text{SO}_2$  oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor. Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die  $\text{SO}_2$ -Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu  $1,2\text{g}/\text{m}^3$  betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11 Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen eingesetzt.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung im Drehofen vollständig zu  $\text{SO}_2$  umgewandelt. Dieses  $\text{SO}_2$  reagiert im Vorwärmer- und Ofenbereich zu Alkalisulfaten, die überwiegend im Klinker gebunden werden.

Bild 5-5 zeigt 37 Jahresmittelwerte von Schwefeldioxid aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

**Bild 5-5 Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ , Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-5 Sulphur dioxide ( $\text{SO}_2$ , annual mean values 2022)**



### 5.5 Sulphur dioxide ( $\text{SO}_2$ )

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  $\text{SO}_2$  emissions by rotary kiln systems of the cement industry might be attributable to the sulphides contained in the raw material, which become oxidised to form  $\text{SO}_2$  at temperatures between  $370^\circ\text{C}$  and  $420^\circ\text{C}$  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,  $\text{SO}_2$  emission concentrations can total up to  $1.2\text{g}/\text{m}^3$  depending on the site location. The cement industry has made great efforts to reduce  $\text{SO}_2$  emissions. For example, lime hydrate is utilised at 11 kiln systems to lower  $\text{SO}_2$  emissions.

The sulphur input with the fuels is completely converted to  $\text{SO}_2$  during combustion in the rotary kiln. In the area of the preheater and the kiln, this  $\text{SO}_2$  reacts to form alkali sulphates, which are predominantly bound in the clinker.

Figure 5-5 shows 37 annual average values of sulphur dioxide from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

## 5.6 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff ( $\Sigma C$ )

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.

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 5-6 zeigt 37 Jahresmittelwerte der CO-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

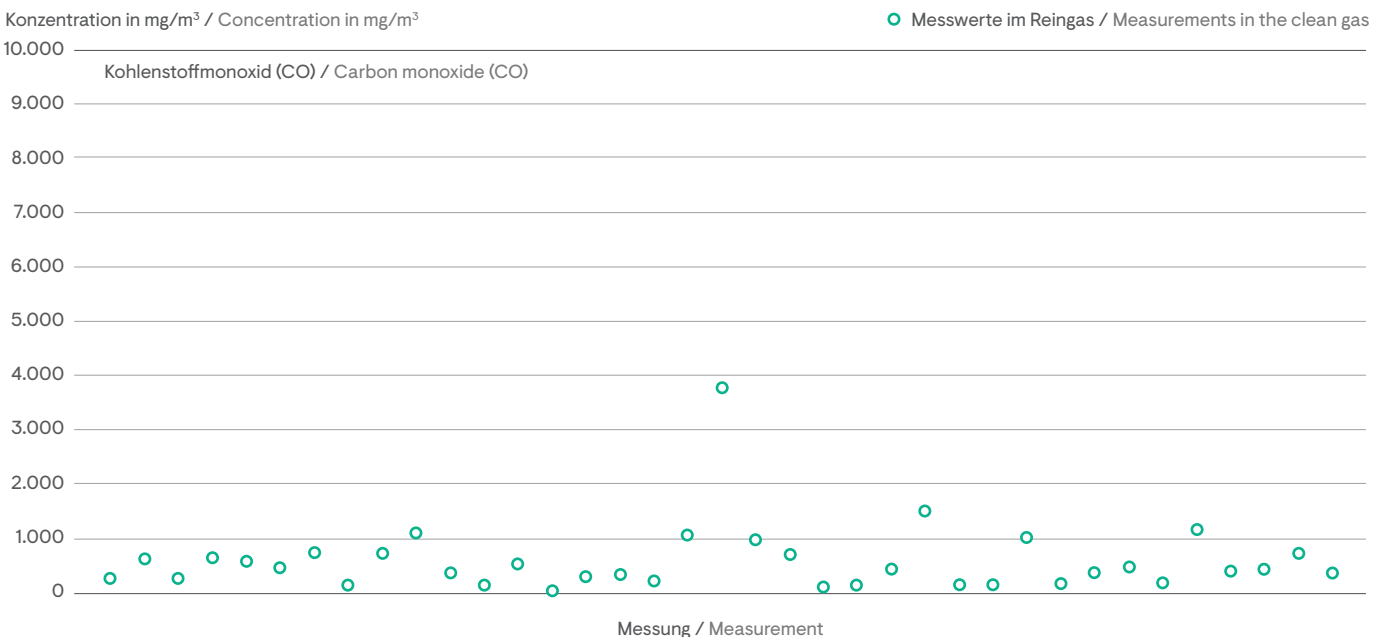
## 5.6 Carbon monoxide (CO) and total organic carbon (TOC)

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.

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 5-6 shows 37 annual average values of carbon monoxide concentration from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

**Bild 5-6 Kohlenstoffmonoxid (CO, Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-6 Carbon monoxide (CO, annual mean values 2022)**



**Bild 5-7 Organischer Gesamtkohlenstoff ( $\Sigma C$ , Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-7 Total organic carbon (TOC, annual mean values 2022)**

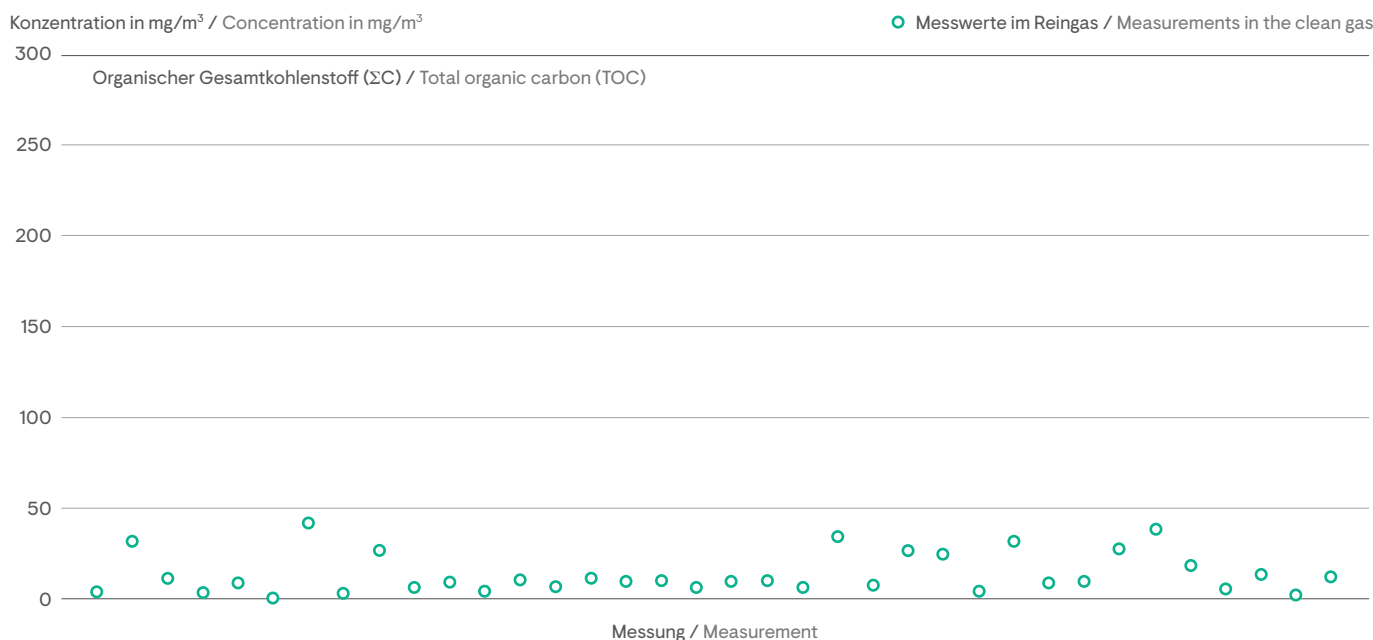


Bild 5-7 zeigt 36 Jahresmittelwerte der Gesamtkohlenstoffkonzentration aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 36 Drehofenanlagen.

Figure 5-7 shows 36 annual average values of total organic carbon concentration from continuous monitoring in the clean gas of 36 rotary kilns.

### 5.7 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.

### 5.7 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.

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.

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.

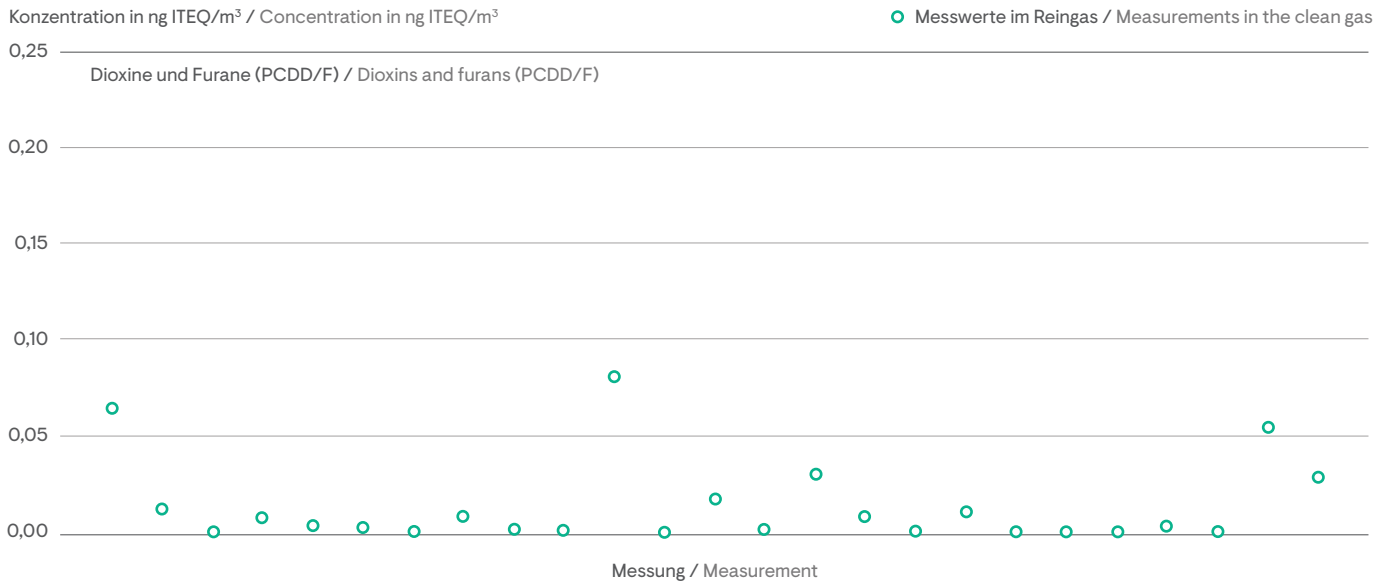
Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Bestimmungsgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Laboratorien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948  $\pm 0,05 \text{ ng ITEQ/m}^3$  (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent).

