

Bewährtes neu denken

vdz

**Umweltdaten der
deutschen
Zementindustrie
Environmental
Data of the German
Cement Industry
2023**

Inhalt / Contents

	Vorwort / Foreword	5
1	Zementherstellung / Cement manufacture	7
2	Produktions- und Strukturdaten / Production and structural data	11
3	Einsatzstoffe / Input materials	15
	3.1 Rohstoffe / Raw materials	16
	3.2 Brennstoffe / Fuels	17
4	Energie / Energy	19
5	Emissionen / Emissions	23
	5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid / Greenhouse gases / Carbon dioxide (CO ₂)	25
	5.2 Staub / Dust	26
	5.3 Stickstoffoxide / Nitrogen oxides (NO _x)	26
	5.4 Ammoniak / Ammonia (NH ₃)	28
	5.5 Schwefeldioxid / Sulphur dioxide (SO ₂)	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 ₆ H ₆)	34
	5.12 Formaldehyd / Formaldehyde (CH ₂ O)	35
	5.13 Benzo(a)pyren / Benzo(a)pyren (C ₂₀ H ₁₂)	35
	5.14 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)	36
	5.15 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds (HF)	36
	5.16 Spurenelemente / Trace elements	37
	5.16.1 Cadmium / Cadmium (Cd)	39
	5.16.2 Thallium / Thallium (Tl)	39
	5.16.3 Quecksilber / Mercury (Hg)	40
	5.16.4 Antimon / Antimony (Sb)	40
	5.16.5 Arsen / Arsenic (As)	41
	5.16.6 Blei / Lead (Pb)	41
	5.16.7 Chrom / Chromium (Cr)	42
	5.16.8 Cobalt / Cobalt (Co)	42
	5.16.9 Kupfer / Copper (Cu)	43
	5.16.10 Mangan / Manganese (Mn)	43
	5.16.11 Nickel / Nickel (Ni)	44
	5.16.12 Vanadium / Vanadium (V)	44
	5.16.13 Zinn / Tin (Sn)	45
	5.16.14 Beryllium / Beryllium	45
	5.16.15 Selen / Selenium (Se)	46
	5.16.16 Tellur / Tellurium (Te)	46
	5.16.17 Zink / Zinc (Zn)	47
	Literatur / Literature	48
	Impressum / Imprint	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 Energiebedarf als auch zu den derzeitigen Emissionen der deutschen Zementhersteller. Hierbei werden die Emissionen von Staub, Staubinhaltsstoffen als auch die anorganischen und organischen Abgasbestandteile dargestellt. 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 angesichts des Reduktionspfads im EU-Emissionshandel bis 2040 weitestgehend umgesetzt werden soll [1, 2]. Seit 1990 ist es den deutschen Zementherstellern gelungen, die CO₂-Emissionen pro Tonne Zement in einer Größenordnung von 25 % zu reduzieren. Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: (1) die Senkung der Klinkergehalte im Zement von 83 % in 1990 auf 69 % heute sowie (2) der verstärkte Einsatz alternativer, teils biomassehaltiger Brennstoffe, deren Anteil bei aktuell etwa 74 % liegt (davon ein Drittel Biomasse). Neben der weiteren Absenkung des Klinkerfaktors, einem nahezu kompletten Verzicht auf fossile Brennstoffe sowie Innovationen in der Betonherstellung wie auch im Betonbau kann eine vollständige Dekarbonisierung des Sektors nur mit der CO₂-Abscheidung im Zementwerk und der anschließenden Nutzung und Speicherung (CCUS) gelingen. Hier gibt es bereits zahlreiche Pilotvorhaben, die vor allem auf die Nutzung des Treibhausgases abstellen. Allerdings zeigt sich, dass die entsprechenden Genehmigungsverfahren zunehmend zum zeitlichen Engpass werden. Hier wäre es wünschenswert, dass wichtige Fragen bundeseinheitlich geklärt werden und länderübergreifende, pragmatische Lösungen erarbeitet werden.

Dies gilt nicht nur für die Abscheideanlagen an sich, sondern auch für den Ausbau der erneuerbaren Energien sowie den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur. Für die stromintensive Abscheidung des Treibhausgases sind diese Voraussetzungen essenziell. Die neue VDZ-Studie „Anforderungen an eine CO₂-Infrastruktur in Deutschland – Voraussetzungen für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung“ stellt anhand des künftigen Transportbedarfs dar, wie eine CO₂-Infrastruktur ausgestaltet werden sollte [2]. Aus der Analyse wird deutlich, dass mittel- und langfristig der Großteil des CO₂-Transports per Pipeline erfolgen muss. Zum Teil werden aber auch der Zug und ggf. das Schiff eine bedeutende Rolle spielen. Eine weitere Notwendigkeit besteht im Angebot an CO₂-Speichern. Im europäischen Ausland werden derzeit zahlreiche Projekte geplant, sodass ab den 2030er-Jahren mit signifikanten Kapazitäten zu rechnen ist. Auch Deutschland ist gefragt, zum Aufbau einer europäischen Speicherinfrastruktur beizutragen. Die gesetzlichen Voraussetzungen für den Pipe-

Dear readers,

in keeping with our established tradition, this year's new edition of 'Environmental data of the German cement industry' provides a comprehensive overview of both the raw material and energy requirements and the current emissions of German cement manufacturers. The emissions of dust, dust constituents as well as inorganic and organic waste gas components are presented. Our environmental data also includes carbon dioxide emissions, the reduction of which is a particular focus in terms of the decarbonisation of cement production.

A climate-neutral cement production process – this is the industry's goal, which is to be realised as far as possible by 2040 in view of the reduction path in EU emissions trading [1, 2]. Since 1990, German cement manufacturers have succeeded in reducing CO₂ emissions per tonne of cement by around 25%. In addition to improvements in thermal efficiency, two factors in particular have been decisive for this reduction success: (1) the reduction of the clinker content in cement from 83 % in 1990 to 69 % today and (2) the increased use of alternative fuels which currently accounts for around 74 % (one third of which is biomass). In addition to a further reduction in the clinker factor, an almost complete renunciation of fossil fuels and innovations in concrete production and construction, complete decarbonisation of the sector can only be achieved with CO₂ capture in the cement plant and subsequent use and storage (CCUS). There are already numerous pilot projects in this area, which focus primarily on the utilisation of the greenhouse gas. However, it is becoming apparent that the corresponding authorisation procedures are increasingly becoming a time bottleneck. It would be desirable for important issues to be clarified at a national level and for pragmatic, cross-state solutions to be developed.

This applies not only to the capture plants themselves, but also to the expansion of renewable energies and the development of a CO₂ infrastructure. These prerequisites are essential for the electricity-intensive capture of greenhouse gases. The new VDZ study 'Requirements for a CO₂ infrastructure in Germany – Achieving climate neutrality in the cement, lime and waste incineration sectors' shows how a CO₂ infrastructure should be designed based on future transport requirements [2]. The analysis clearly shows that in the medium and long term, the majority of CO₂ transport will have to be by pipeline. However, trains and possibly ships will also play an important role in some cases. Another necessity is the supply of CO₂ storage facilities. Numerous projects are currently being planned in other European countries, meaning that significant capacities can be expected from the 2030s. Germany is also called upon to contribute to the development of a European storage infrastructure. The legal requirements for pipeline transport and off-shore storage are currently being prepared. In order to ultimately achieve the climate targets, the approximately 4,800 km long pipeline network must be realised by 2035 at the latest.

linetransport und die Offshore-Speicherung werden derzeit vorbereitet. Um letztlich die Klimaziele zu erreichen, muss das etwa 4.800 km lange Pipelinenetz bis spätestens 2035 realisiert werden.

Teils eng verzahnt mit der Dekarbonisierung ist die Schonung natürlicher Ressourcen bei der Herstellung von Zement und Beton, die bereits heute geübte Praxis ist. So wurde der Rohstoffbedarf für die Herstellung von Klinker und Zement in 2023 zu etwa 18 % durch industrielle Nebenprodukte, wie Hütten sand und Flugasche gedeckt. In einer 2022 veröffentlichten Studie [3] hat der VDZ weitere Potenziale ermittelt. Neben ressourceneffizienterem Bauen wird der Schlüssel zur Einsparung von Primärressourcen bei der Zement- und Betonherstellung in der Mobilisierung von Beton- und Mauerwerksfraktionen aus dem Rückbau von Gebäuden und Infrastrukturen liegen. Als Brechsand 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 2020 bis 2022 hat die deutsche Zementindustrie mehr als 600 Mio. Euro in ihren Maschinenpark investiert, was rund 6 % des in diesem Zeitraum erwirtschafteten Branchenumsatzes entspricht. Nicht zuletzt zeigt dies, 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.

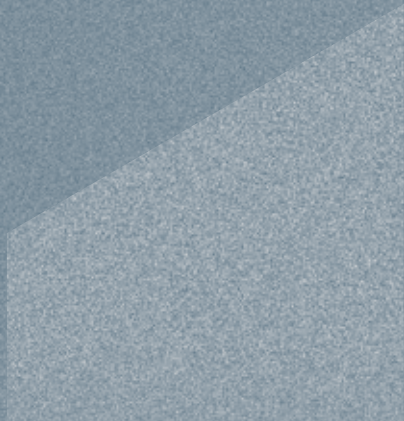
Düsseldorf, im September 2024

Partly closely linked to decarbonisation is the conservation of natural resources in the production of cement and concrete, which is already common practice today. For example, around 18% of the raw material requirements for the production of clinker and cement in 2023 were covered by industrial by-products such as granulated blast furnace slag and fly ash. In a study published in 2022 [3], the VDZ identified further potential. In addition to more resource-efficient construction, the key to saving primary resources in cement and concrete production will lie in the mobilisation of concrete and masonry fractions from the demolition of buildings and infrastructure. As crushed sand and recycled aggregates, they can be channelled back into clinker, cement and concrete production. Nevertheless, even after the ambitious potential has been utilised, the majority of raw material requirements in 2050 will have to be covered by natural raw materials. In addition to the creation of green lead markets for resource-saving cements and concretes and the promotion of urban mining, securing these raw materials will therefore remain another key area of action that represents an existential basis for cement and concrete production.

Enormous investments are needed to meet the various requirements of climate and resource protection as well as air pollution control. In the years 2020 to 2022 alone, the German cement industry invested more than 600 million euros in its machinery, which corresponds to around 6% of the industry's turnover generated in this period. Last but not least, this shows that German cement manufacturers are facing up to the numerous environmental challenges. They will continue their efforts and investments in the future in order to make cement production future-proof and sustainable.

Düsseldorf, September 2024

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), Sili- ciumdioxid (SiO₂), Aluminiumoxid (Tonerde, Al₂O₃) und Eisen- oxid (Fe₂O₃) enthält. Kalkstein, Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, liefern diese chemischen Bestandteile. Kalkstein und Kreide bestehen

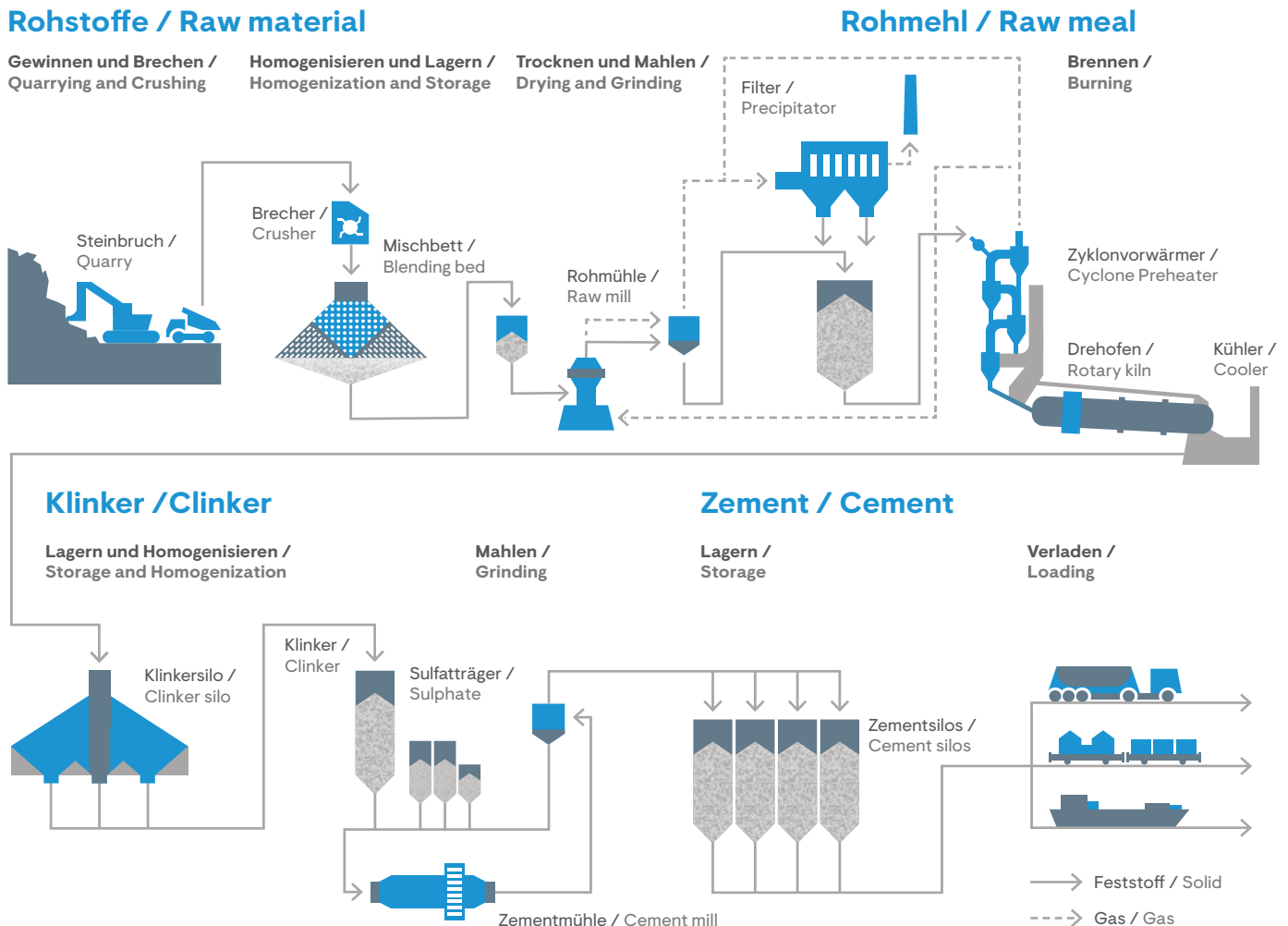
1 Cement manufacture

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 (SiO₂), aluminium oxide (alumina, Al₂O₃), and iron oxide (Fe₂O₃). These chemical constituents are supplied by limestone, chalk and clay or their natural blend, lime marl. Limestone and chalk are composed of calcium 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 (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 (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 2024
Fig. 1-2 Cement works in the Federal Republic of Germany in the year 2024



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.

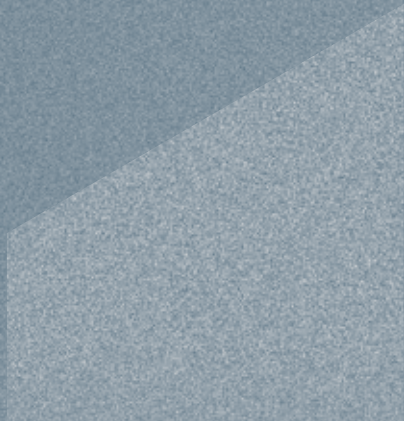
dium and potassium. The iron oxide required for melt formation is either contained in the clay minerals in the form of ferrous hydroxide or it is added in the form of iron ore. For the cement to conform to the quality requirements stipulated, a precisely defined raw material composition must be complied 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 2023 produzierten 21 Unternehmen in 53 Werken etwa 28,2 Mio. Tonnen Zement [4] (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. 55% sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 21% 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 **Production, deliveries, export and import**

Jahr / Year	Produktion / Production		Zementversand / Cement deliveries			
	Klinker / Clinker	Zement / Cement	Zementversand Inland ¹⁾ / 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
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	27.268	6.211	33.479	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	23.193	32.901	27.019	6.250	33.269	1.020
2023 ²⁾	19.914	28.185	22.524	5.082	27.606	711

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

²⁾ 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 2023, 21 companies with their 53 plants produced about 28.2 million t of cement in Germany [4] (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 (55% of domestic cement deliveries) and the manufacturers of concrete elements (21% 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: 01.01.2022 / As of 1st Jan 2022			Stand: 01.01.2023 / As of 1st Jan 2023			Stand: 01.01.2024 / As of 1st Jan 2024		
	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	97,4	36	99.060	97,4
Ofen mit Rostvorwärmer / Kilns with grate preheaters	2	2.600	2,5	2	2.600	2,6	2	2.600	2,6
Schachtofen / Shaft kilns	8	1.200	1,2	0	0	0,0	0	0	0,0
Summe / Total	46	102.860	100	38	101.660	100	38	101.660	100
mittlere Ofenkapazität in t/d / Average kiln capacity in t/d									
	Drehöfen / Rotary kilns	2.675		2.675			2.675		
	Schachtofen / Shaft kilns	150		0			0		

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. ^{3)/ Others}	Gesamt/ Total
	I	II ²⁾	II/S + II/P ²⁾	II/T + II/LL + II/M	III			
	1.000 t							
2005	13.226	8.055	3.740	4.315	3.621	193	25.095	
2006	11.189	10.628	5.202	5.426	4.764	262	26.843	
2007	8.932	11.299	5.259	6.040	4.883	285	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 ¹⁾	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 ¹⁾	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 ¹⁾	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 ¹⁾	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	
2023 ¹⁾	4.518	10.730	2.838	7.892	5.326	289	20.863	

Anmerkung/Note:

CEM I = Portlandzement; CEM II/S = Portlandhüttenzement; CEM II/P = Portlandpuzzolanement; CEM II/V = Portlandflugaschezement;

CEM II/T = Portlandschieferzement; CEM II/LL = Portlandkalksteinement; CEM II/M = Portlandkompositement; CEM III = Hochofenzement;

CEM IV = Puzzolanement; CEM V = Kompositement; Sonstige = sonstige bauaufsichtlich zugelassene Zemente, Boden- und Tragschichtbinder (Festigkeit $\geq 32,5$ N/mm²), Klinkermehl

CEM I = Portland cement; CEM II/S = Portland-slag cement; CEM II/P = Portland pozzolana cement; CEM II/V = Portland-fly ash cement;

CEM II/T = Portland-burnt shale cement; CEM II/LL = Portland-limestone cement; CEM II/M = Portland-composite cement; CEM III = blastfurnace cement;

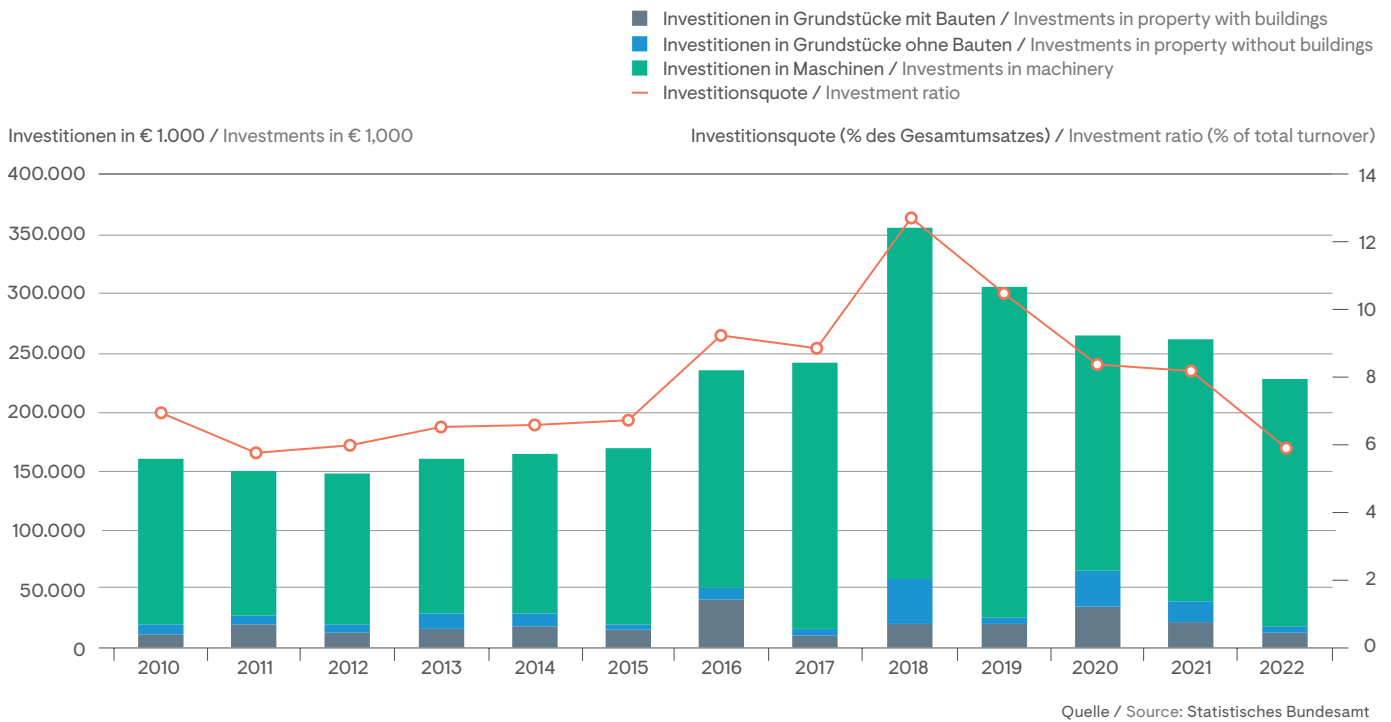
CEM IV = pozzolana cement; CEM V = composite cement; Other = other cements approved by the building supervisory authorities, road binders (strength ≥ 32.5 N/mm²), clinker meal¹⁾ Änderung des Berichtskreises. / Reporting different from that of the previous year.²⁾ Ab 2019 ohne CEM II/V-Zemente und in 2023 ohne CEM II/P-Zemente, die aus Gründen der Geheimhaltung in der Spalte IV+V+Sonst. enthalten sind. /

From 2019 without CEM II/V cements and in 2023 without CEM II/P cements, which are included in column IV+V+other for reasons of confidentiality.

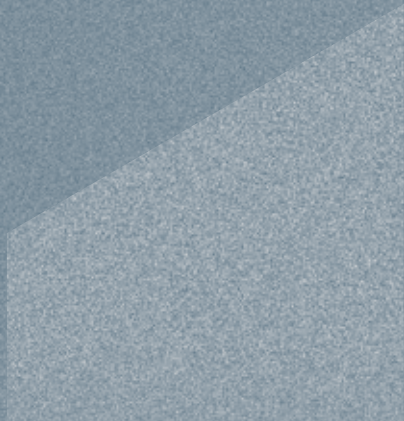
³⁾ Ab 2019 inklusive CEM II/V-Zemente. In 2023 inkl. CEM II/P-Zemente. / From 2019 incl. CEM II/V cements. In 2023 incl. CEM II/P cements.

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 2023 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 2023
Table 3-1 Raw materials input in 2023

Gruppe / Group	Rohstoff / Raw material	Einsatz / Input quantity 1.000 t/a
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide / Limestone / Marl / Chalk	31.710
	Sonstige, wie: / Others, such as: - Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasser- aufbereitung / Lime sludge from drinking water and sewage treatment - Kalkhydrat / Hydrated lime - Porenbetongranulat / Foam concrete granulates - Calciumfluorid / Calcium fluoride	89
Si	Sand / Sand	865
	Gießereialsand / Used foundry sand	219
Si-Al	Ton / Clay	997
	Bentonit / Kaolinit / Bentonite / Kaolinite	29
Fe	Eisenerz / Iron ore	119
	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	175
Si-Al-Ca	Hüttensand / Granulated blastfurnace slag	7.134
	Flugasche / Fly ash	268
	Ölschiefer / Oil shale	121
	Trass / Trass	34
	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	45
S	Natürlicher Gips / Natural gypsum	814
	Natürlicher Anhydrit / Natural anhydrite	519
	Synthetischer Anhydrit / Synthetic anhydrite	6
	Gips aus der Rauchgasentschwefelung / Gypsum from flue gas desulphurisation	167
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	49

Quellen / Sources: VDZ, Fachverband Eisenhüttenschlacken
Anmerkung / Note: teilweise geschätzt / partly estimated

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 73,4 % im Jahr 2023. 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 2023. 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		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Steinkohle / Coal	Mio. GJ/a / million GJ/a	8,9	8,1	8,3	8,2	7,9	7,3	6,6	7,1	4,3	2,7
	Anteil % / share %	9,6	9,0	9,1	8,4	8,2	7,6	6,8	7,3	4,7	3,4
Braunkohle / Lignite	Mio. GJ/a / million GJ/a	19,5	18,7	18,9	20,5	19,2	18,1	19,0	18,9	18,8	15,5
	Anteil % / share %	21,1	20,8	20,8	21,2	20,0	18,9	19,8	19,4	20,5	19,5
Petrolkoks / Petcoke	Mio. GJ/a / million GJ/a	4,1	3,4	3,2	3,5	2,7	2,4	2,1	2,1	1,3	1,0
	Anteil % / share %	4,4	3,7	3,6	3,7	2,8	2,5	2,2	2,1	1,4	1,3
Heizöl S / Heavy fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,2	0,3	0,6	0,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
	Anteil % / share %	0,2	0,4	0,6	0,5	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
Heizöl EL / Fuel oil	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Anteil % / share %	0,8	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
Erdgas und andere Gase / Natural gas and other gases	Mio. GJ/a / million GJ/a	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,6	0,7
	Anteil % / share %	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,9	0,7	0,9
Sonstige fossile Brennstoffe / Other fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	0,4	0,3	0,2	0,4
	Anteil % / share %	< 0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	0,4	0,3	0,3	0,5
Fossile Brennstoffe gesamt / Total fossil fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	33,9	31,9	32,1	33,9	31,2	29,9	29,6	30,1	26,0	21,1
	Anteil % / share %	36,6	35,4	35,2	35,0	32,5	31,1	30,8	30,8	28,4	26,6
Alternative Brennstoffe gesamt / Total alternative fuels	Mio. GJ/a / million GJ/a	58,6	58,2	59,1	63,0	64,8	66,1	66,4	67,6	65,5	58,2
	Anteil % / share %	63,4	64,6	64,8	65,0	67,5	68,9	69,2	69,3	71,6	73,4
Thermische Energie gesamt / Total thermal energy consumption	Mio. GJ/a / million GJ/a	92,5	90,1	91,2	96,9	96,0	96,0	96,0	97,7	91,5	79,3
	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 2023
Table 3-3 Used quantity and average calorific value of alternative fuels in 2023

Alternative Brennstoffe / Alternative fuel	1.000 t/a	MJ/kg
Altreifen / Waste tyres	109	28
Altöl / Waste oil	41	30
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbe- abfällen / Fractions of industrial and commercial waste:		
- Zellstoff, Papier und Pappe / Pulp, paper and cardboard	60	6
- Kunststoff / Plastics	828	21
- Verpackungen / Packaging	-	-
- Abfälle aus der Textilindustrie / Wastes from the textile industry	-	-
- Sonstige / Others	847	22
Tiermehle und -fette / Meat and bone meal and animal fat	134	18
Aufbereitete Fraktionen aus Sied- lungsabfällen / Mixed fractions of municipal waste		
Altholz / Waste wood	8	14
Lösungsmittel / Solvents	104	23
Bleicherde / Fuller's earth	-	-
Klärschlamm / Sewage sludge	575	3
Sonstige, wie: / Others, such as:		
- Ölschlamm / Oil sludge		
- Organische Destillations- rückstände / Organic distillation residues	138	4

Quelle / Source: VDZ

Anmerkung / Note: teilweise geschätzt / partly estimated

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].

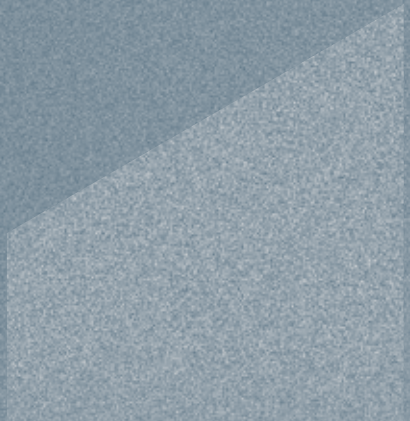
Natural gypsum and/or anhydrite cover almost 90 % of the demand for sulphate agents, which serve to adjust the working properties of the cements. Gypsum from flue gas desulphurisation and synthetic anhydrite accounts for the remaining share.

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 73.4 % of the total fuel energy demand of the German cement industry in 2023. 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 2023 durchschnittlich 2.807 MJ Brennstoffenergie und 115,4 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 26 % 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
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
2023	79,3	2.807

Quelle / Source: VDZ
Anmerkung / Note: teilweise geschätzt / partly estimated

4 Energy

In Germany, the production of one tonne of cement consumed an average of 2,807 MJ fuel energy and 115.4 kWh electrical energy in 2023 (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. 26 % 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.

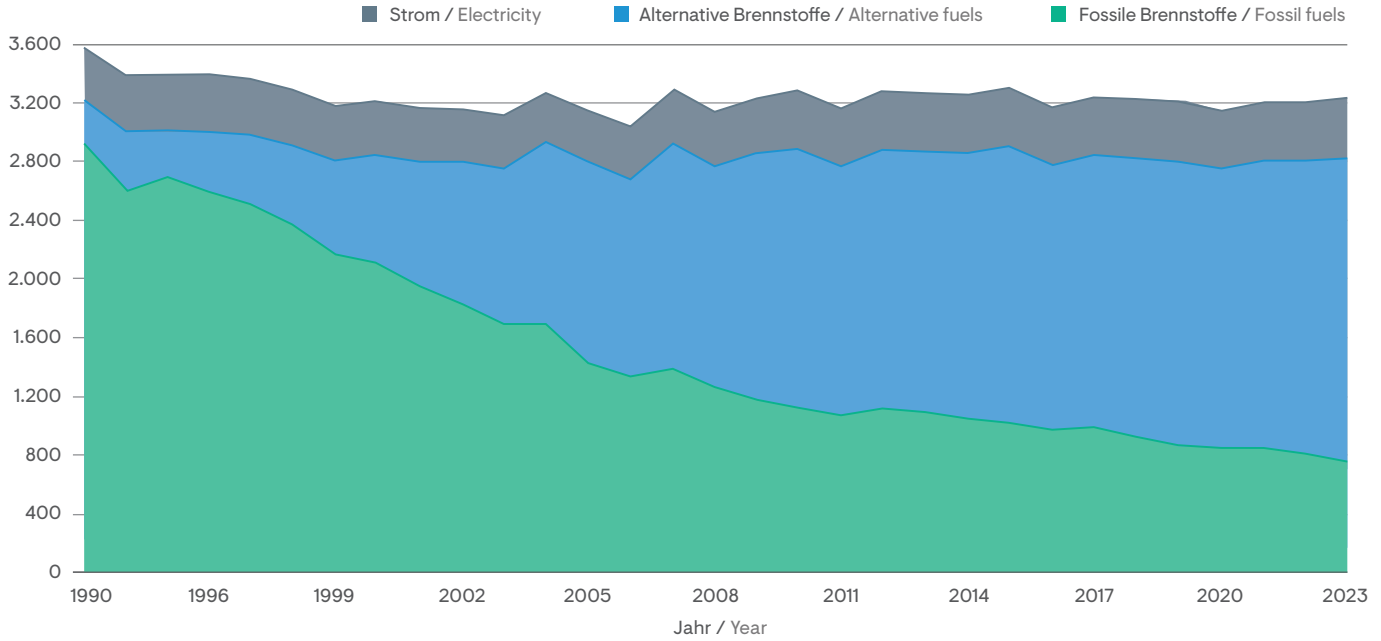
Tabelle 4-2 Elektrischer Energieeinsatz
Table 4-2 Electrical power consumption

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
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	3,71	113,1
2023	3,26	115,4