Note: No limit of quantification 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  $\pm 0.05 \text{ ng ITEQ/m}^3$  (ITEQ: international toxicity equivalent).

Im Bild 5-8 sind 114 Messwerte der Konzentration von Dioxinen und Furanen aus 2022 im Reingas von 36 Drehofenanlagen dargestellt. In 89 Fällen konnten keine PCDD/F nachgewiesen werden.

Figure 5-8 shows 114 dioxin and furan concentration values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns in 2022. In 89 cases there were no PCDD/F detected.

**Bild 5-8 Dioxine und Furane (PCDD/F, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-8 Dioxin and furan (PCDD/F, measurements 2022)**



### 5.8 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

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

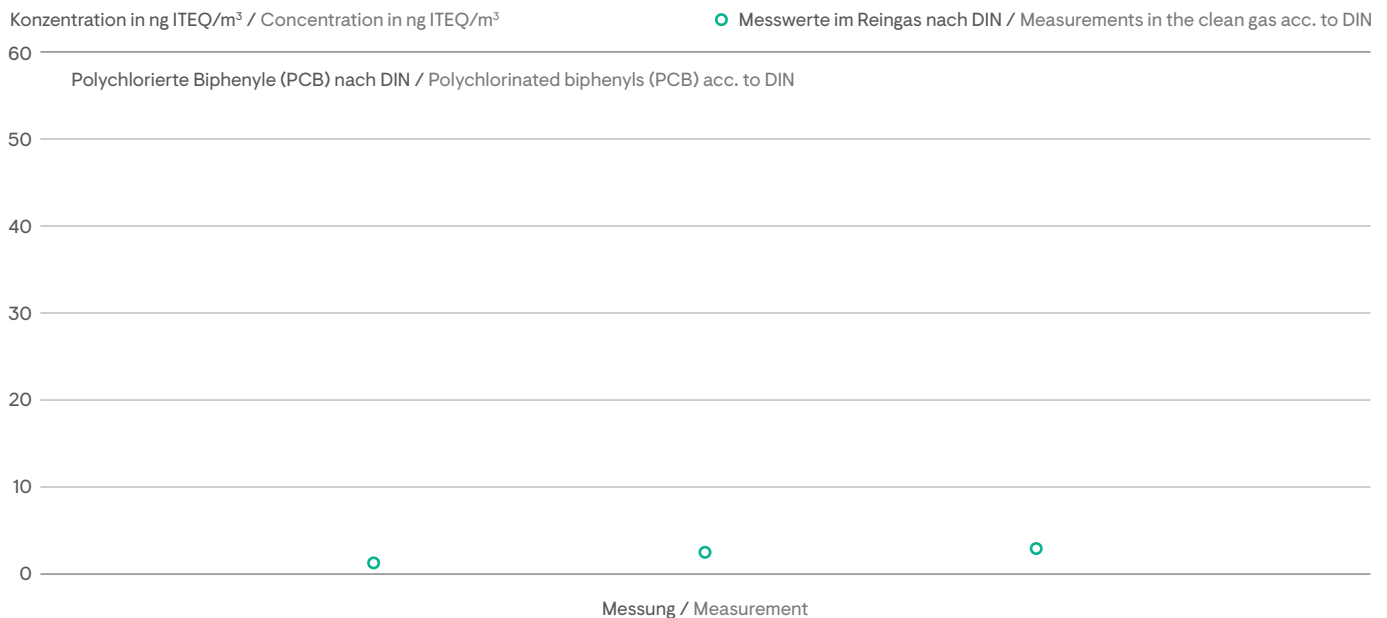
Bild 5-9 und Bild 5-10 zeigen 103 Werte aus Messungen an 33 Drehofenanlagen, 3 Werte nach DIN und 100 Werte nach WHO.

### 5.8 Polychlorinated biphenyls (PCB)

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

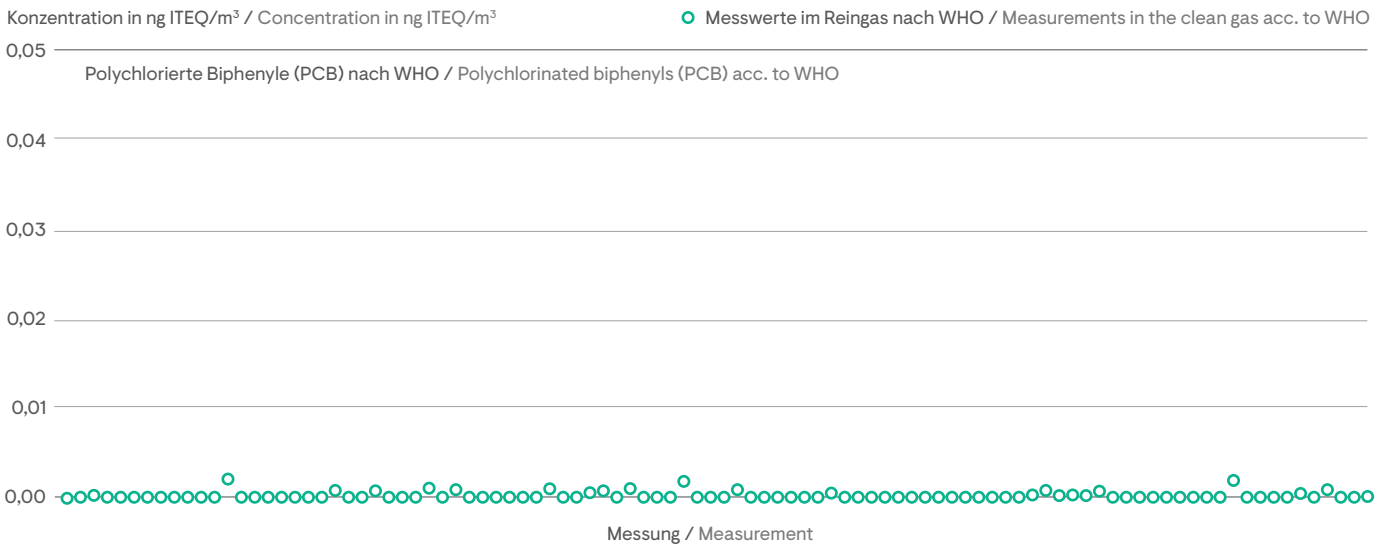
Figure 5-9 and Figure 5-10 show 103 values from measurements at 33 rotary kilns, 3 values acc. to DIN and 100 values acc. to WHO.

**Bild 5-9 Polychlorierte Biphenyle (PCB nach DIN, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-9 Polychlorinated biphenyls (PCB acc. to DIN, measurements 2022)**





**Bild 5-10 Polychlorierte Biphenyle (PCB nach WHO, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-10 Polychlorinated biphenyls (PCB acc. to WHO, measurements 2022)**



### 5.9 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.

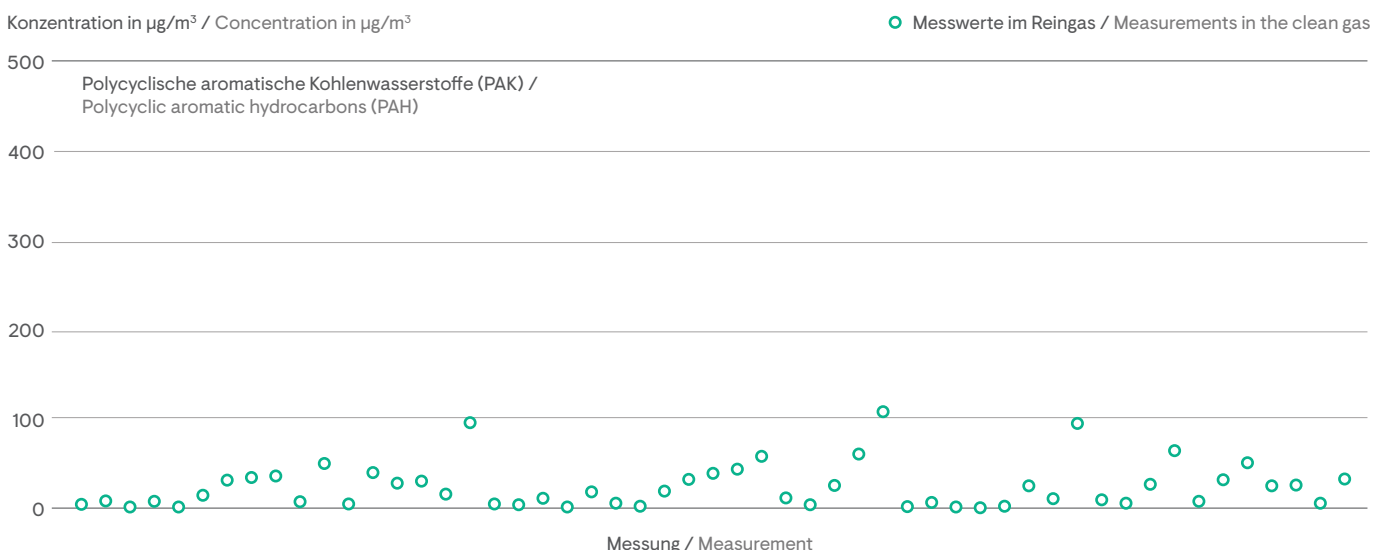
Bild 5-11 zeigt 56 Messwerte der Konzentration von PAK im Reingas von 19 Drehofenanlagen. In drei Fällen konnten keine PAK nachgewiesen werden.