Quelle / Source: VDZ
Anmerkung / Note: teilweise geschätzt / partly estimated

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 consumption in kJ/kg cement

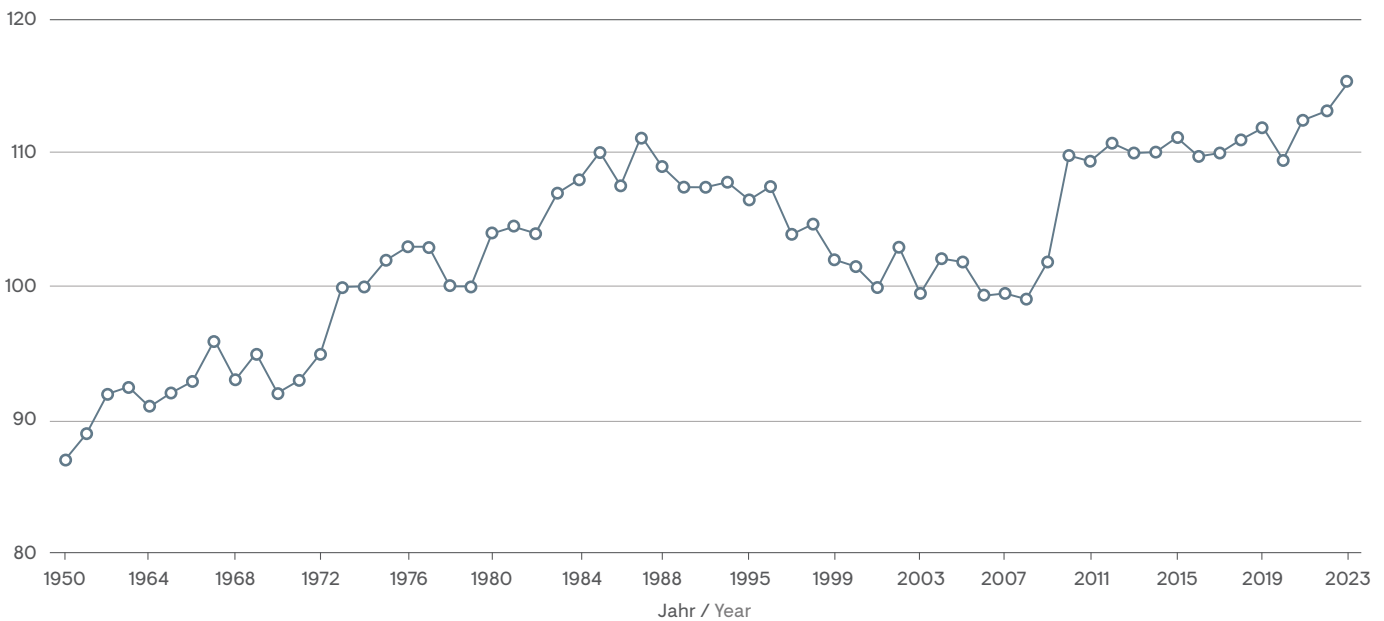


Quelle / Source: VDZ

Anmerkung / Note: in 2023 teilweise geschätzt / in 2023 partly estimated

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



Quelle / Source: VDZ

Anmerkung / Note: Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987 / New Federal States included since 1987;
 in 2023 teilweise geschätzt / in 2023 partly estimated

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 (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO), Quecksilber (Hg) und Ammoniak (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, NO_x , SO_2 , CO, Hg and 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.

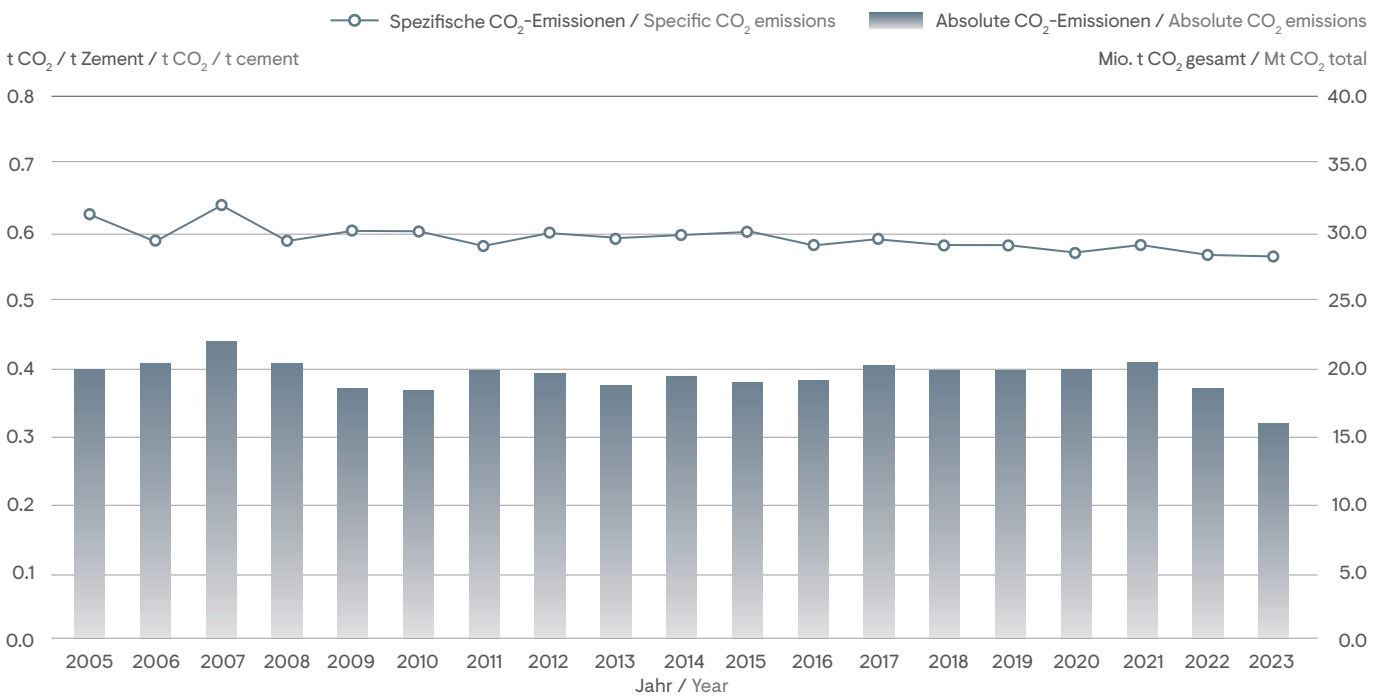
The measurement results presented in this chapter are based on the emission measurements at the rotary kiln plants of the German cement industry required by law. The emissions measured continuously were converted to annual averages. In the case of emissions measured discontinuously, the values are derived from the respective individual measurements. All measured values relate to 1 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 CO₂-Emissionen der Zementindustrie
Fig. 5-1 Direct CO₂ emissions by the cement industry



Quelle / Source: DEHSt

gegeben. Sämtliche Messwerte sind auf einen Kubikmeter (m³) 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 (CO₂)

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Dies ist fast ausschließlich CO₂. Andere klimarelevante Gase, wie z. B. Distickstoffmonoxid (N₂O) oder Methan (CH₄), werden nur in sehr geringem Maße emittiert. CO₂-Emissionen sind sowohl rohstoff- als auch energiebedingt. Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen entstehen bei der Entsäuerung des Kalksteins und haben einen Anteil von etwa 60 % an den direkten CO₂-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 CO₂-Emissionen dargestellt.

Am 01.01.2005 wurde in der EU ein Handelssystem für CO₂-Emissionen eingeführt. Der Emissionshandel erstreckt sich auf die direkten CO₂-Emissionen aus der Verbrennung aller Brennstoffe (ohne biogene Anteile) und der Entsäuerung des Kalksteins.

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.

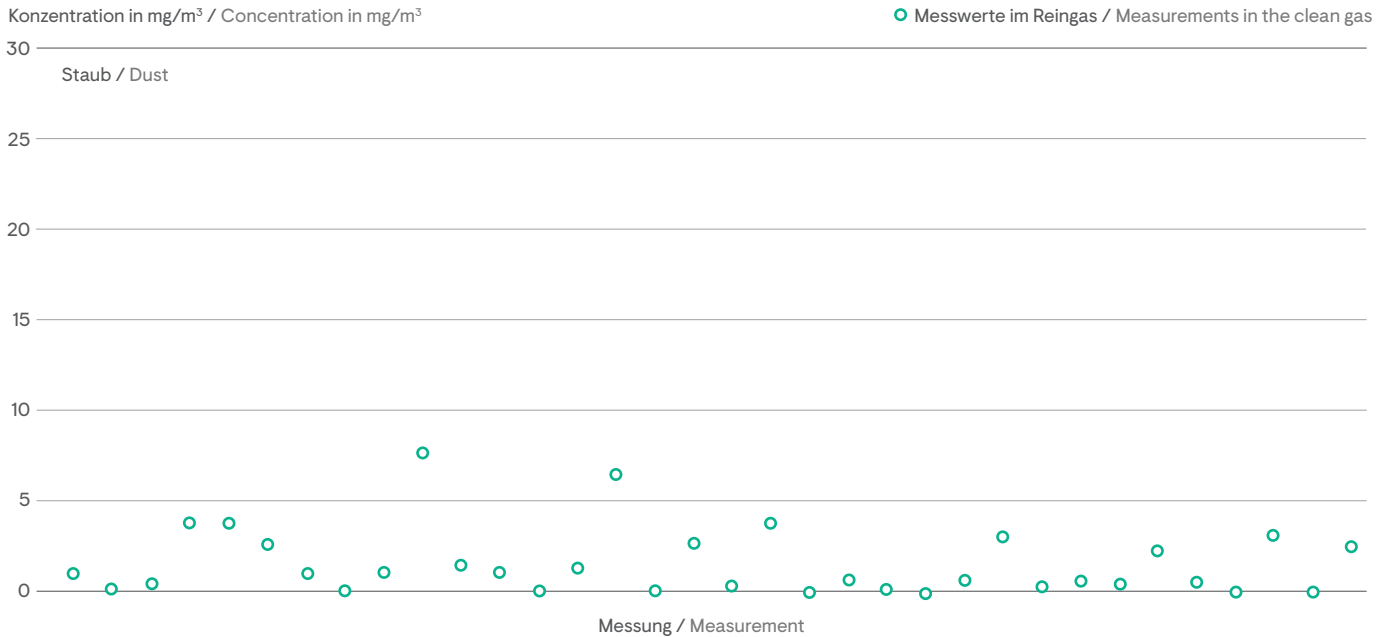
5.1 Greenhouse gases / carbon dioxide (CO₂)

During the clinker burning process greenhouse gases are emitted. This is almost entirely CO₂. Other greenhouse gases, such as dinitrogen monoxide (N₂O) or methane (CH₄), are emitted in very small quantities only.

CO₂ emissions are both raw material-related and energy-related. Raw material-related emissions are produced during limestone decarbonation (CaCO₃) and account for about 60 % of direct CO₂ 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 CO₂ emissions.

On January 1, 2005 a trading system for CO₂ emissions was introduced in the EU. Direct CO₂ emissions from the combustion of all fuels (without biogenous compounds) and decarbonation of limestone are covered by this trading system.

Bild 5-2 Staub (Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-2 Dust (Annual mean values 2023)



5.2 Staub

Für die Erzeugung von 1 Tonne Portlandzement müssen während der Produktion ca. 1,5 bis 1,7 Tonnen Rohmaterialien 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/m³ kam, sind diese heute in Deutschland auf 10 mg/m³ begrenzt. Bild 5-2 zeigt 34 Jahresmittelwerte der Konzentration von Staub aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

5.3 Stickstoffoxide (NO_x)

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

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

Primäre Minderungsmaßnahmen betreffen eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Darüber hinaus wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um auf verschiedene Weise die anspruchsvollen NO_x-Grenzwerte einhalten zu können. Im Jahr 2023 hatten in Deutschland 38

5.2 Dust

To manufacture 1 t of Portland cement, about 1.5 to 1.7 t raw materials and 0.95 t clinker must be ground to dust fineness during production. In this process, the steps of raw material preparatory processing, fuel preparation, clinker burning and cement grinding constitute major emission sources for particulate components. While particulate emissions of up to 3,000 mg/m³ were measured at the stack of cement rotary kiln plants as recently as in the 1950ies, these are limited in Germany to 10 mg/m³ today. Figure 5-2 shows 34 annual average values of dust concentrations from continuous monitoring in the clean gas of 34 rotary kilns.

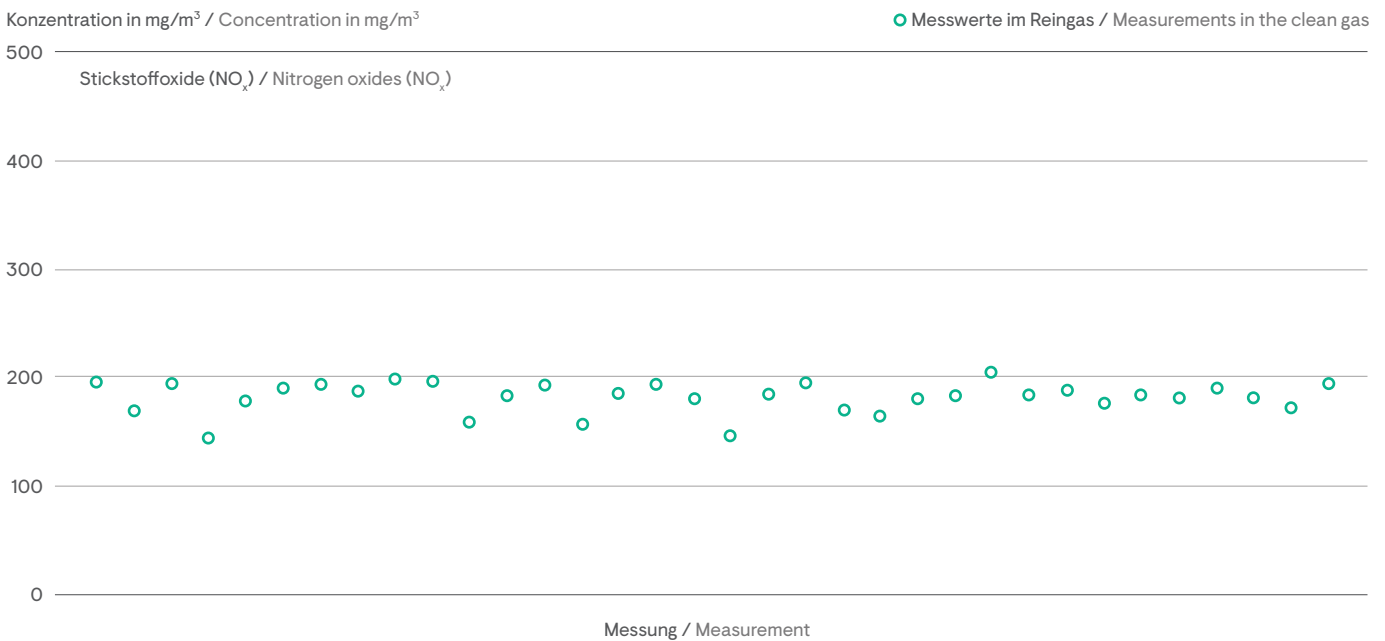
5.3 Nitrogen oxides (NO_x)

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

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

Primary reduction measures are aimed at smoothing and optimising plant operation. Furthermore, considerable efforts were made to achieve compliance with the demanding NO_x values in different ways. In 2023, 38 rotary kilns had an operating licence in Germany, of which 37 were in operation. At 22 of these plants the SCR process (selective catalytic reduction) is used for NO_x reduction. These include the

Bild 5-3 Stickstoffoxide (NO_x, Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-3 Nitrogen oxides (NO_x, annual mean values 2023)



Drehofenanlagen eine Betriebsgenehmigung, davon waren 37 in Betrieb. An 22 dieser Anlagen wird das SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion) zur NO_x-Minderung angewendet. Darunter sind die High-Dust- und Low-Dust-Variante des SCR-Verfahrens vertreten als auch an zwei Ofenanlagen das DeCONO_x-Verfahren und in einem Fall eine Lösung mit katalytischen Filterschläuchen.