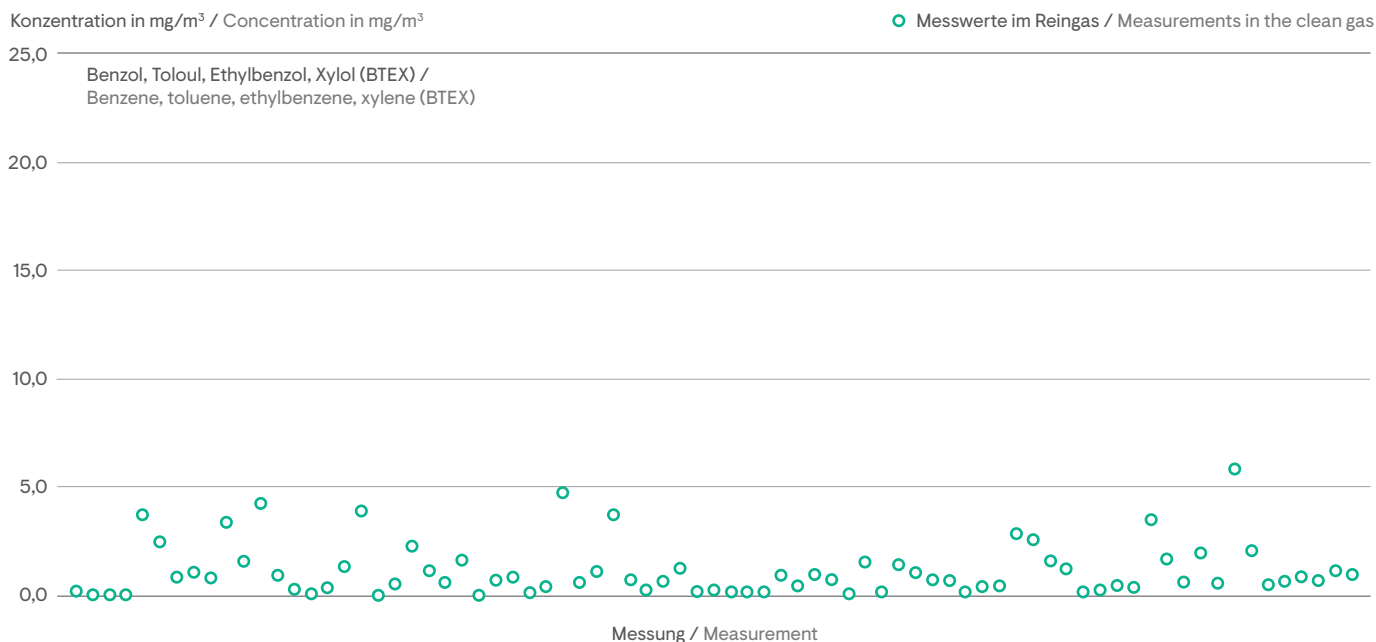
### 5.9 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)

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.

Figure 5-11 shows 56 PAH concentration values in the clean gas at 19 rotary kilns. In three cases there were no PAH detected.

**Bild 5-11 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK nach EPA 610, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-11 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610, measurements 2022)**



**Bild 5-12 Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol BTEX (Messwerte 2022)****Fig. 5-12 Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene BTEX (measurements 2022)**

### 5.10 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.

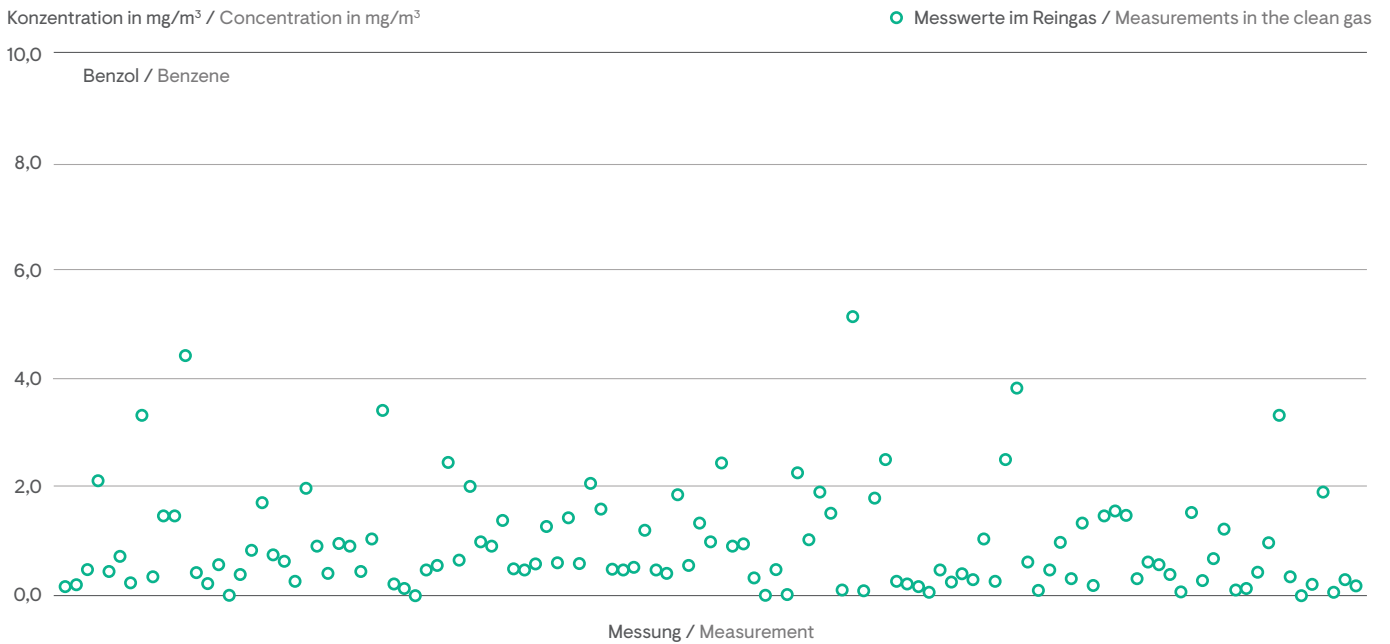
In 2022 wurden 80 Werte aus Messungen der BTEX-Konzentration im Reingas von 21 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-12).

### 5.10 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.

Figure 5-12 shows 80 BTEX concentration values from measurements in the clean gas at 21 rotary kilns.

**Bild 5-13 Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-13 Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, measurements 2022)**



### 5.11 Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

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.

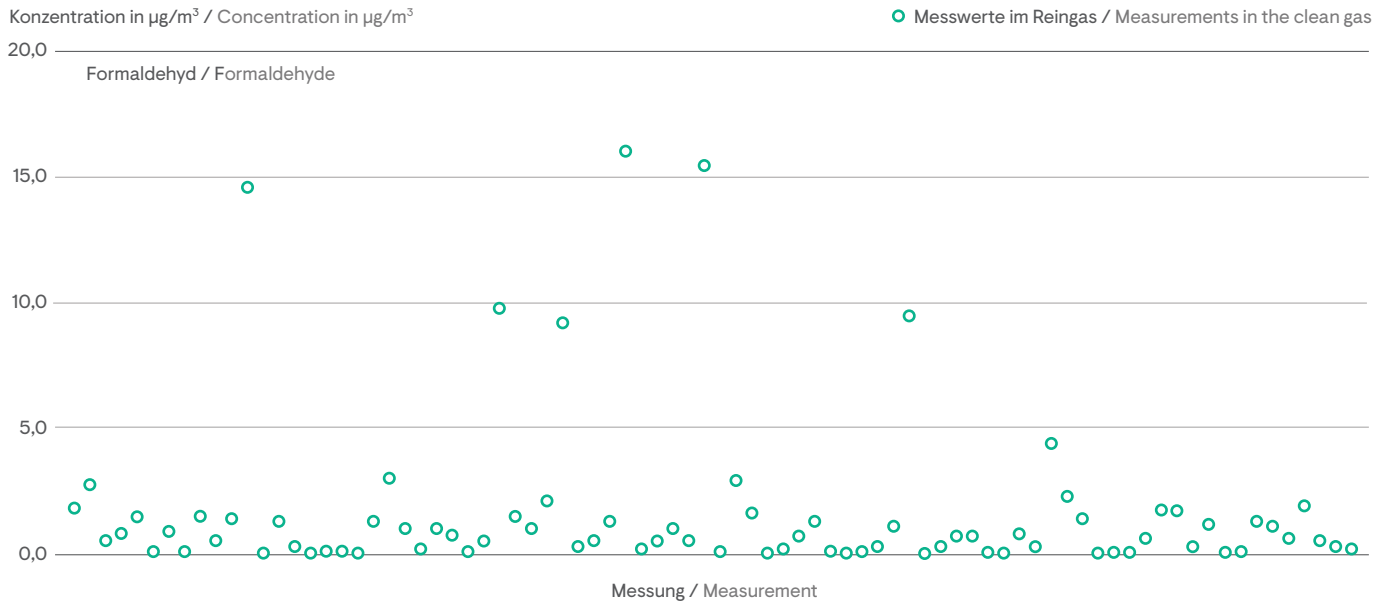
Bild 5-13 zeigt 122 Werte aus Messungen der Benzolkonzentration im Reingas von 33 Ofenanlagen.

### 5.11 Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

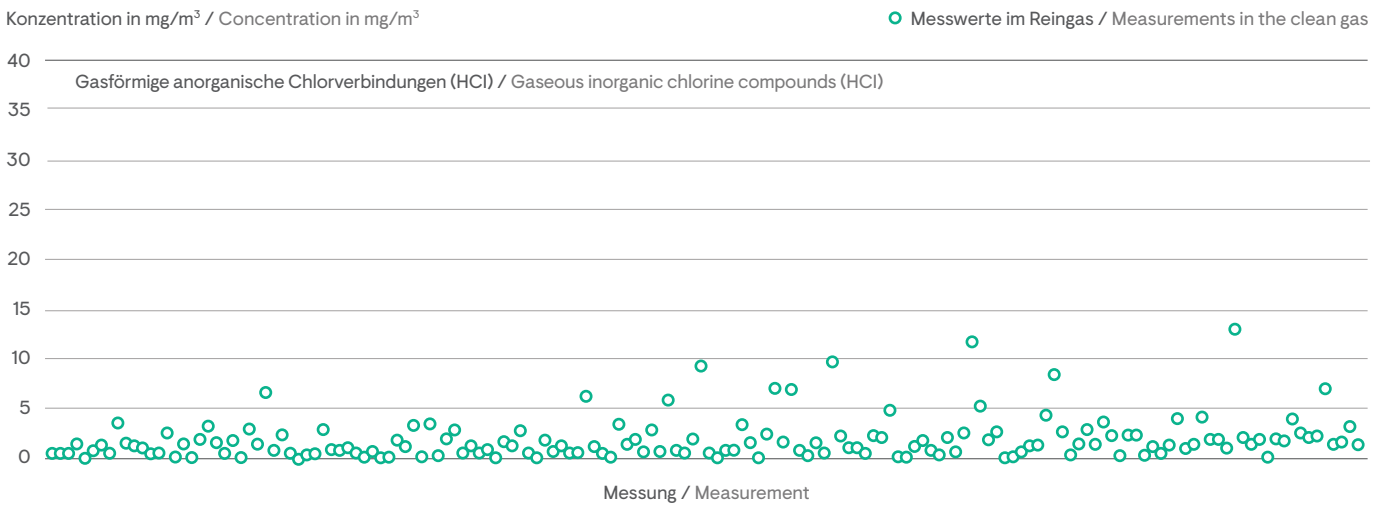
Benzene is produced during the thermal decomposition of organic raw material constituents in the preheater. As a rule, it accounts for more than half of the BTEX emissions.

Figure 5-13 shows 122 benzene concentration values from measurements in the clean gas at 33 rotary kilns.

**Bild 5-14 Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-14 Formaldehyde (CH<sub>2</sub>O, measurements 2022)**



**Bild 5-16 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-16 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl, measurements 2022)**



#### 5.14 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 5-16 zeigt 161 Werte aus Messungen der HCl-Konzentration im Reingas von 36 Drehofenanlagen.

#### 5.15 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

#### 5.14 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)

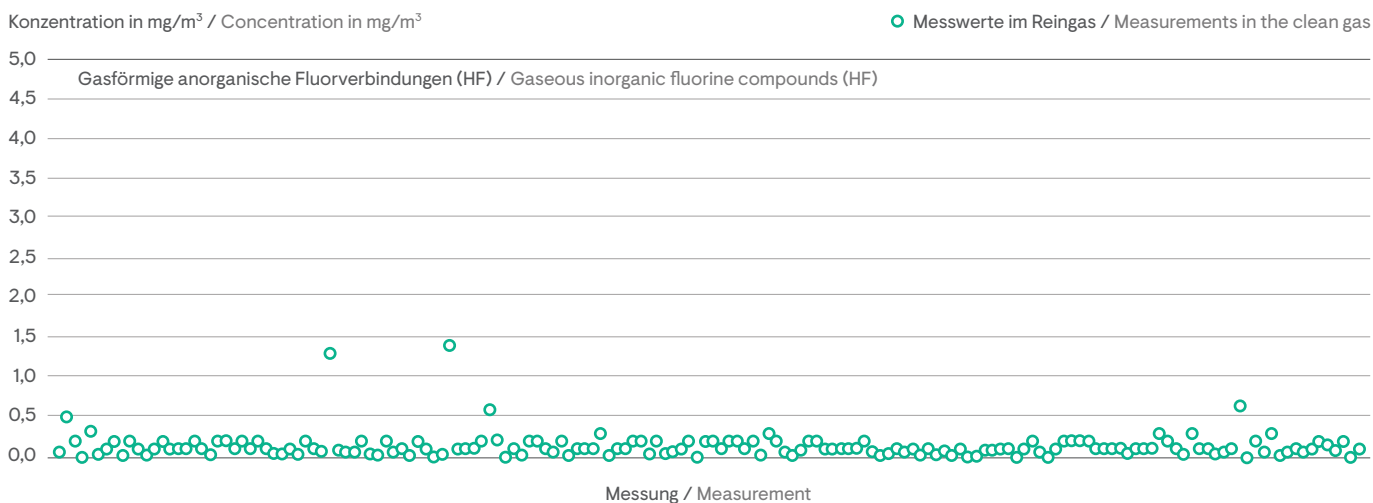
Chlorides are minor additional constituents contained in the raw materials and fuels of the clinker burning process. They are released when the fuels are burnt or the kiln feed is heated and primarily react with the alkalis from the kiln feed to form alkali chlorides. These compounds, which are initially 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 5-16 shows 161 HCl concentration values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

#### 5.15 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.

**Bild 5-17 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-17 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF, measurements 2022)**



auch von Fluorwasserstoff, ist wegen des hohen Calciumüberschusses praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das Messgasfilter passieren, können bei Drehofenanlagen der Zementindustrie geringe Gehalte an gasförmigen Fluorverbindungen vortäuschen.

Bild 5-17 zeigt 165 Werte aus Messungen der HF-Konzentration im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

### 5.16 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 Rückhaltenvermögens von Ofen und Vorwärmer nur in äußerst geringem Maße emittiert. Tabelle 5-2 enthält repräsentative Emissionsfaktoren für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer. Mit ihnen lässt sich abschätzen, welcher Anteil der Spurenelemente aus den Roh- und Brennstoffen durchschnittlich mit dem Reingas emittiert wird.

ed. 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.

Figure 5-17 shows 165 HF concentration values from measurements in the clean gas at 34 rotary kilns.

### 5.16 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 5-2 gives representative emission factors for rotary kiln systems equipped with cyclone preheaters. These coefficients serve to calculate the average proportion of trace elements from raw materials and fuels emitted with the clean gas.

**Tabelle 5-2 Emissionsfaktoren (EF, emittierter Anteil des Gesamteintrags) für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer**  
**Table 5-2 Emission factors (EF, emitted portion of the total input) for rotary kiln systems with cyclone pre-heater**

Komponente / Component	EF in % / EF in %
Cadmium / Cadmium	0,17
Thallium / Thallium	1,3
Quecksilber / Mercury	40,0
Antimon / Antimony	0,03
Arsen / Arsenic	0,023
Blei / Lead	0,05
Chrom / Chromium	0,012
Cobalt / Cobalt	0,019
Kupfer / Copper	0,0093
Mangan / Manganese	0,018
Nickel / Nickel	0,03
Vanadium / Vanadium	0,052
Zinn / Tin	0,074

Quelle / Source: Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen

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.

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.

**Bild 5-18 Cadmium (Cd, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-18 Cadmium (Cd, measurements 2022)**



#### 5.16.1 Cadmium (Cd)

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-18).

#### 5.16.1 Cadmium (Cd)

Figure 5-18 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

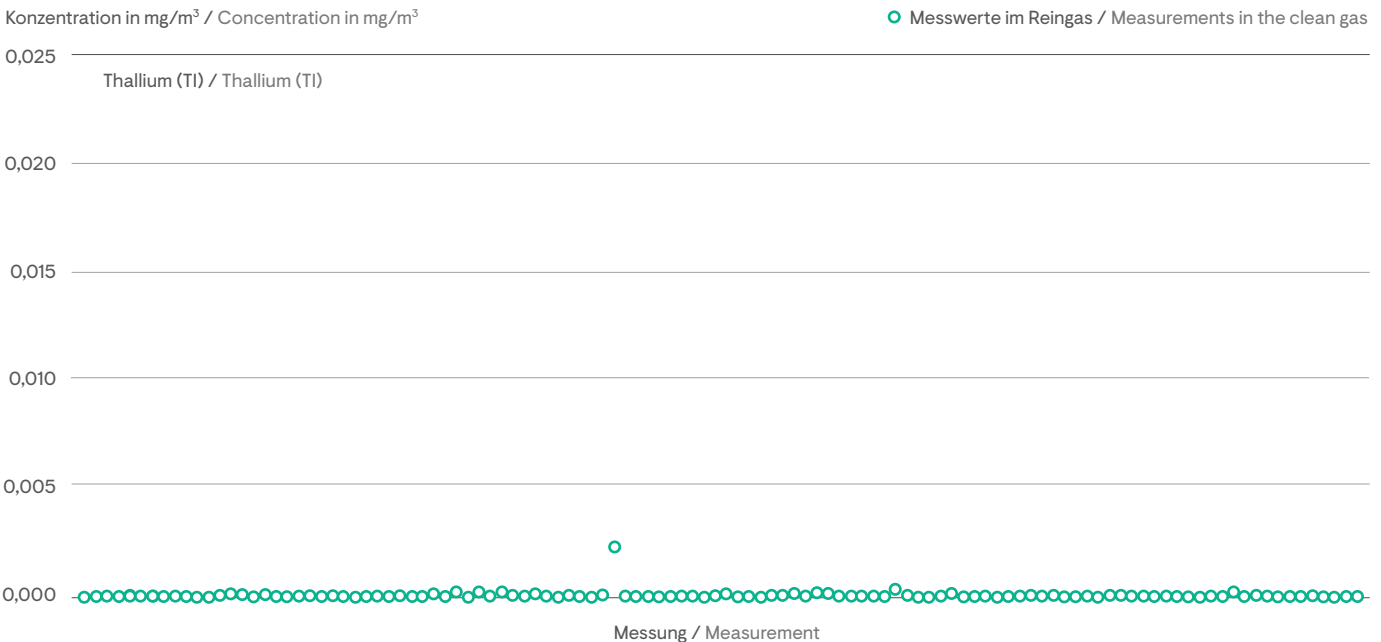
#### 5.16.2 Thallium (Tl)

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-19).