In Deutschland sind 13 Voralcalinieranlagen in Betrieb, an denen eine gestufte Zweitfeuerung zur Minderung der NO_x-Emissionen betrieben wird bzw. werden kann. An 11 Voralcalinieranlagen 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_x-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.

high-dust and low-dust variants of the SCR process as well as the DeCONO_x process at two kiln plants and, in one case, a solution with catalytic filter bags.

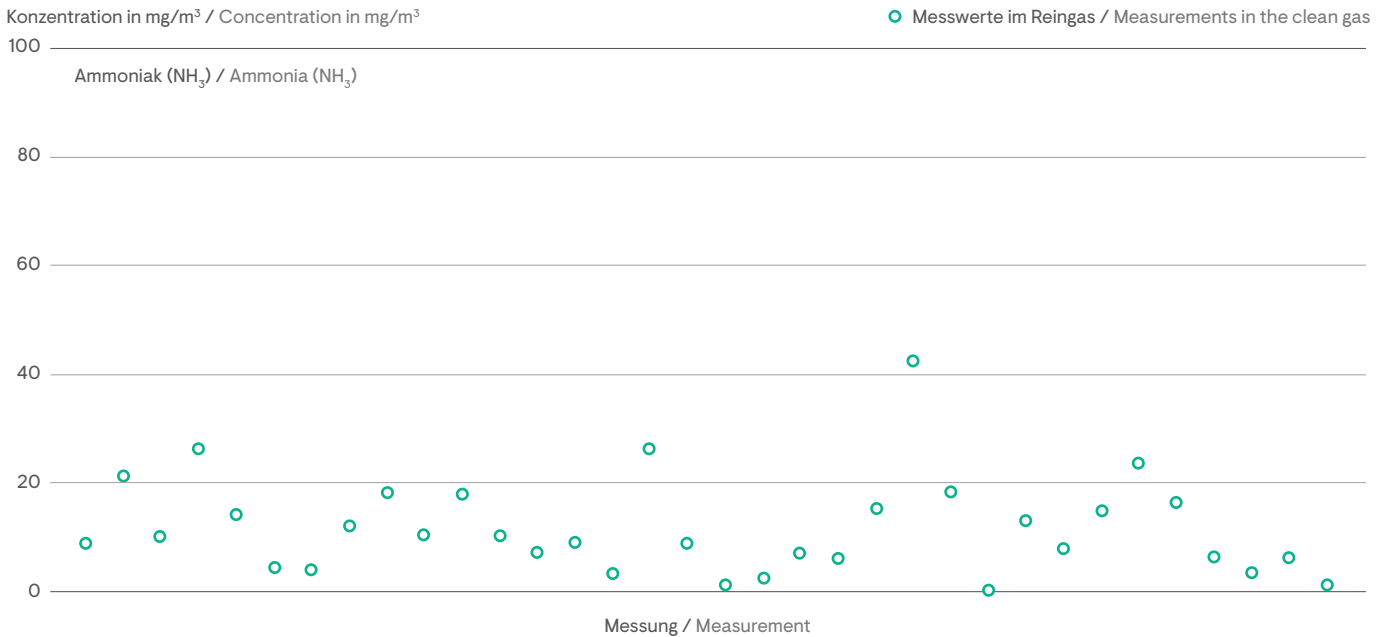
In Germany 13 precalcining plants are in operation at which a staged secondary firing system is or can be operated to reduce NO_x emissions. The SNCR process (selective non-catalytic reduction) is also used at 11 precalcining plants. The SCR process is used at two precalcining plants. Furnaces with SCR systems are additionally equipped with SNCR technology, which is used to reduce NO_x 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 (NH₃, Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-4 Ammonia (NH₃, annual mean values 2023)



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 34 Jahresmittelwerte der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO_x) aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

5.4 Ammoniak (NH₃)

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 NH₃-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_x-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_x-Minderung, eine Rolle, inwiefern NH₃ 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_x-Minderung in der High-Dust-Variante

Figure 5-3 shows 34 annual average values of nitrogen oxides (NO_x) concentrations from continuous monitoring in the clean gas of 34 rotary kilns.

5.4 Ammonia (NH₃)

Ammonia (NH₃) 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 NH₃ 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_x 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_x 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 NH₃ 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 34 annual average values of ammonia (NH₃) concentration from continuous monitoring in the clean gas of 34 rotary kilns.

(Installation des Katalysators nach Vorwärmer) kann NH_3 , das den Vorwärmer mit dem Rohgas verlässt, als Reduktionsmittel genutzt und somit die Eindüsung von Ammoniaklösung reduziert werden.

Bild 5.4 zeigt 34 Jahresmittelwerte der Konzentration von Ammoniak (NH_3) aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

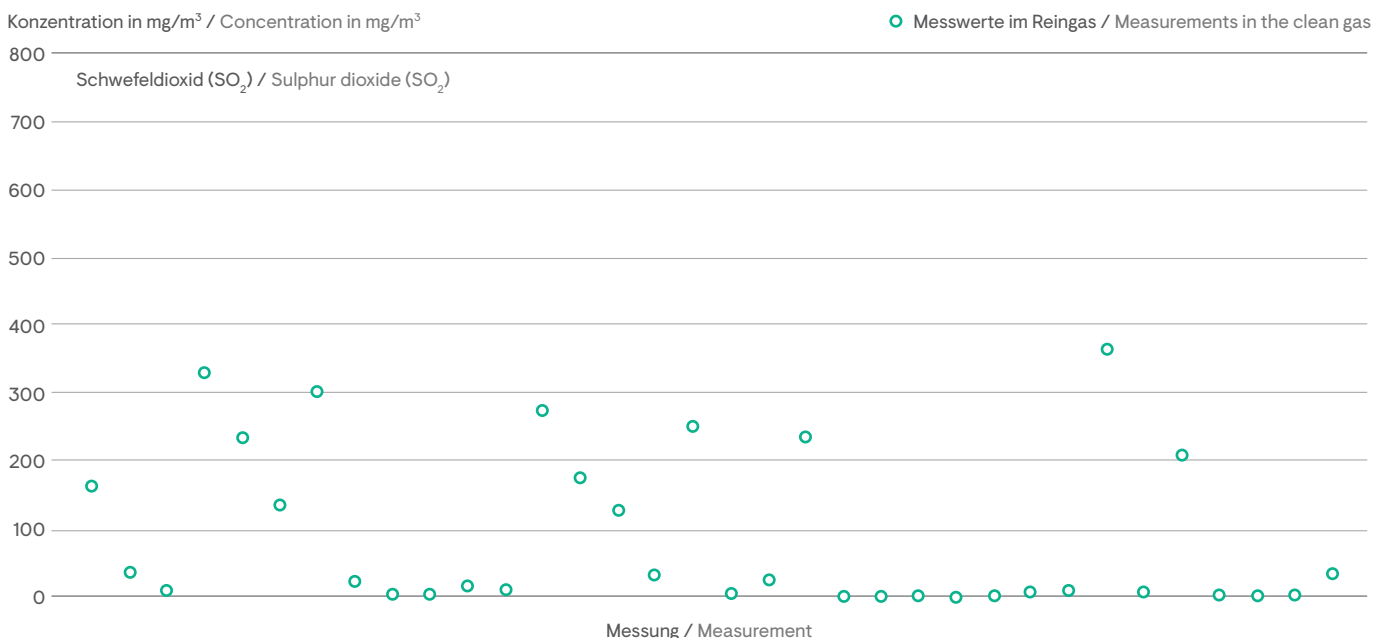
5.5 Schwefeldioxid (SO_2)

Schwefel wird dem Klinkerprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen. Ursache für höhere SO_2 -Emissionen von den Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370°C und ca. 420°C zu SO_2 oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor. Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die SO_2 -Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu $1,2\text{g}/\text{m}^3$ betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO_2 -Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11 Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der SO_2 -Emissionen eingesetzt.

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

Bild 5-5 zeigt 34 Jahresmittelwerte von Schwefeldioxid aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

Bild 5-5 Schwefeldioxid (SO_2 , Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-5 Sulphur dioxide (SO_2 , annual mean values 2023)



5.5 Sulphur dioxide (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 SO_2 emissions by rotary kiln systems of the cement industry might be attributable to the sulphides contained in the raw material, which become oxidised to form SO_2 at temperatures between 370°C and 420°C prevailing during the kiln feed preheating process. Most of the sulphides are pyrite or marcasite contained in the raw materials. Given the sulphide concentrations found in German raw material deposits, SO_2 emission concentrations can total up to $1.2\text{g}/\text{m}^3$ depending on the site location. The cement industry has made great efforts to reduce SO_2 emissions. For example, lime hydrate is utilised at 11 kiln systems to lower SO_2 emissions.

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

Figure 5-5 shows 34 annual average values of sulphur dioxide from continuous monitoring in the clean gas of 34 rotary kilns.

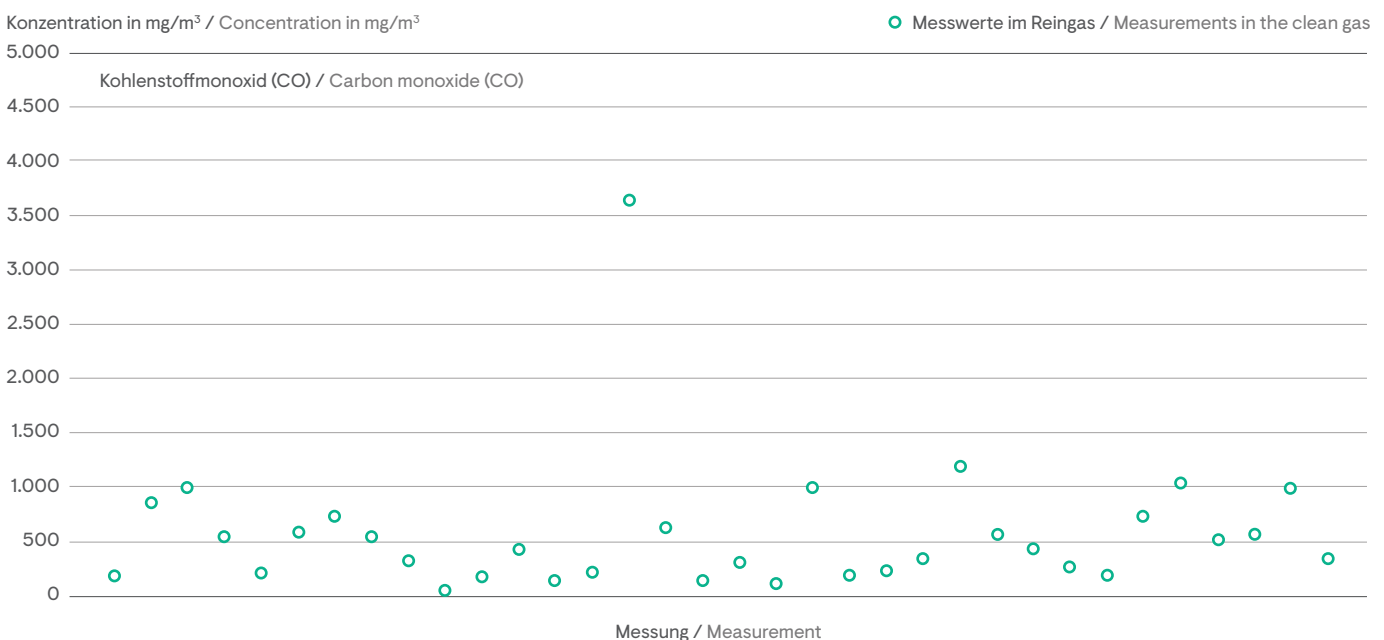
5.6 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC)

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

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

Bild 5-6 zeigt 34 Jahresmittelwerte der CO-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

Bild 5-6 Kohlenstoffmonoxid (CO, Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-6 Carbon monoxide (CO, annual mean values 2023)



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 CO₂. In this process, small portions of organic trace gases (total organic carbon) are formed as well. In case of the clinker burning process, the content of CO and organic trace gases in the clean gas therefore does not permit any conclusions on combustion conditions.

Figure 5-6 shows 34 annual average values of carbon monoxide concentration from continuous monitoring in the clean gas of 34 rotary kilns.

Bild 5-7 Organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC , Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-7 Total organic carbon (TOC, annual mean values 2023)

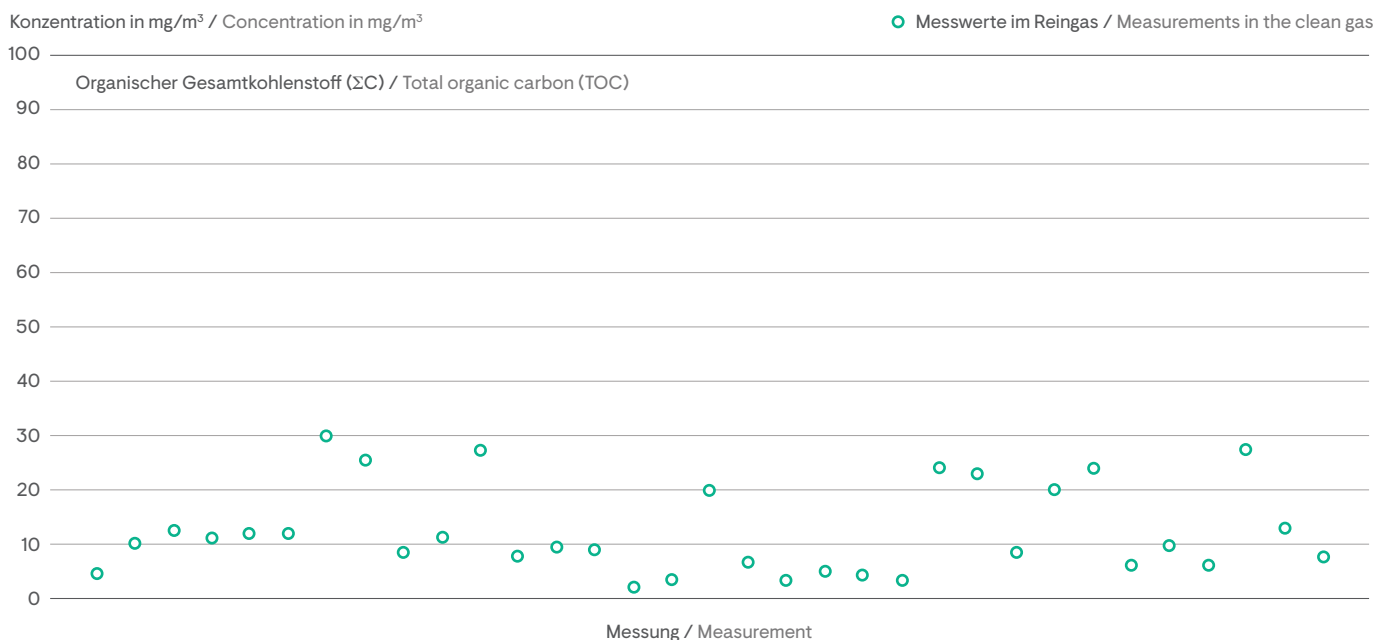


Bild 5-7 zeigt 33 Jahresmittelwerte der Gesamtkohlenstoffkonzentration aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 33 Drehofenanlagen.

Figure 5-7 shows 33 annual average values of total organic carbon concentration from continuous monitoring in the clean gas of 33 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.

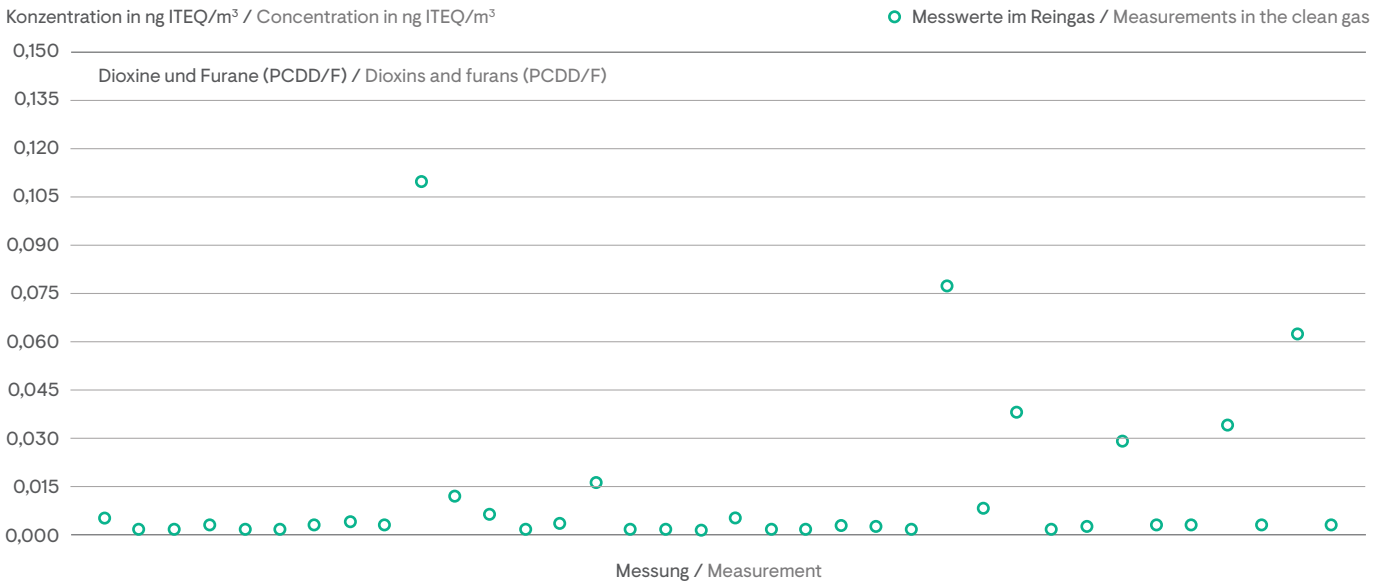
Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Bestimmungsgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Laboratorien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948 $\pm 0,05 \text{ ng ITEQ/m}^3$ (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent).

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 96 Messwerte der Konzentration von Dioxinen und Furanen aus 2023 im Reingas von 31 Drehofenanlagen dargestellt. In 60 Fällen konnten keine PCDD/F nachgewiesen werden.

Figure 5-8 shows 96 dioxin and furan concentration values from measurements in the clean gas of 31 rotary kilns in 2023. In 60 cases there were no PCDD/F detected.

Bild 5-8 Dioxine und Furane (PCDD/F, Messwerte 2023)
Fig. 5-8 Dioxin and furan (PCDD/F, measurements 2023)



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 zeigt 93 Werte aus Messungen an 29 Drehofenanlagen.

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 shows 93 values from measurements at 29 rotary kilns.

Bild 5-9 Polychlorierte Biphenyle (PCB nach WHO, Messwerte 2023)
Fig. 5-9 Polychlorinated biphenyls (PCB acc. to WHO, measurements 2023)

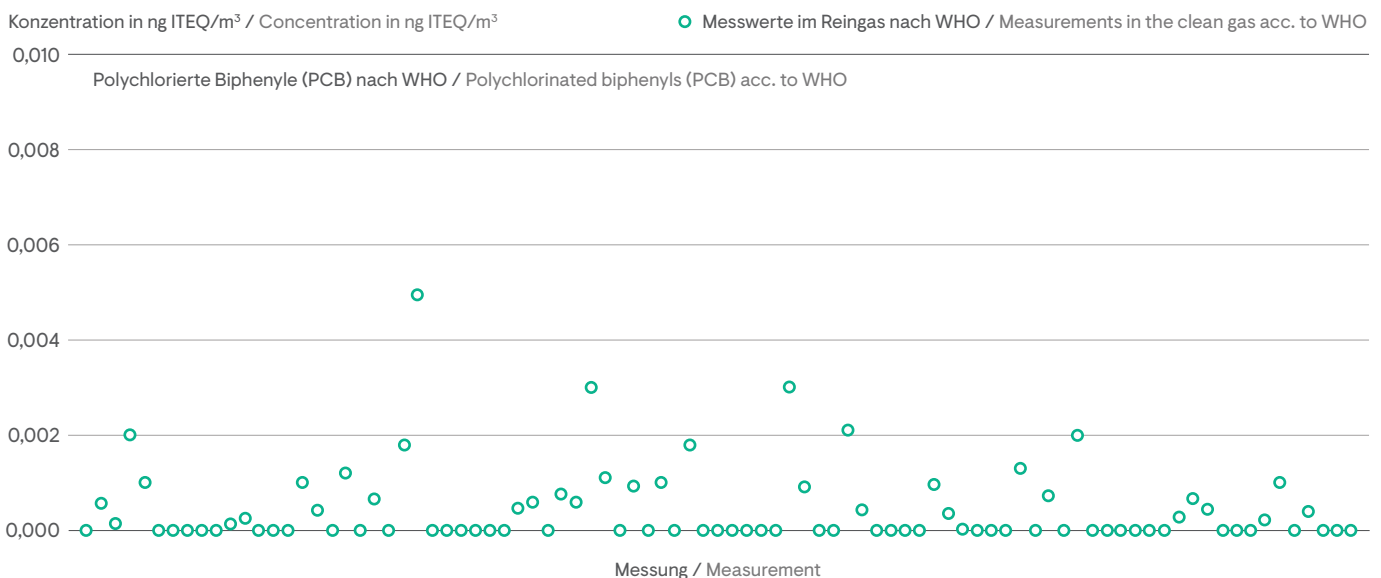
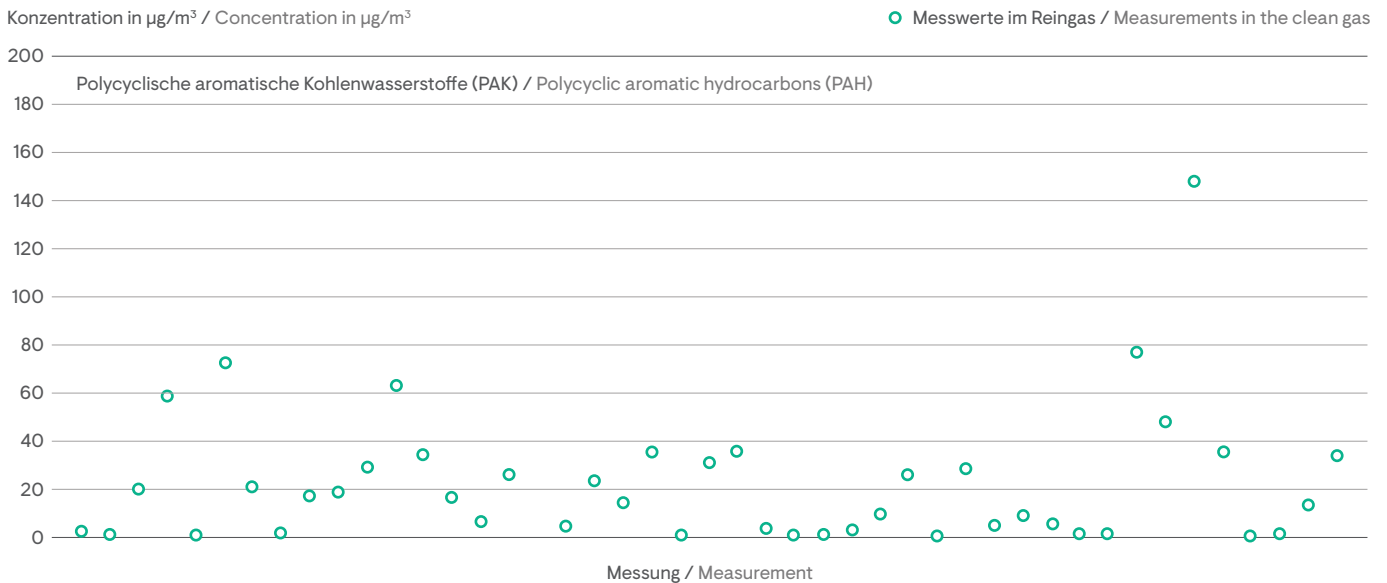


Bild 5-10 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK nach EPA 610, Messwerte 2023)
Fig. 5-10 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610, measurements 2023)



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.

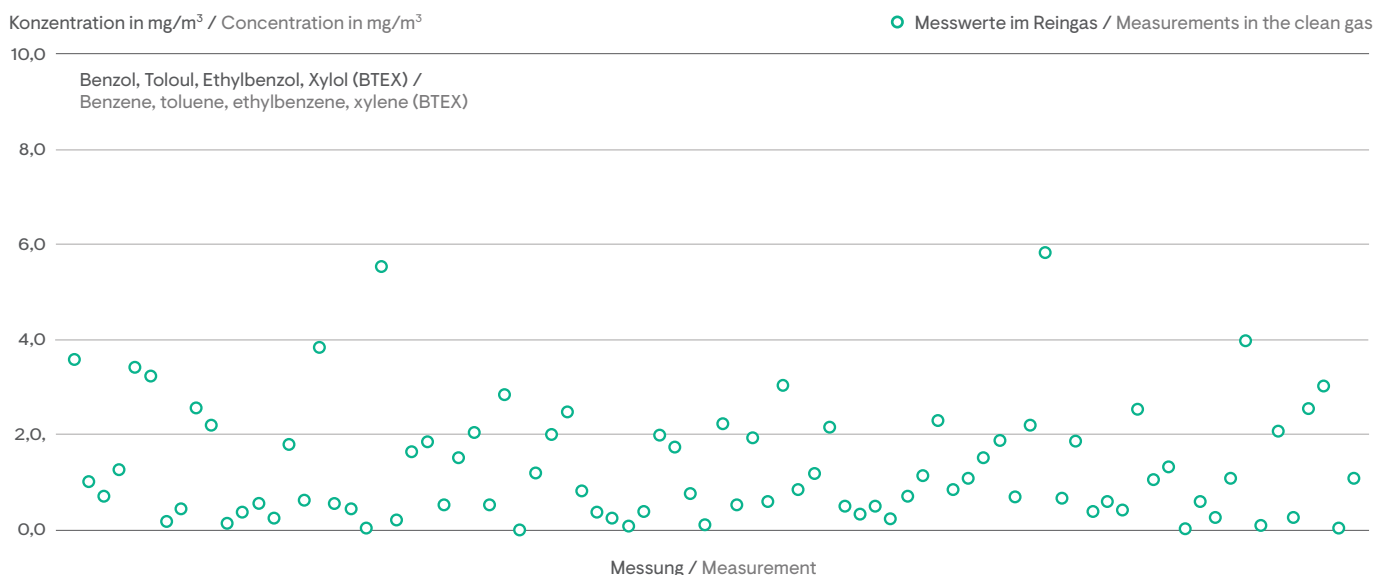
Bild 5-10 zeigt 49 Messwerte der Konzentration von PAK im Reingas von 17 Drehofenanlagen.

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 5-10 shows 49 PAH concentration values in the clean gas of 17 rotary kilns.

Bild 5-11 Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol BTEX (Messwerte 2023)
Fig. 5-11 Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene BTEX (measurements 2023)



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 2023 wurden 88 Werte aus Messungen der BTEX-Konzentration im Reingas von 23 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-11).

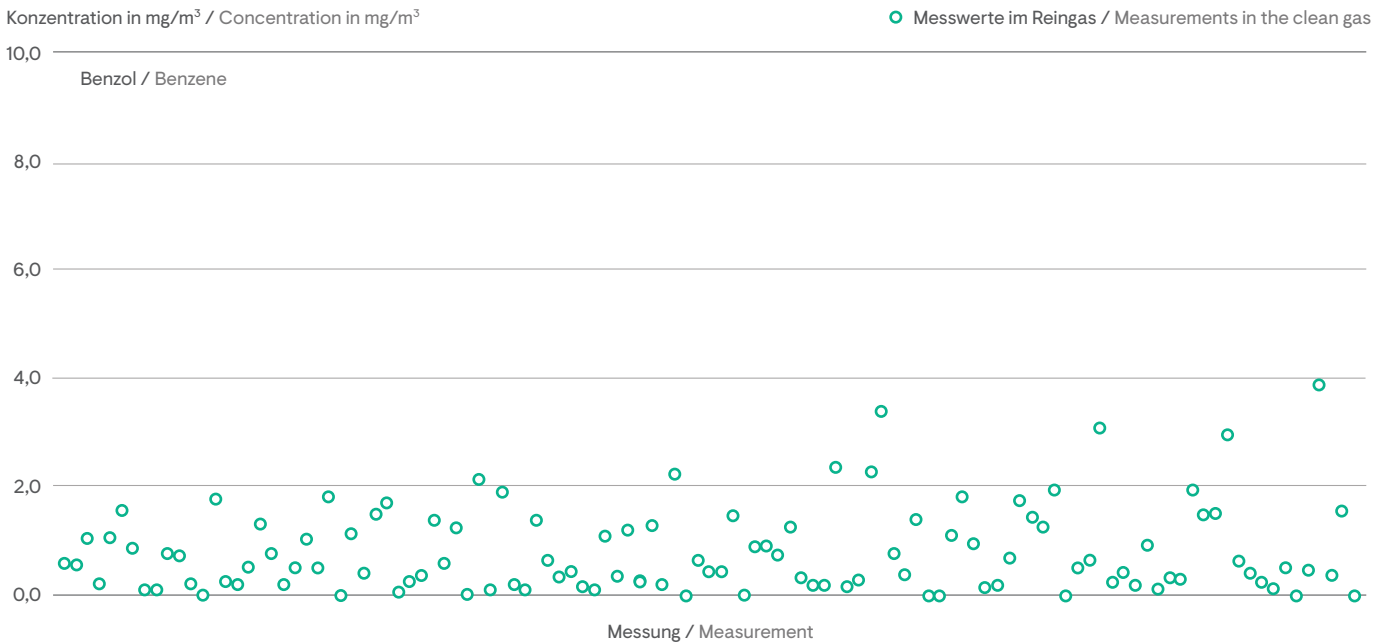
5.10 Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX)

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 5-11 shows 88 BTEX concentration values from measurements in the clean gas of 23 rotary kilns.

Bild 5-12 Benzol (C₆H₆, Messwerte 2023)

Fig. 5-12 Benzene (C₆H₆, measurements 2023)



5.11 Benzol (C₆H₆)

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.

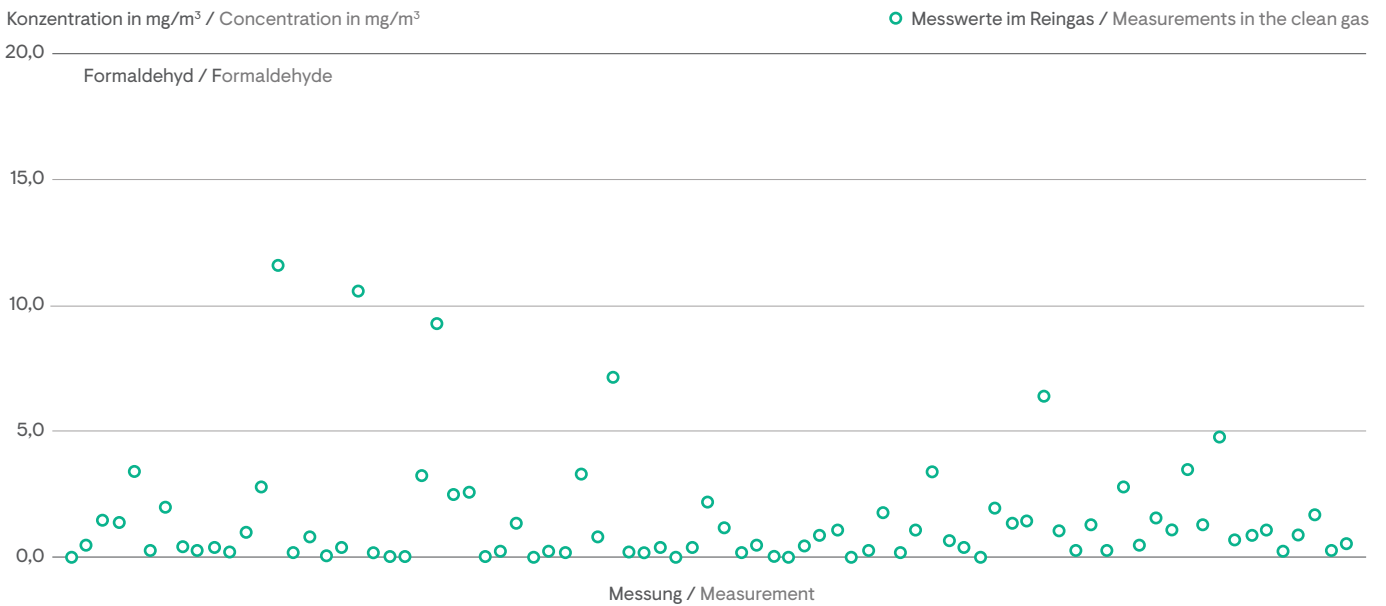
Bild 5-12 zeigt 117 Werte aus Messungen der Benzolkonzentration im Reingas von 30 Ofenanlagen.