#### 5.16.2 Thallium (Tl)

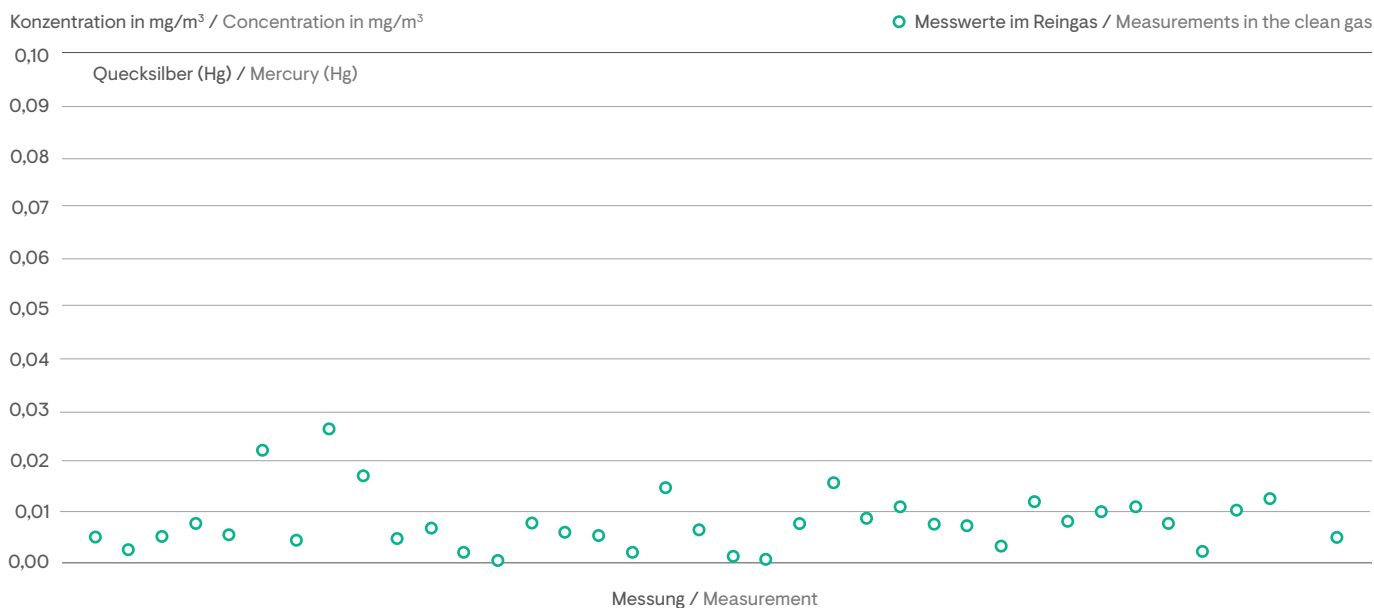
Figure 5-19 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**Bild 5-19 Thallium (Tl, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-19 Thallium (Tl, measurements 2022)**





**Bild 5-20 Quecksilber (Hg, Jahresmittelwerte 2022)**  
**Fig. 5-20 Mercury (Hg, Annual mean values 2022)**



### 5.16.3 Quecksilber (Hg)

In 2022 wurden 37 Jahresmittelwerte der Hg-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-20).

### 5.16.4 Antimon (Sb)

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-21).

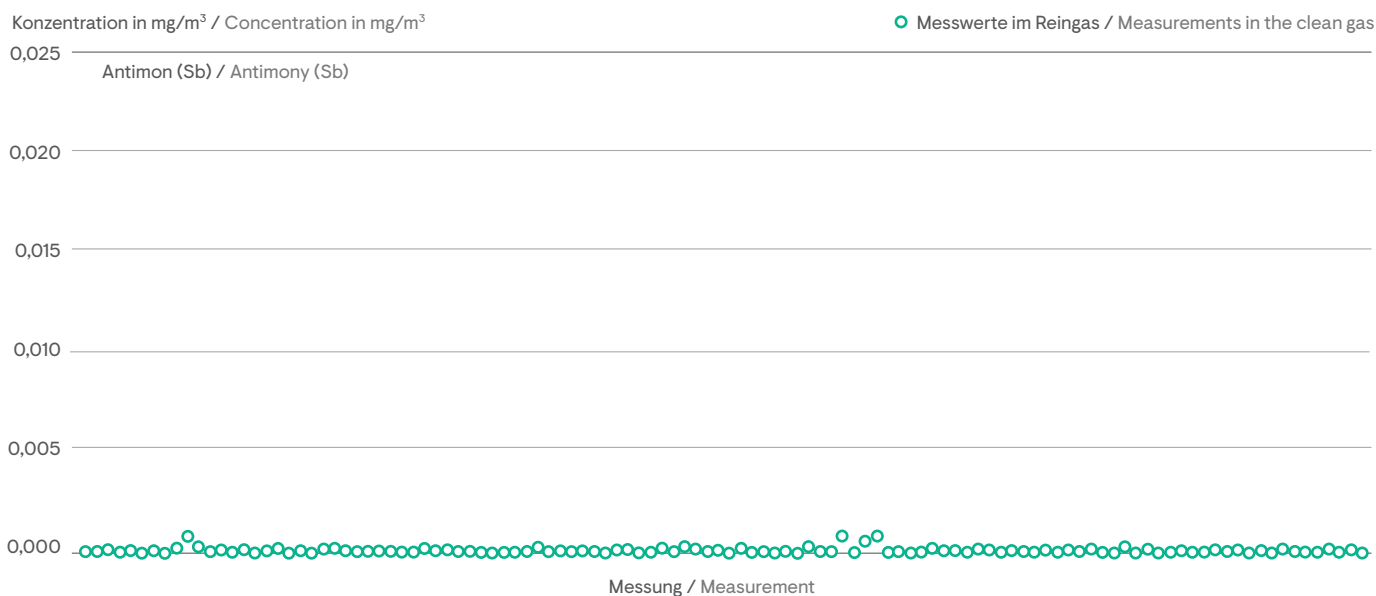
### 5.16.3 Mercury (Hg)

Figure 5-20 shows 37 annual average Hg concentration values from continuous monitoring at 37 rotary kilns.

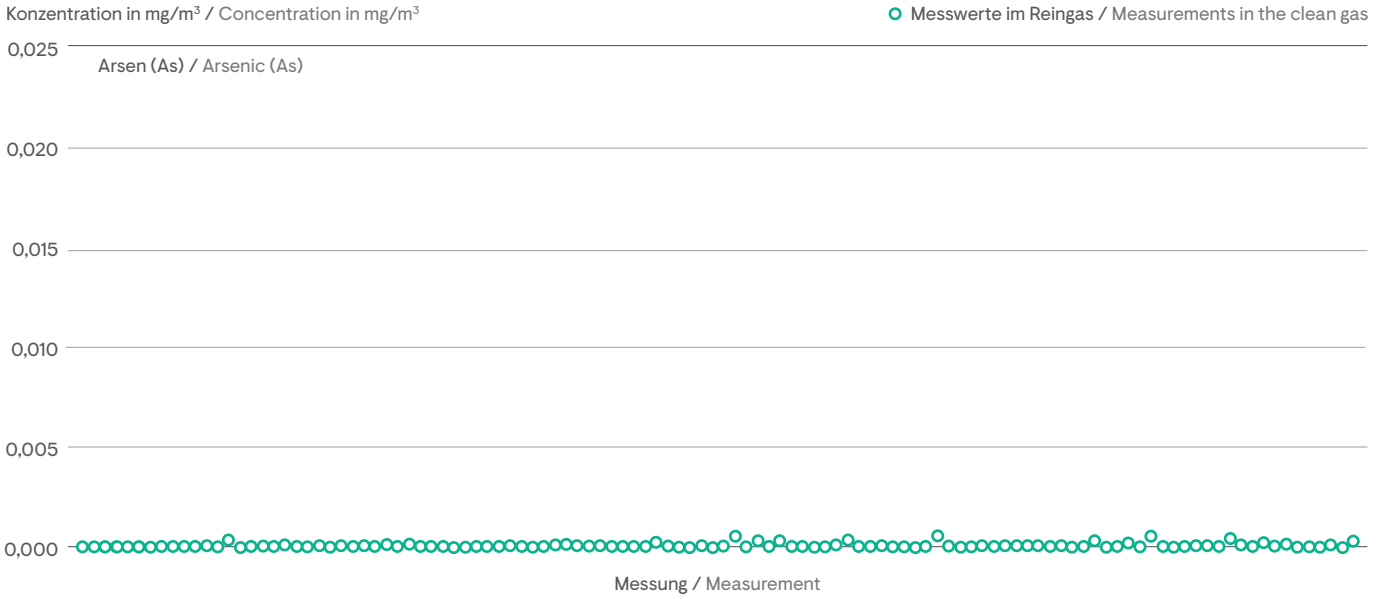
### 5.16.4 Antimony (Sb)

Figure 5-21 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**Bild 5-21 Antimon (Sb, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-21 Antimony (Sb, measurements 2022)**



**Bild 5-22 Arsen (As, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-22 Arsenic (As, measurements 2022)**



**5.16.5 Arsen (As)**

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-22).