5.11 Benzene (C₆H₆)

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 5-12 shows 117 benzene concentration values from measurements in the clean gas of 30 rotary kilns.

Bild 5-13 Formaldehyd (CH₂O, Messwerte 2023)
Fig. 5-13 Formaldehyde (CH₂O, measurements 2023)



5.12 Formaldehyd (CH₂O)

In 2023 wurden 85 Werte aus Messungen im Reingas von 24 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-13).

5.12 Formaldehyde (CH₂O)

Figure 5-13 shows 85 values from clean gas measurements at 24 rotary kilns.

5.13 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂)

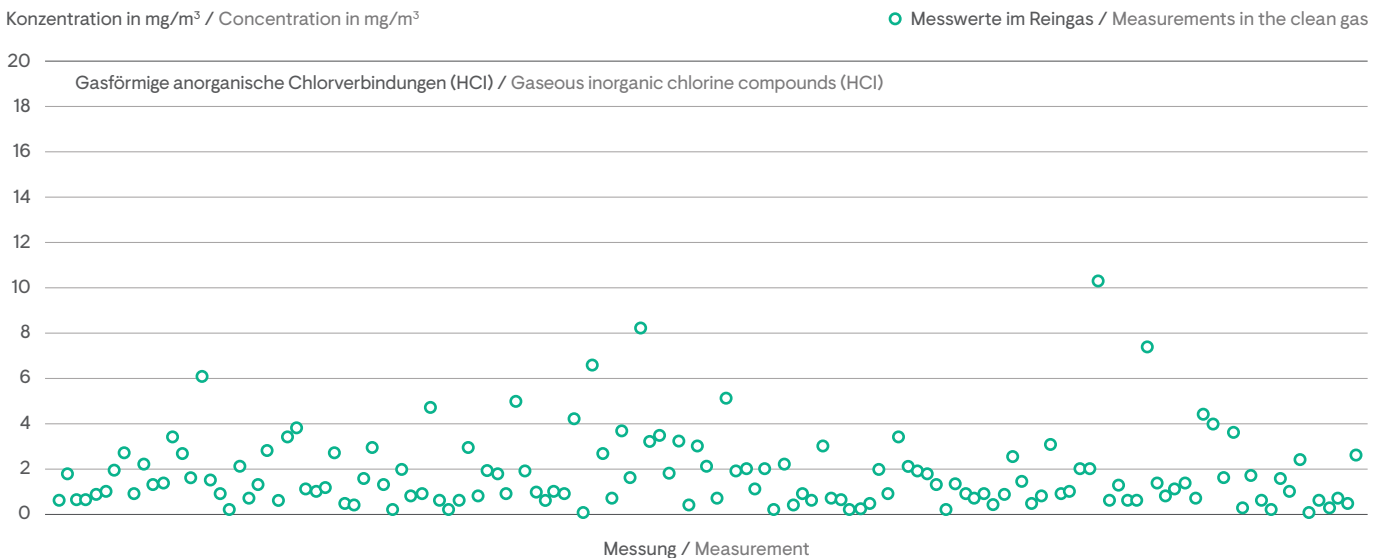
In 2023 wurden 90 Werte aus Messungen an 28 Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-14).

5.13 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂)

Figure 5-14 shows 90 values from clean gas measurements at 28 rotary kilns.

Bild 5-14 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂, Messwerte 2023)
Fig. 5-14 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂, measurements 2023)



Bild 5-15 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl, Messwerte 2023)**Fig. 5-15 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl, measurements 2023)**

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 5-15 zeigt 137 Werte aus Messungen der HCl-Konzentration im Reingas von 32 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 auch von Fluorwasserstoff, ist wegen des hohen Calciumüber-

5.14 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)

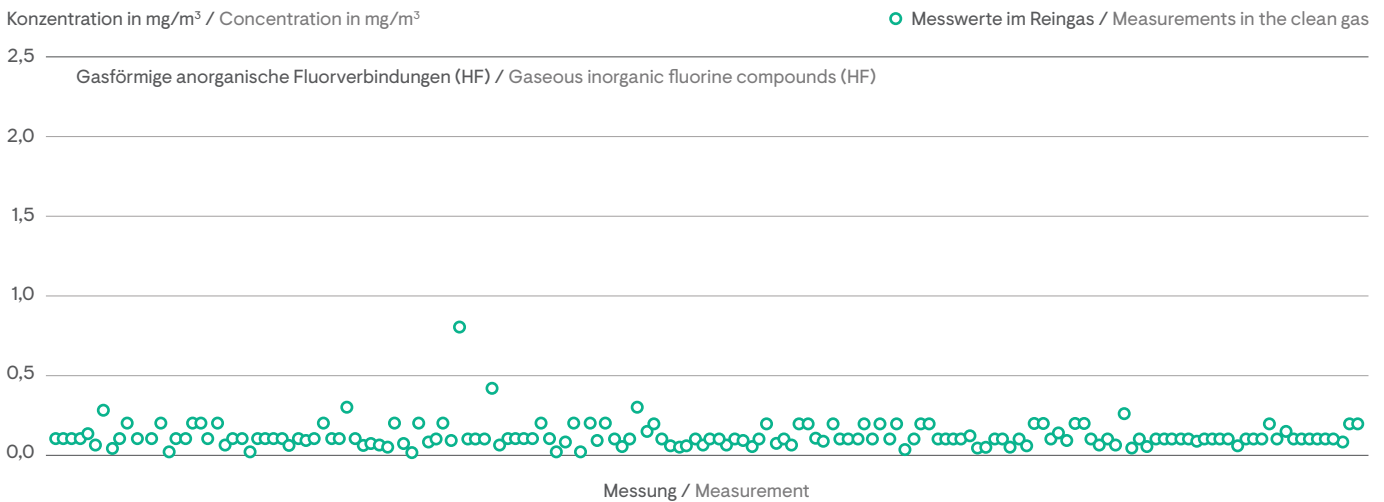
Chlorides are minor additional constituents contained in the raw materials and fuels of the clinker burning process. They are released when the fuels are burnt or the kiln feed is heated and primarily react with the alkalis from the kiln feed to form alkali chlorides. These compounds, which are initially 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 5-15 shows 137 HCl concentration values from measurements in the clean gas of 32 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 5-16 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF, Messwerte 2023)
Fig. 5-16 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF, measurements 2023)



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

Bild 5-16 zeigt 166 Werte aus Messungen der HF-Konzentration im Reingas von 33 Drehofenanlagen.

5.16 Spurenelemente

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

Spurenelemente aus den Brennstoffen gelangen zunächst in die Verbrennungsgase, werden jedoch aufgrund des Rückhaltevermögens von Ofen und Vorwärmer nur in äußerst geringem Maße emittiert. Tabelle 5-2 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 5-16 shows 166 HF concentration values from measurements in the clean gas of 33 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 /
 Guideline for energy recovery from waste in cement, lime and power plants in North Rhine-Westphalia

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.

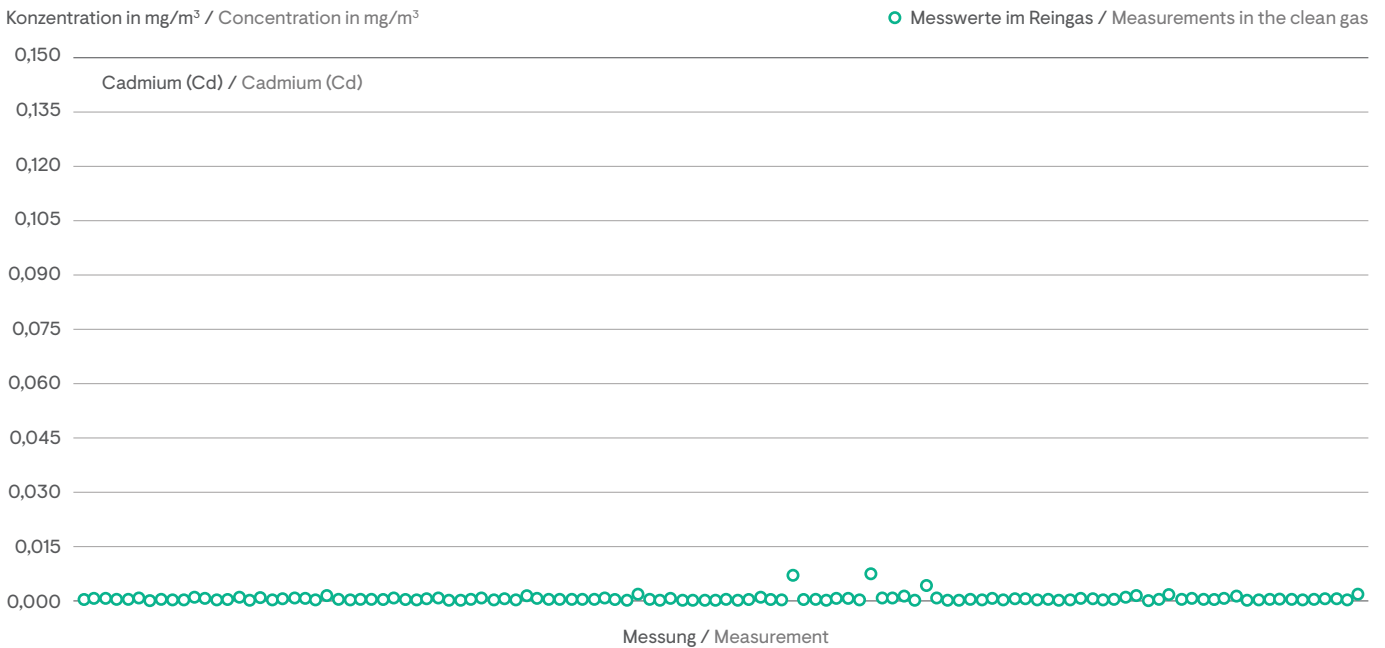
Under the conditions prevailing in the clinker burning process, non-volatile elements (e.g. arsenic, vanadium, nickel) are completely bound in the clinker. Elements such as lead and cadmium preferably react with the excess chlorides and sulphates in the section between the rotary kiln and the preheater, 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 5-17 Cadmium (Cd, Messwerte 2023)
Fig. 5-17 Cadmium (Cd, measurements 2023)



5.16.1 Cadmium (Cd)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-17).

5.16.1 Cadmium (Cd)

Figure 5-17 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

5.16.2 Thallium (Tl)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-18).

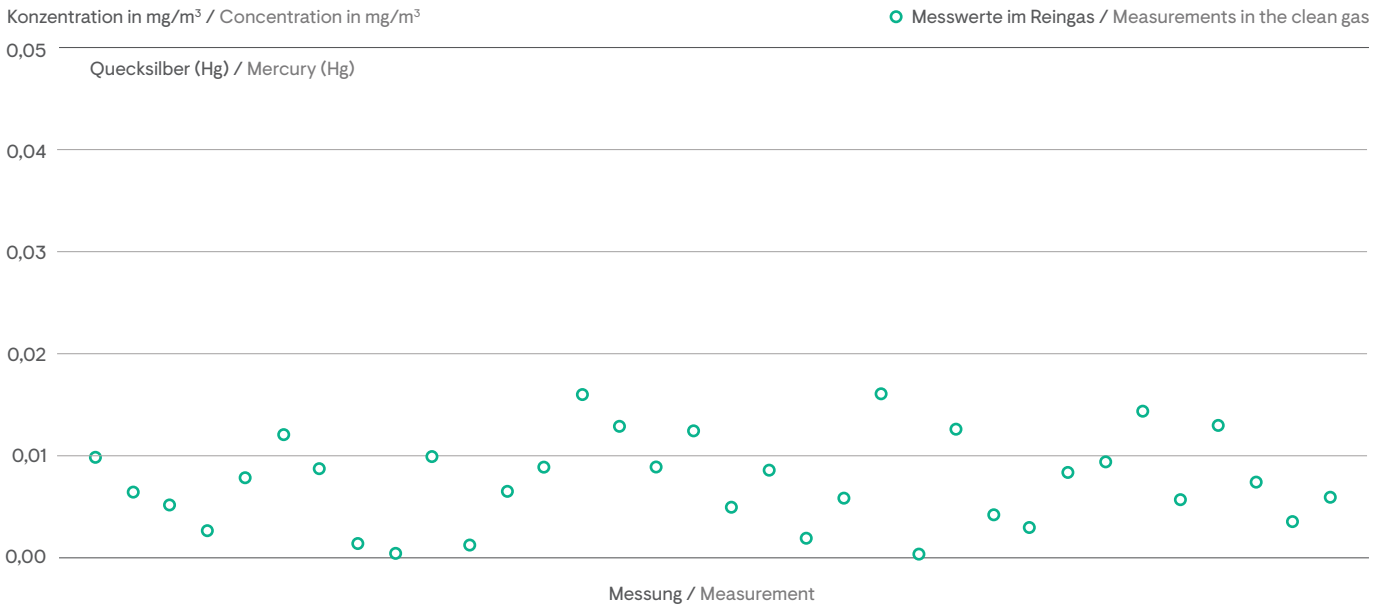
5.16.2 Thallium (Tl)

Figure 5-18 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

Bild 5-18 Thallium (Tl, Messwerte 2023)
Fig. 5-18 Thallium (Tl, measurements 2023)



Bild 5-19 Quecksilber (Hg, Jahresmittelwerte 2023)
Fig. 5-19 Mercury (Hg, Annual mean values 2023)



5.16.3 Quecksilber (Hg)

In 2023 wurden 34 Jahresmittelwerte der Hg-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung von 34 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-19).

5.16.3 Mercury (Hg)

Figure 5-19 shows 34 annual average Hg concentration values from continuous monitoring of 34 rotary kilns.