**5.16.5 Arsenic (As)**

Figure 5-22 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

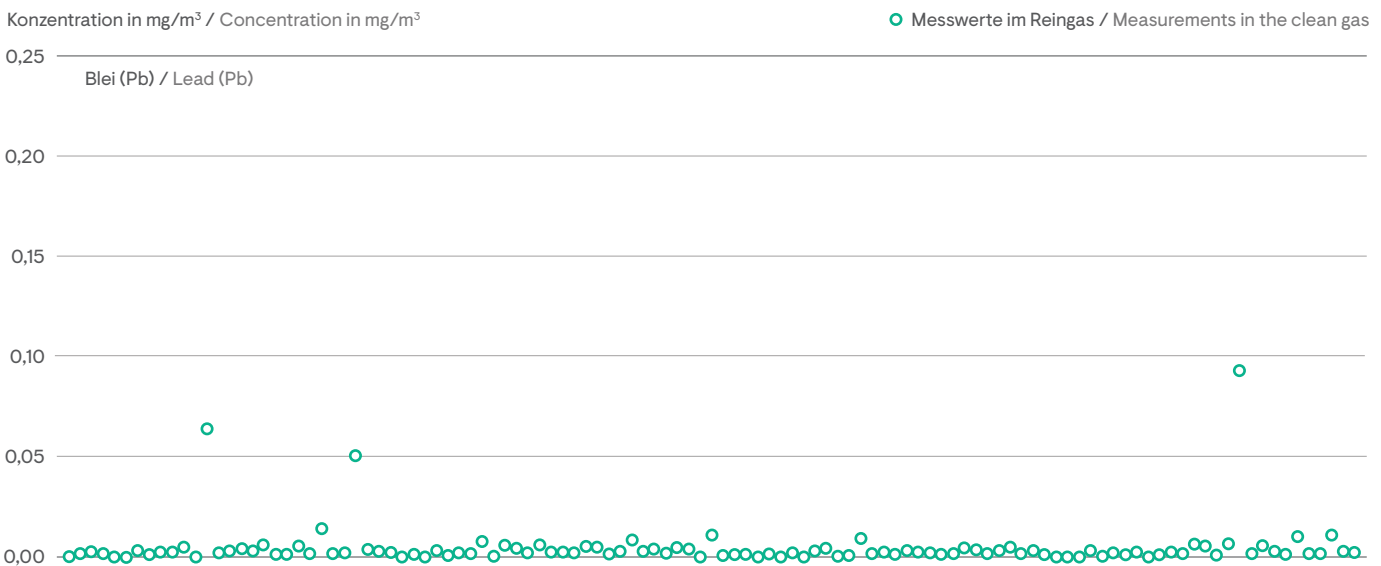
**5.16.6 Blei (Pb)**

In 2022 wurden 116 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-23).

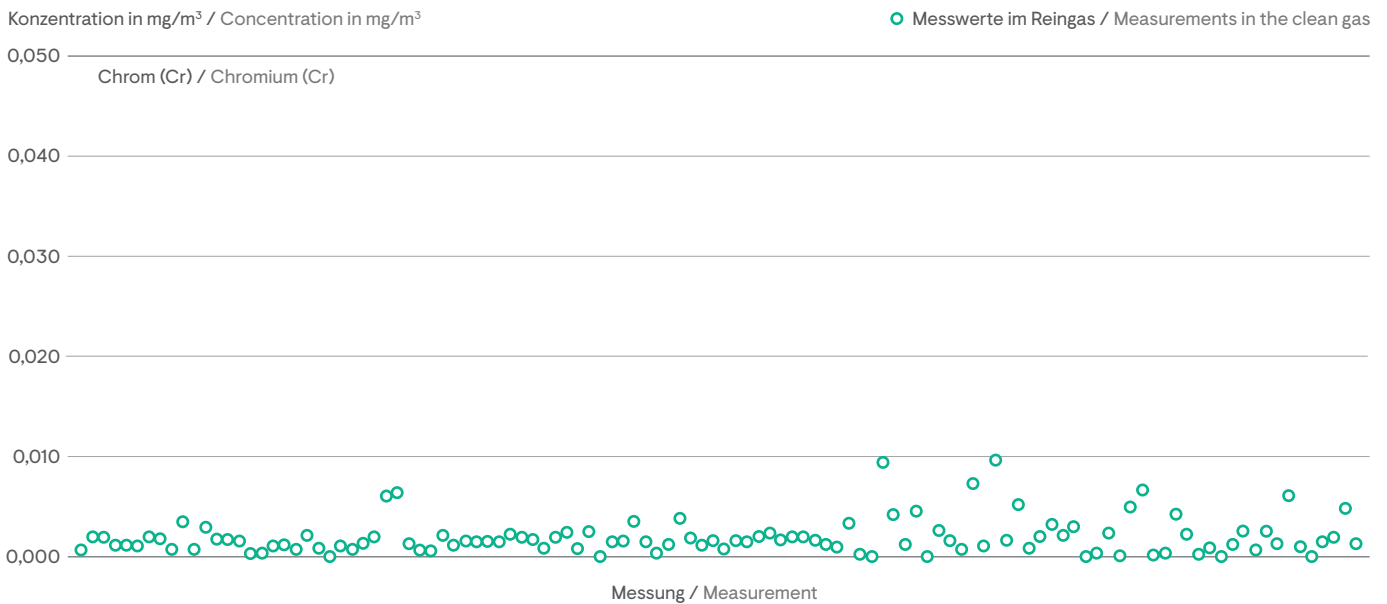
**5.16.6 Lead (Pb)**

Figure 5-23 shows 116 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**Bild 5-23 Blei (Pb, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-23 Lead (Pb, measurements 2022)**



**Bild 5-24 Chrom (Cr, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-24 Chromium (Cr, measurements 2022)**



#### 5.16.7 Chrom (Cr)

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-24).

#### 5.16.7 Chromium (Cr)

Figure 5-24 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

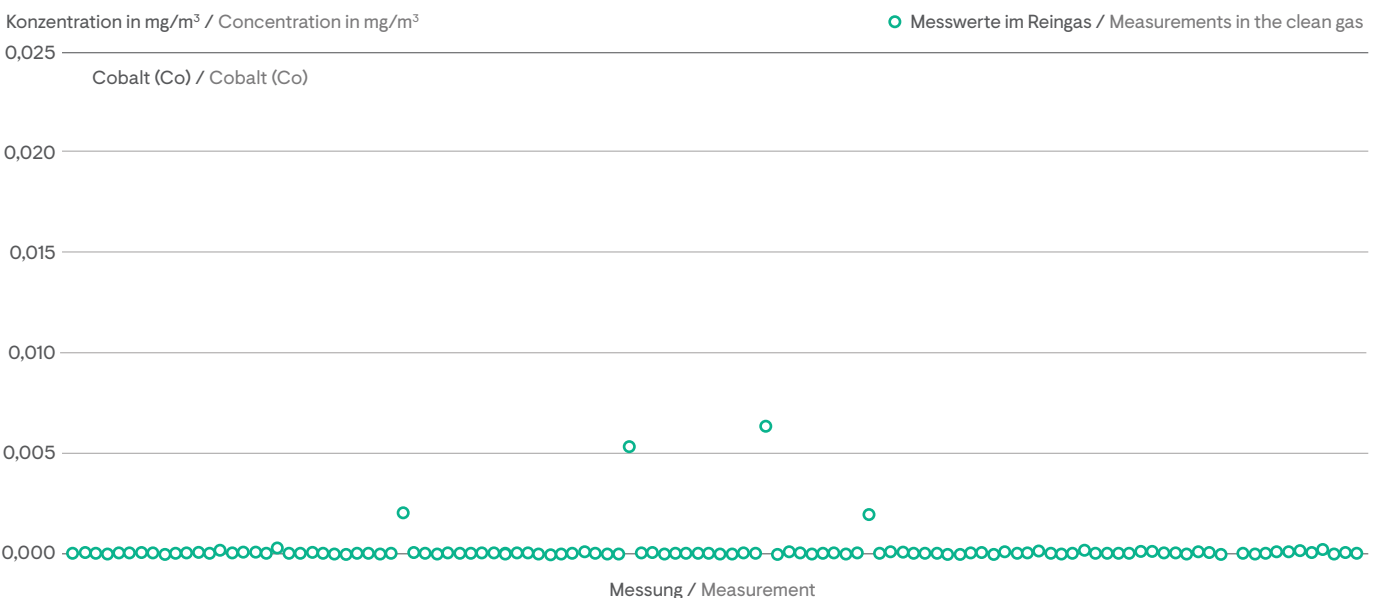
#### 5.16.8 Cobalt (Co)

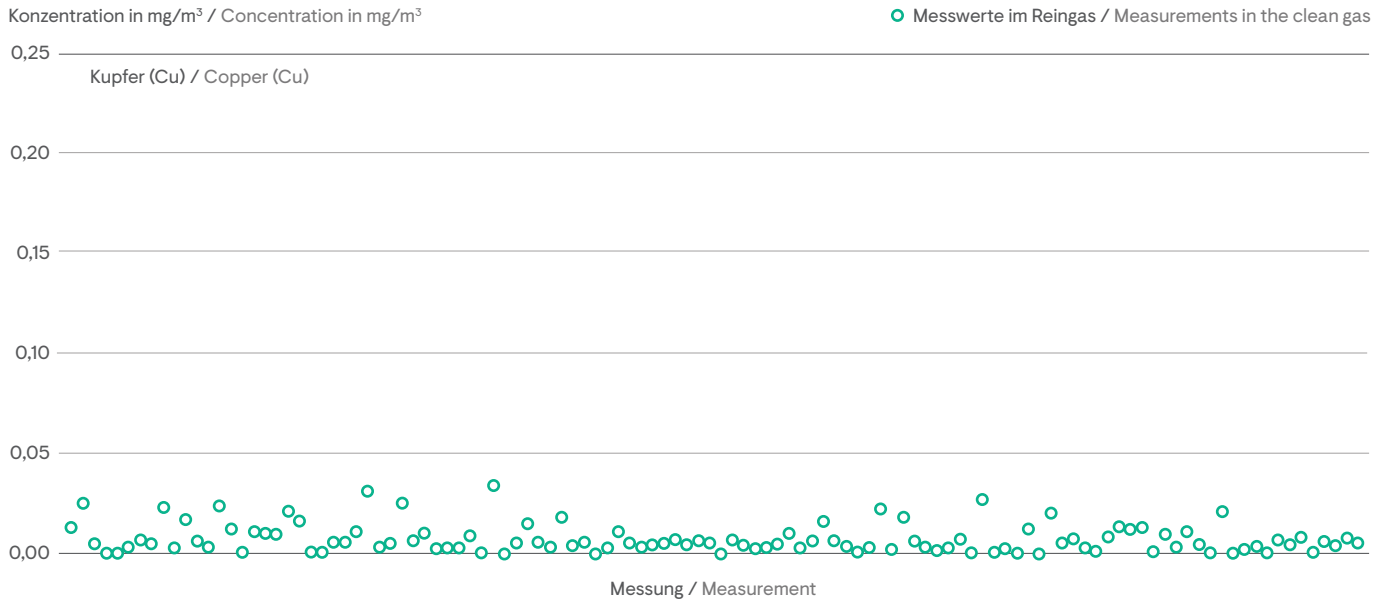
In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-25).

#### 5.16.8 Cobalt (Co)

Figure 5-25 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**Bild 5-25 Cobalt (Co, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-25 Cobalt (Co, measurements 2022)**



**Bild 5-26 Kupfer (Cu, Messwerte 2022)****Fig. 5-26 Copper (Cu, measurements 2022)****5.16.9 Kupfer (Cu)**

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-26).

**5.16.9 Copper (Cu)**

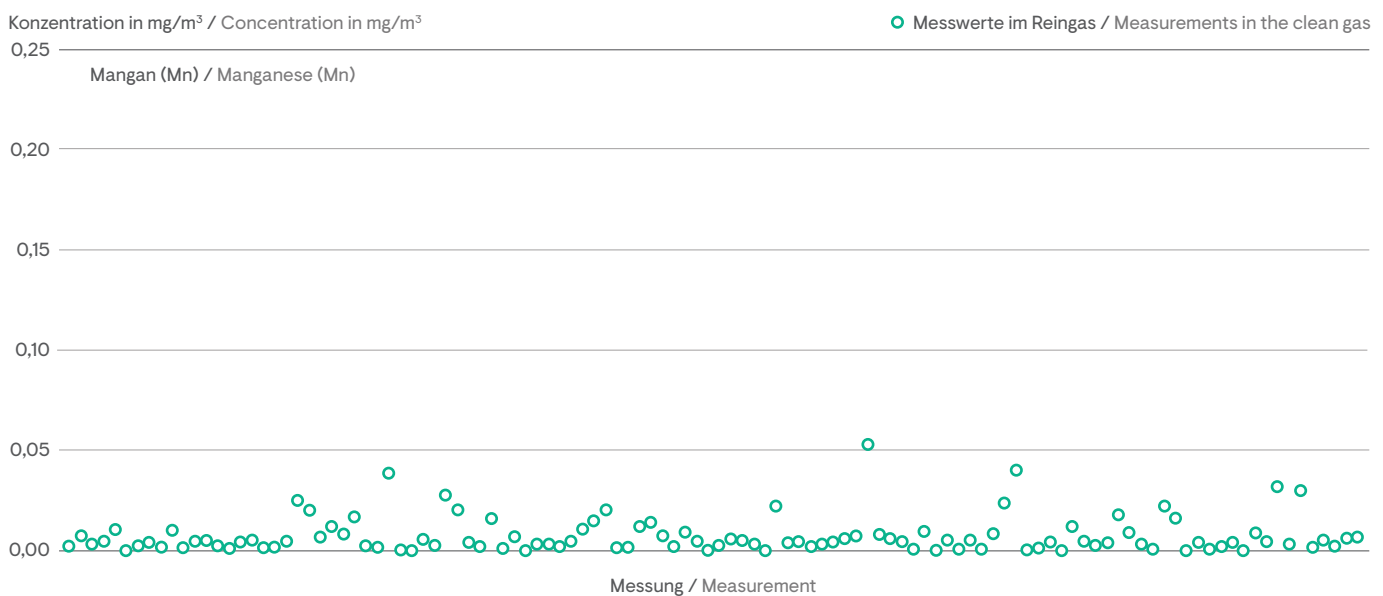
Figure 5-26 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**5.16.10 Mangan (Mn)**

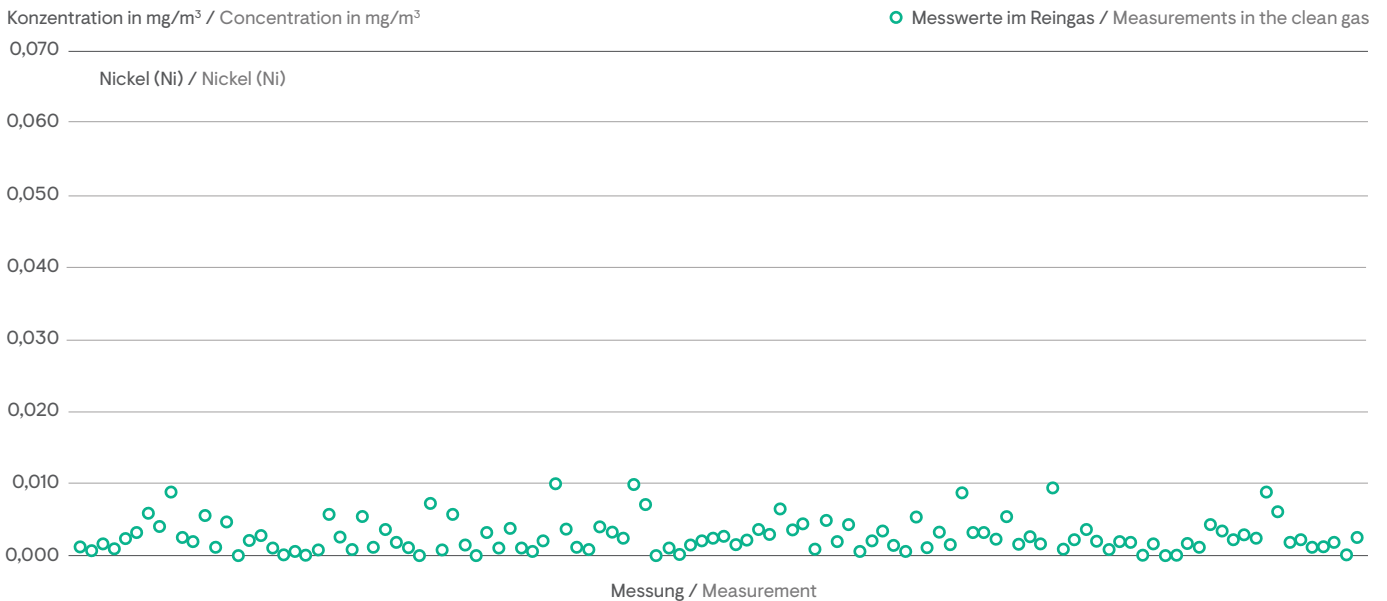
In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-27).

**5.16.10 Manganese (Mn)**

Figure 5-27 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**Bild 5-27 Mangan (Mn, Messwerte 2022)****Fig. 5-27 Manganese (Mn, measurements 2022)**

**Bild 5-28 Nickel (Ni, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-28 Nickel (Ni, measurements 2022)**



#### 5.16.11 Nickel (Ni)

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-28).

#### 5.16.11 Nickel (Ni)

Figure 5-28 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

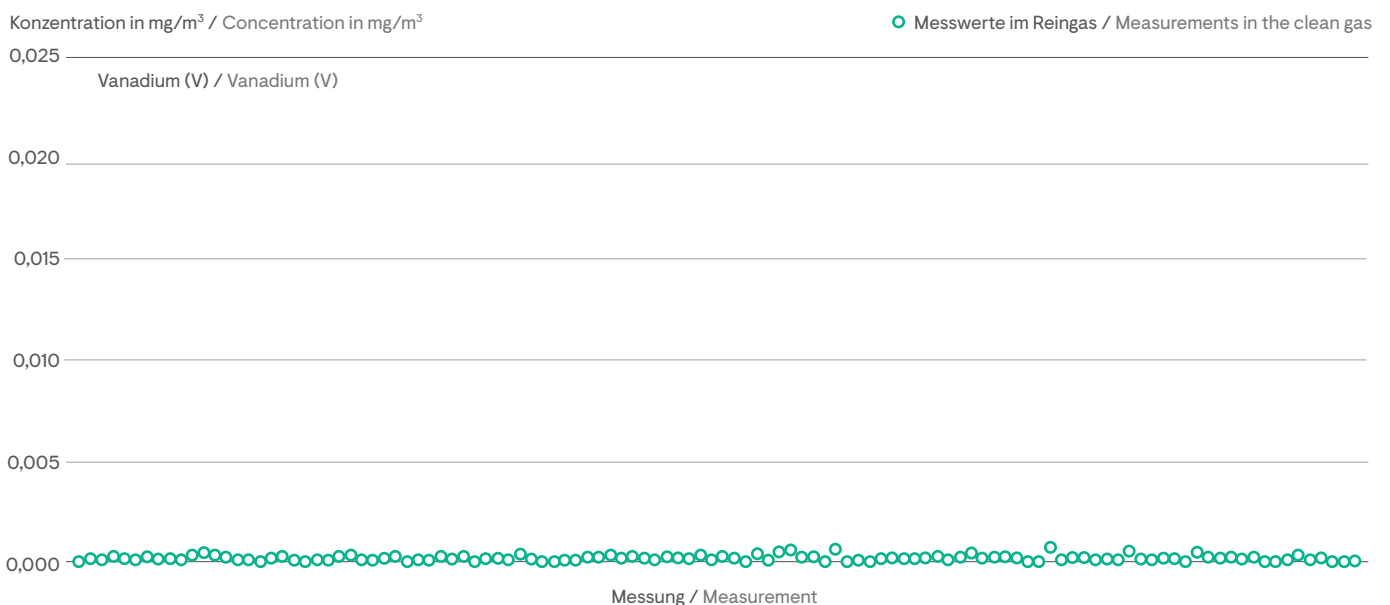
#### 5.16.12 Vanadium (V)

In 2022 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-29).