5.16.4 Antimon (Sb)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-20).

5.16.4 Antimony (Sb)

Figure 5-20 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

Bild 5-20 Antimon (Sb, Messwerte 2023)
Fig. 5-20 Antimony (Sb, measurements 2023)

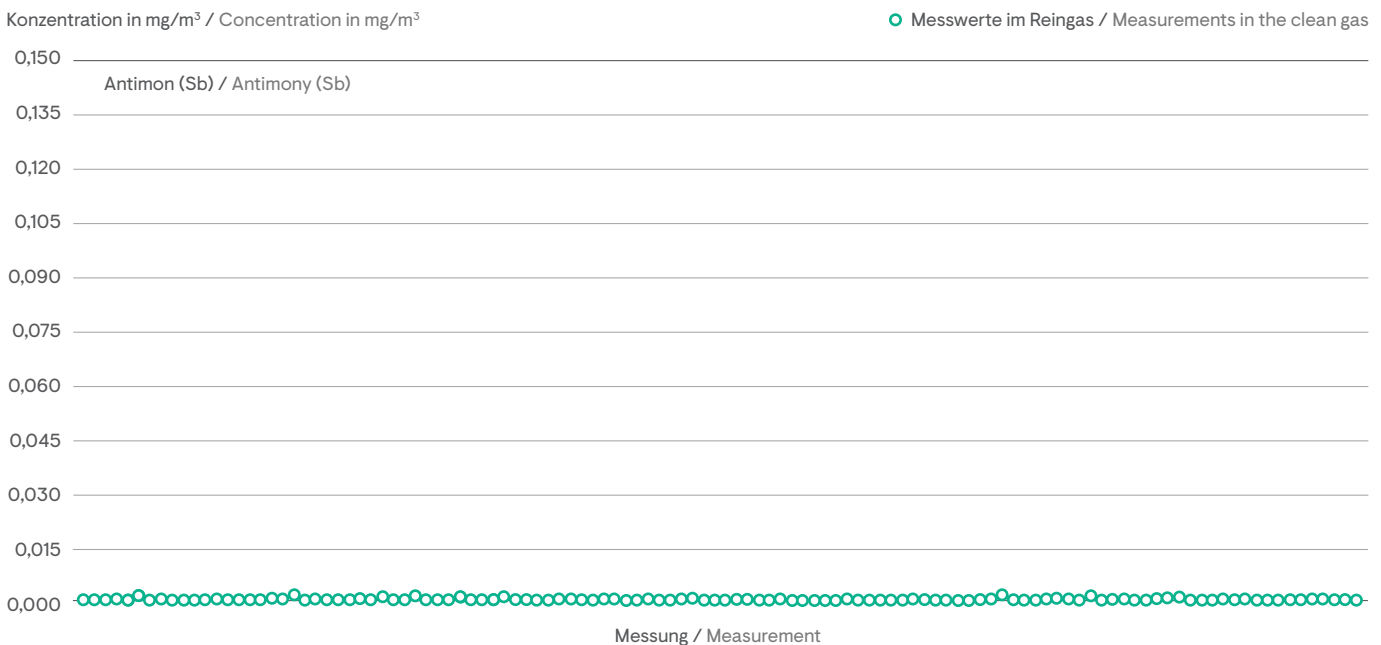
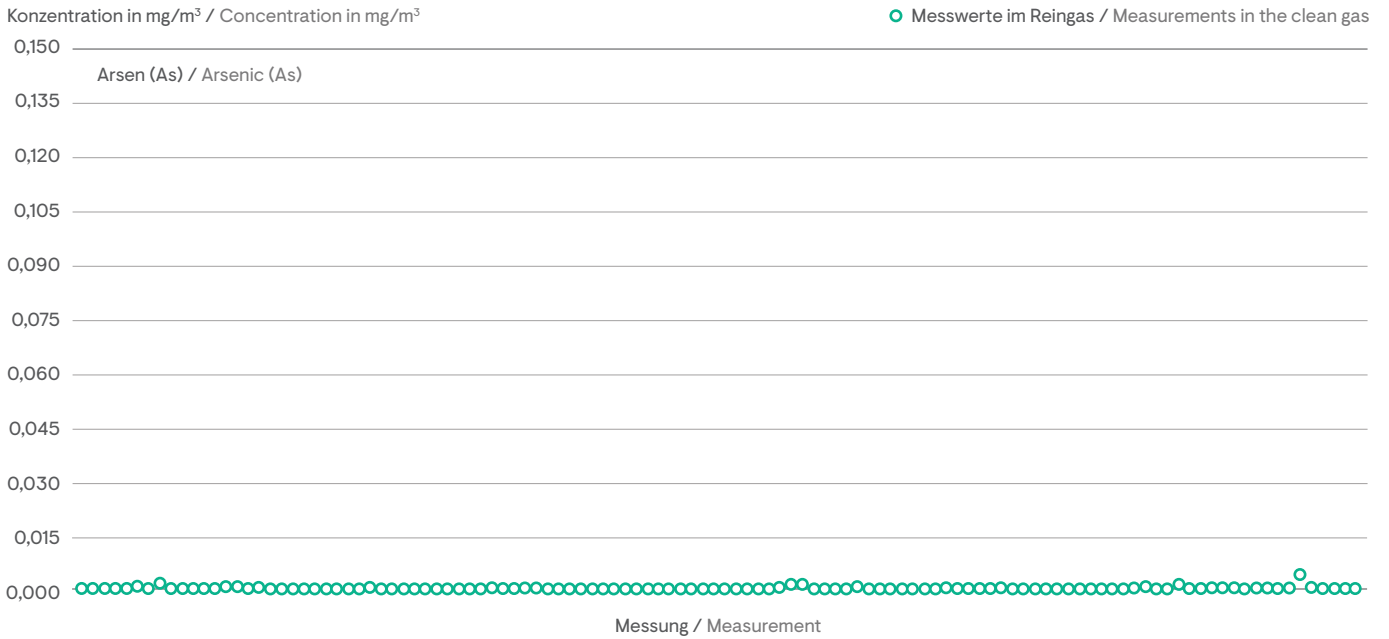


Bild 5-21 Arsen (As, Messwerte 2023)
Fig. 5-21 Arsenic (As, measurements 2023)



5.16.5 Arsen (As)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-21).

5.16.5 Arsenic (As)

Figure 5-21 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

5.16.6 Blei (Pb)

In 2023 wurden 116 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-22).

5.16.6 Lead (Pb)

Figure 5-22 shows 116 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

Bild 5-22 Blei (Pb, Messwerte 2023)
Fig. 5-22 Lead (Pb, measurements 2023)

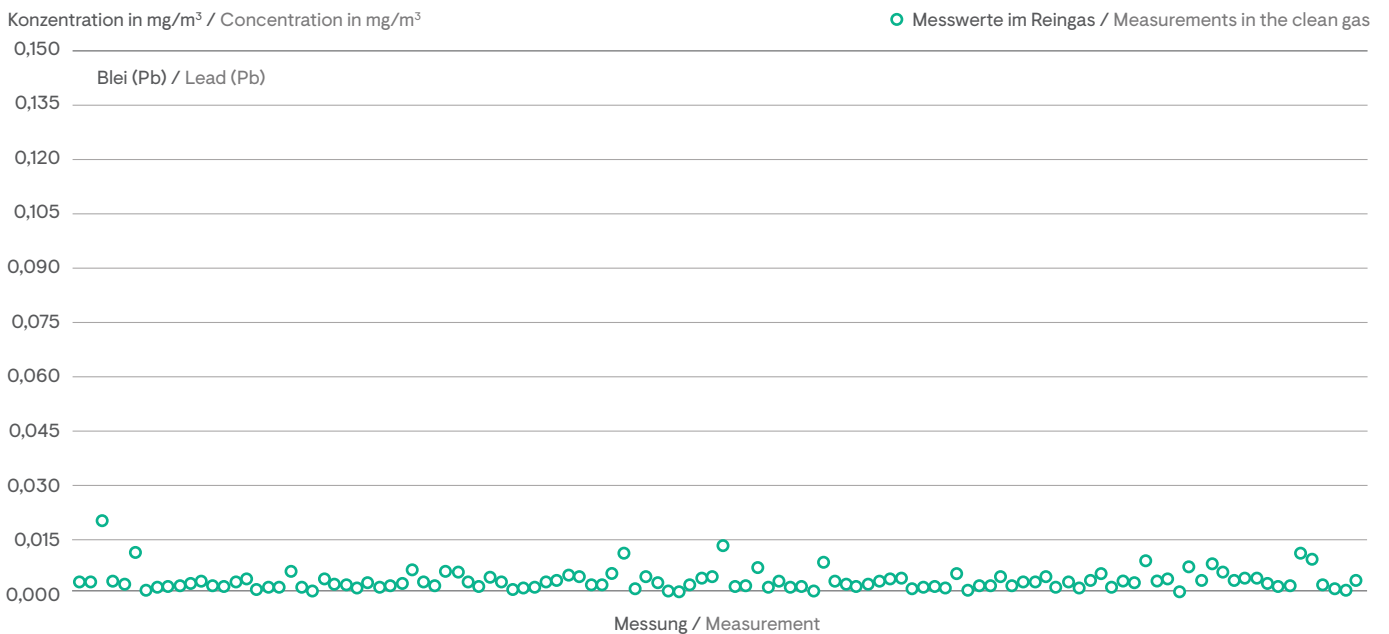
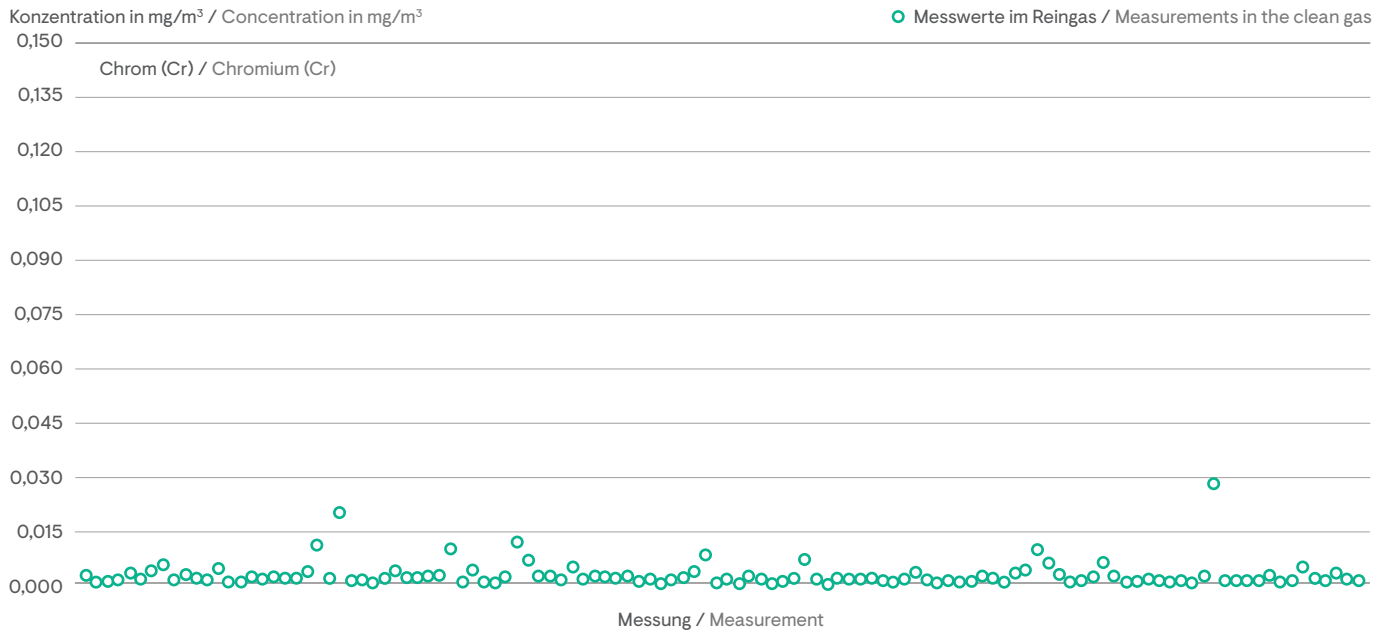


Bild 5-23 Chrom (Cr, Messwerte 2023)**Fig. 5-23 Chromium (Cr, measurements 2023)****5.16.7 Chrom (Cr)**

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-23).

5.16.7 Chromium (Cr)

Figure 5-23 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

5.16.8 Cobalt (Co)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-24).

5.16.8 Cobalt (Co)

Figure 5-24 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

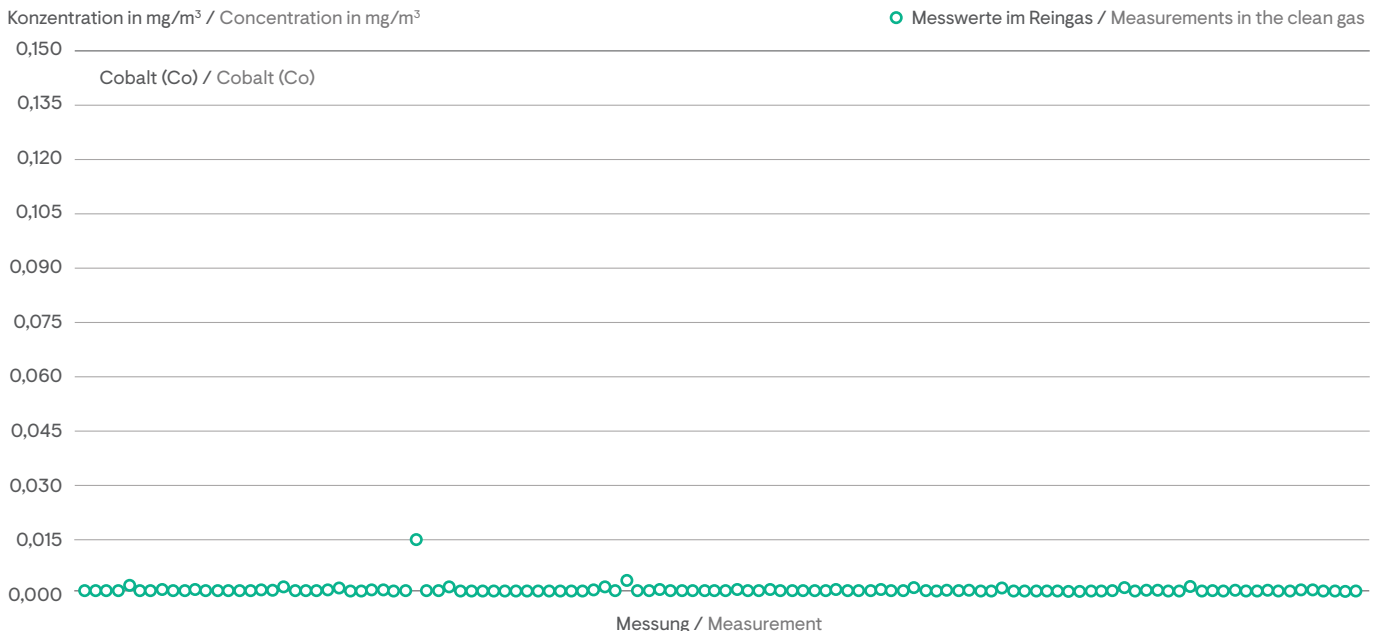
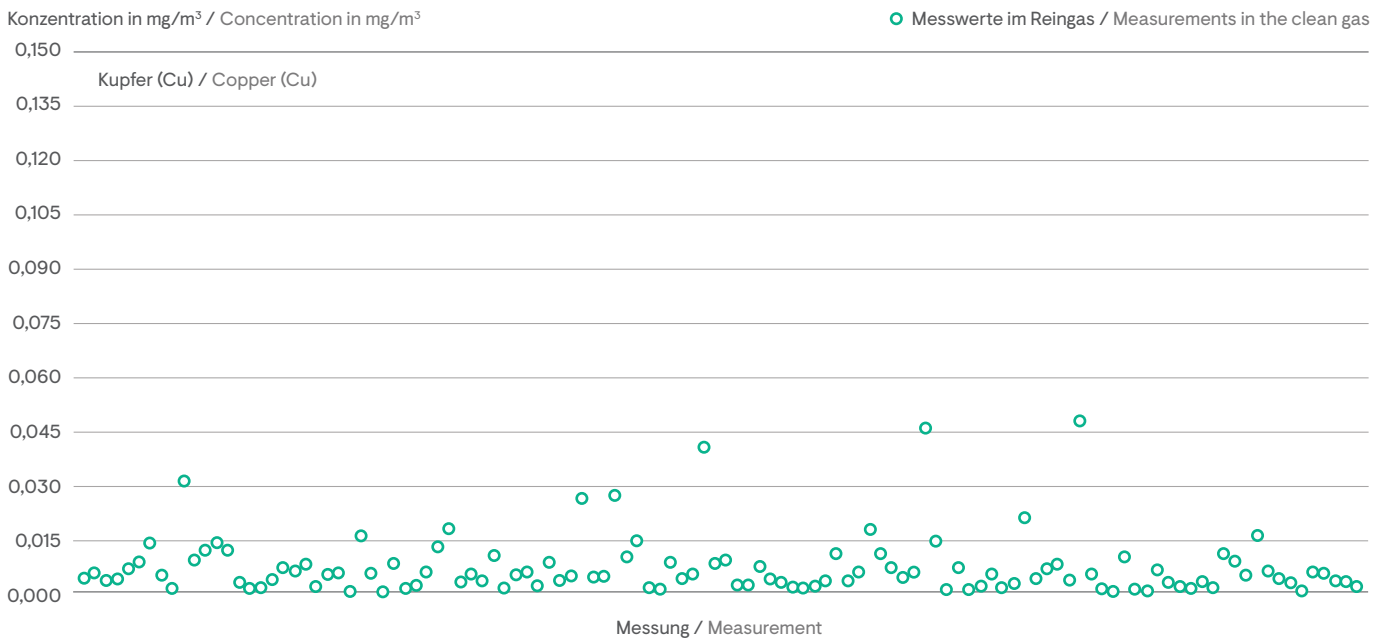
Bild 5-24 Cobalt (Co, Messwerte 2023)**Fig. 5-24 Cobalt (Co, measurements 2023)**