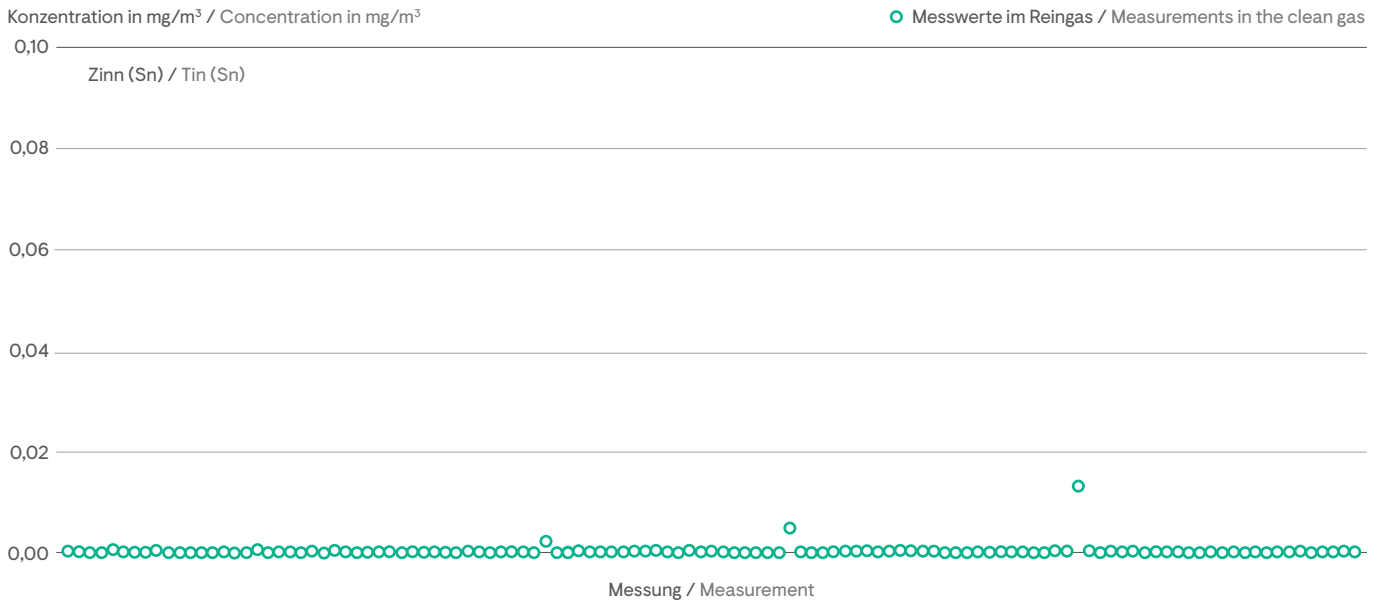
#### 5.16.12 Vanadium (V)

Figure 5-29 shows 117 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

**Bild 5-29 Vanadium (V, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-29 Vanadium (V, measurements 2022)**



**Bild 5-30 Zinn (Sn, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-30 Tin (Sn, measurements 2022)**



#### 5.16.13 Zinn (Sn)

In 2022 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-30).

#### 5.16.13 Tin (Sn)

Figure 5-30 shows 120 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

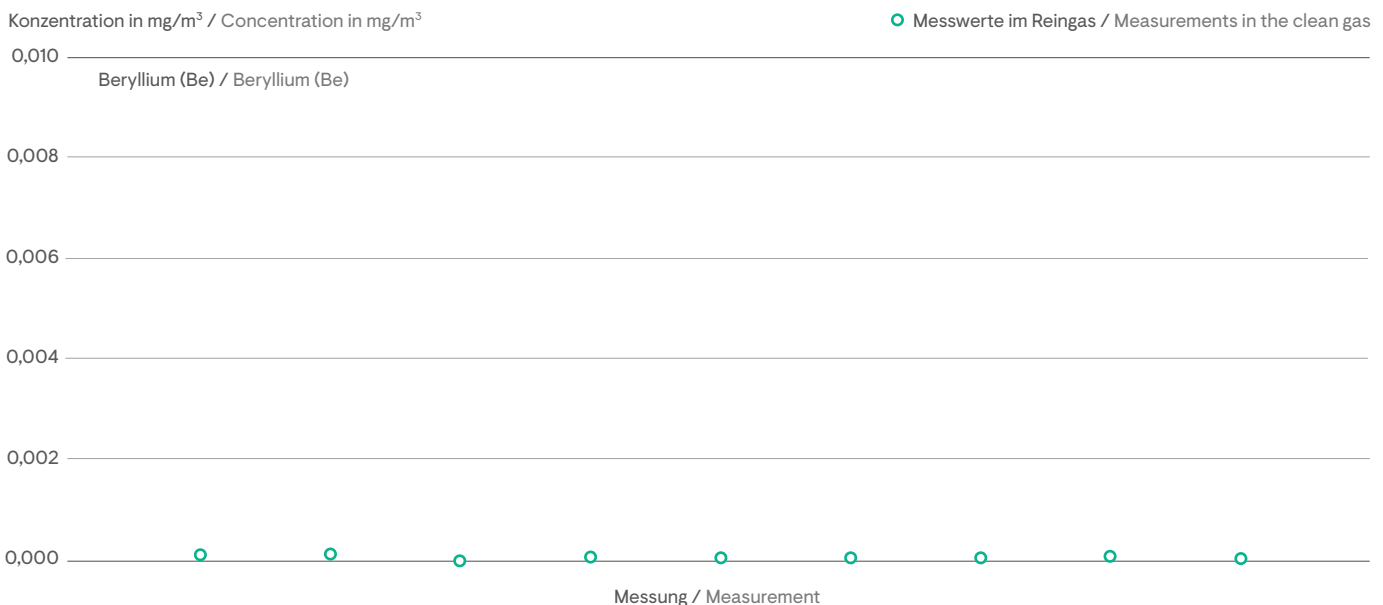
#### 5.16.14 Beryllium (Be)

In 2022 wurden neun Werte aus Messungen im Reingas von drei Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-31).

#### 5.16.14 Beryllium (Be)

Figure 5-31 shows nine values from measurements in the clean gas at three rotary kilns.

**Bild 5-31 Beryllium (Be, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-31 Beryllium (Be, measurements 2022)**



**Bild 5-32 Selen (Se, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-32 Selenium (Se, measurements 2022)**



#### 5.16.15 Selen (Se)

In 2022 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-32).

#### 5.16.15 Selenium (Se)

Figure 5-32 shows three values from measurements in the clean gas at one rotary kiln.

#### 5.16.16 Tellur (Te)

In 2022 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-33).

#### 5.16.16 Tellurium (Te)

Figure 5-33 shows three values from measurements in the clean gas at one rotary kiln.

**Bild 5-33 Tellur (Te, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-33 Tellurium (Te, measurements 2022)**



**Bild 5-34 Zink (Zn, Messwerte 2022)**  
**Fig. 5-34 Zinc (Zn, measurements 2022)**



#### 5.16.17 Zink (Zn)

In 2022 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-34).

#### 5.16.17 Zinc (Zn)

Figure 5-34 shows three values from clean gas measurements at one rotary kiln.



## Literatur

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien, 2020
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton - Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022
- [3] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2023, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [4] Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [5] Klein, H.; Hoenig, V.: Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [6] 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
- [7] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 1; Cement International 3/2013
- [8] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 2, Cement International 4/2013

## Ergänzende Literatur

- Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (1998 - 2021), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie - Analyse des Status quo und Perspektiven, Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie, Berlin; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal.
- Richtlinie VDI 2094:2019-07 (Entwurf). 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
- R. Harraß, S. Schäfer, V. Hoenig: Quecksilber in der deutschen Zementindustrie – eine Bilanz; Cement International 6/2018

## Literature

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, ed., Decarbonising Cement and Concrete: A CO<sub>2</sub> Roadmap for the German cement industry, Dusseldorf, 2020
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, ed., Resources of the future for cement and concrete - Potential and action strategies, Dusseldorf, 2022
- [3] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2023, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dusseldorf
- [4] Verminderung der CO<sub>2</sub> Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dusseldorf
- [5] Klein, H.; Hoenig, V.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [6] 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
- [7] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 1; Cement International 3/2013
- [8] 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 - 2021), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dusseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dusseldorf
- Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie - Analyse des Status quo und Perspektiven, Initiative for Sustainability in the German Cement Industry, Berlin; Wuppertal Institute for Climate, Environment, Energy, Wuppertal.
- VDI-Guideline 2094:2019-07 (draft). 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
- R. Harraß, S. Schäfer, V. Hoenig: Mercury in the German cement industry – a balance; Cement International 6/2018



## Impressum / Imprint

Copyright/Herausgeber:

Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
Postfach 30 10 63, 40410 Düsseldorf  
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf  
T +49(0)2 11 45 78 0  
F +49(0)2 11 45 78 296  
vdz@vdz-online.de  
www.vdz-online.de

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichung und  
Gesamtproduktion:  
Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Redaktionsschluss: Juli 2023

Zitierung:  
Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg.  
Umweltdaten der deutschen  
Zementindustrie 2022;  
Düsseldorf, 2023

Copyright/Publisher:

Verein Deutscher Zementwerke e.V.  
P.O. Box 30 10 63, 40410 Duesseldorf  
Toulouser Allee 71, 40476 Duesseldorf  
T +49(0)2 11 45 78 0  
F +49(0)2 11 45 78 296  
vdz@vdz-online.de  
www.vdz-online.de

All rights reserved

Overall production:  
Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Press deadline : July 2023

Quotation:  
Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Ed.)  
Environmental data of the  
German cement industry 2022;  
Duesseldorf, 2023

Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf

Kochstraße 6-7  
10969 Berlin

[www.vdz-online.de](http://www.vdz-online.de)