Bild 5-25 Kupfer (Cu, Messwerte 2023)
Fig. 5-25 Copper (Cu, measurements 2023)



5.16.9 Kupfer (Cu)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-25).

5.16.9 Copper (Cu)

Figure 5-25 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

5.16.10 Mangan (Mn)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-26).

5.16.10 Manganese (Mn)

Figure 5-26 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

Bild 5-26 Mangan (Mn, Messwerte 2023)
Fig. 5-26 Manganese (Mn, measurements 2023)

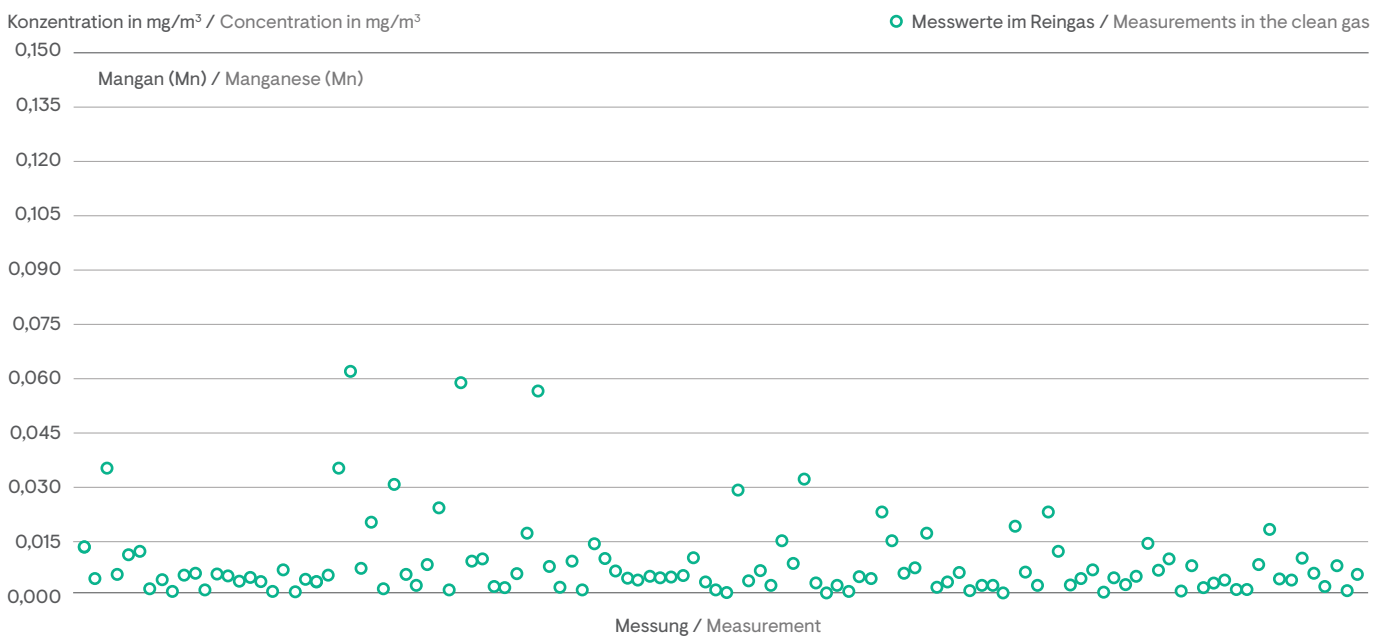
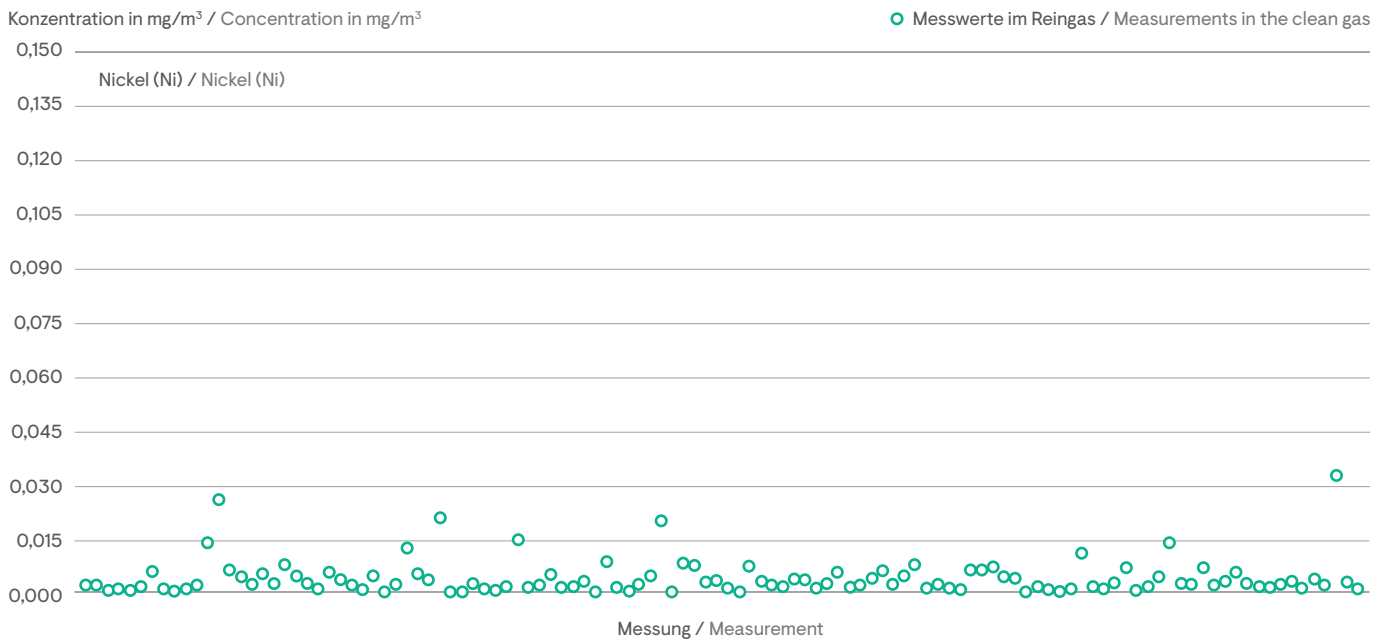


Bild 5-27 Nickel (Ni, Messwerte 2023)
Fig. 5-27 Nickel (Ni, measurements 2023)



5.16.11 Nickel (Ni)

In 2023 wurden 120 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-27).

5.16.11 Nickel (Ni)

Figure 5-27 shows 120 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

5.16.12 Vanadium (V)

In 2023 wurden 119 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-28).

5.16.12 Vanadium (V)

Figure 5-28 shows 119 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

Bild 5-28 Vanadium (V, Messwerte 2023)
Fig. 5-28 Vanadium (V, measurements 2023)

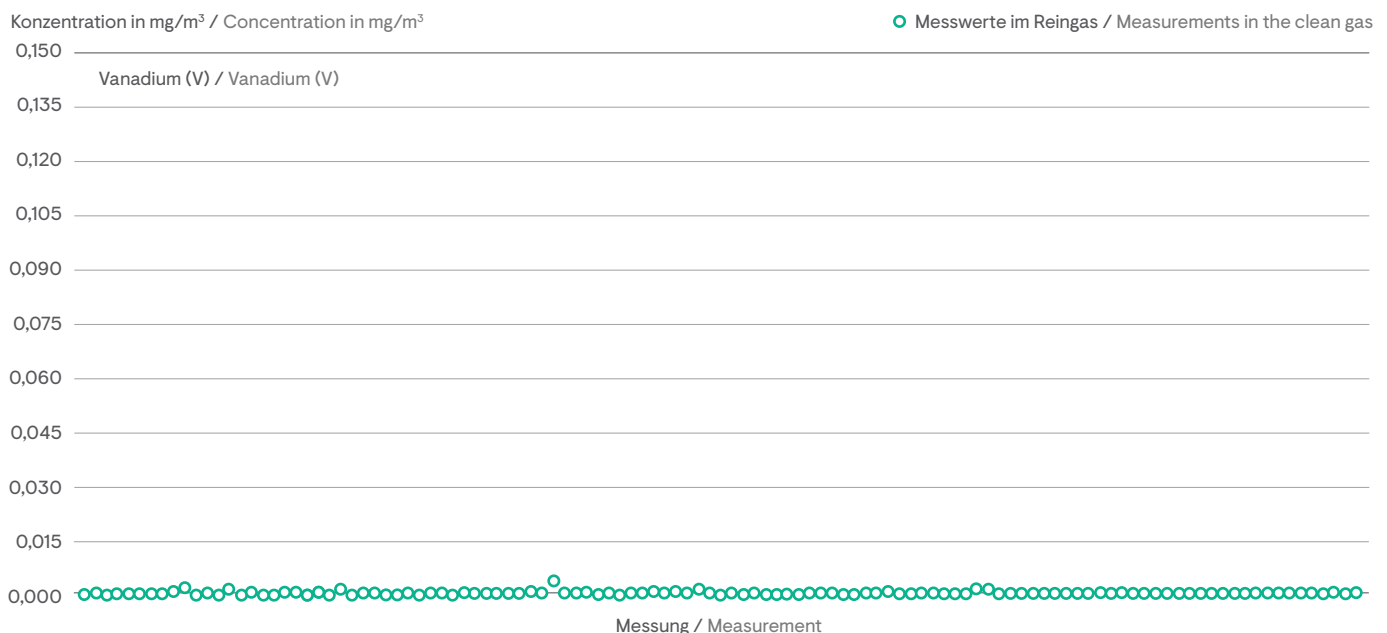


Bild 5-29 Zinn (Sn, Messwerte 2023)
Fig. 5-29 Tin (Sn, measurements 2023)



5.16.13 Zinn (Sn)

In 2023 wurden 117 Werte aus Messungen im Reingas von 32 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-29).

5.16.13 Tin (Sn)

Figure 5-29 shows 117 values from measurements in the clean gas of 32 rotary kilns.

5.16.14 Beryllium (Be)

In 2023 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-32).

5.16.14 Beryllium (Be)

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

Bild 5-30 Beryllium (Be, Messwerte 2023)
Fig. 5-30 Beryllium (Be, measurements 2023)

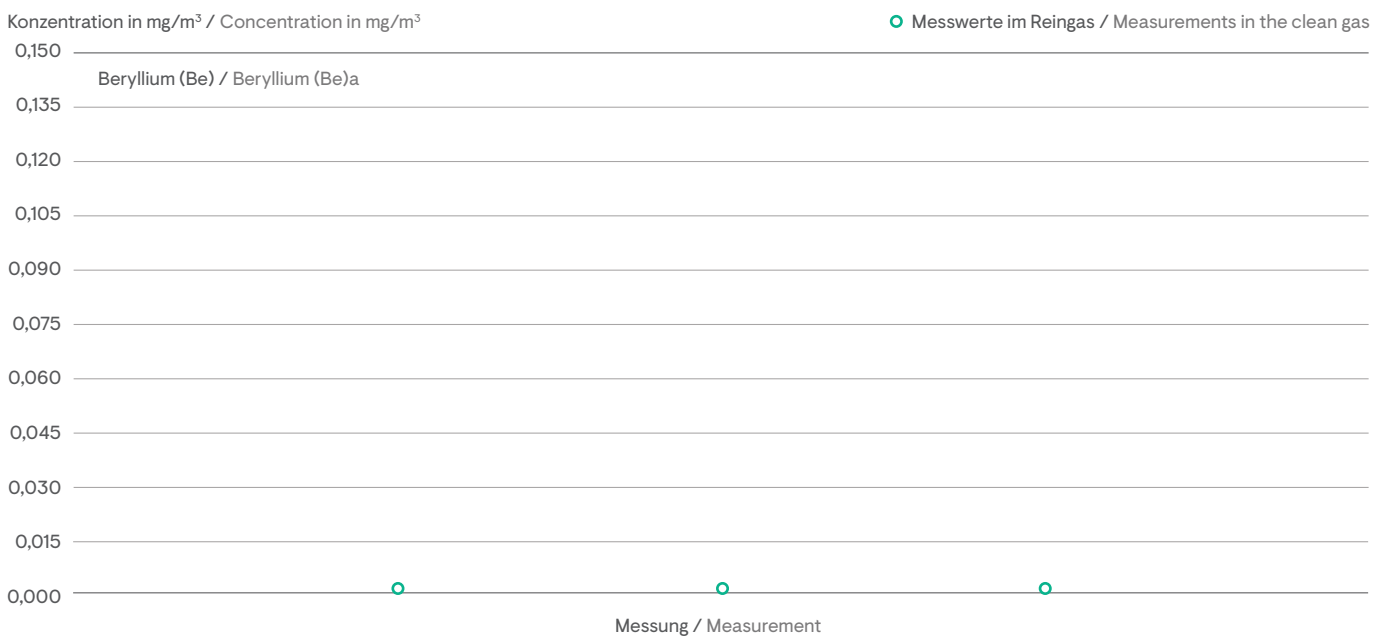
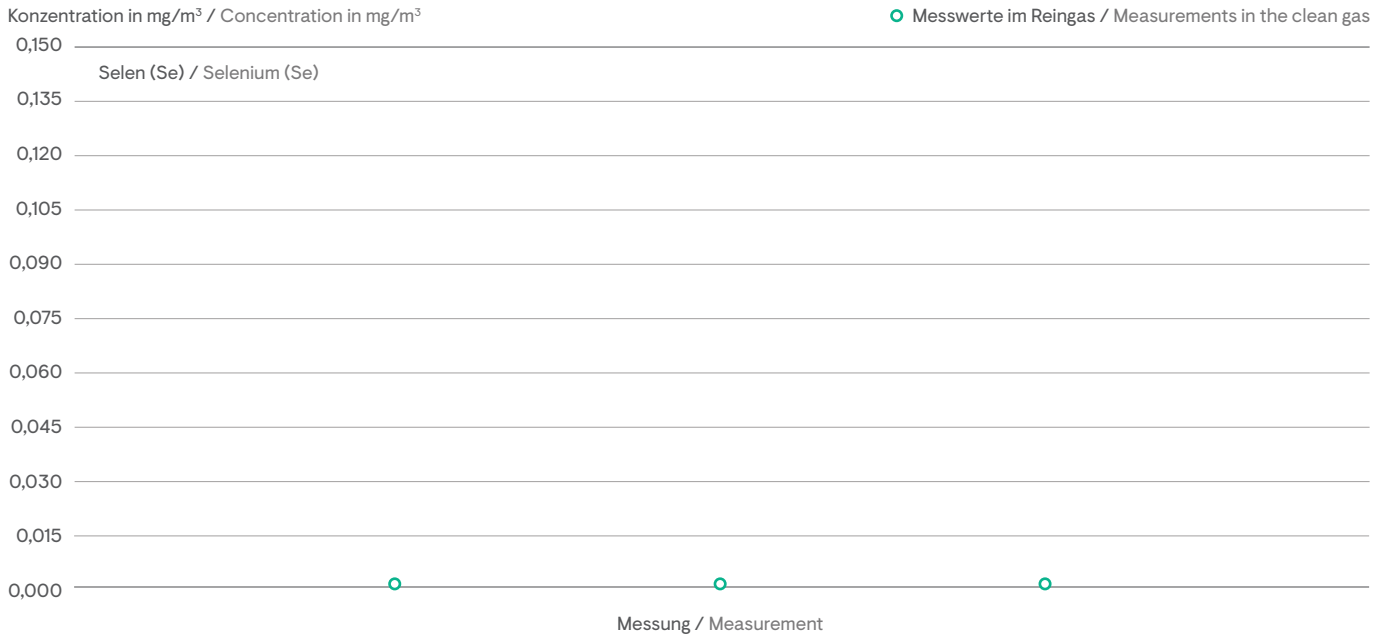


Bild 5-31 Selen (Se, Messwerte 2023)**Fig. 5-31 Selenium (Se, measurements 2023)****5.16.15 Selen (Se)**

In 2023 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-31).

5.16.15 Selenium (Se)

Figure 5-31 shows three values from measurements in the clean gas of one rotary kiln.

5.16.16 Tellur (Te)

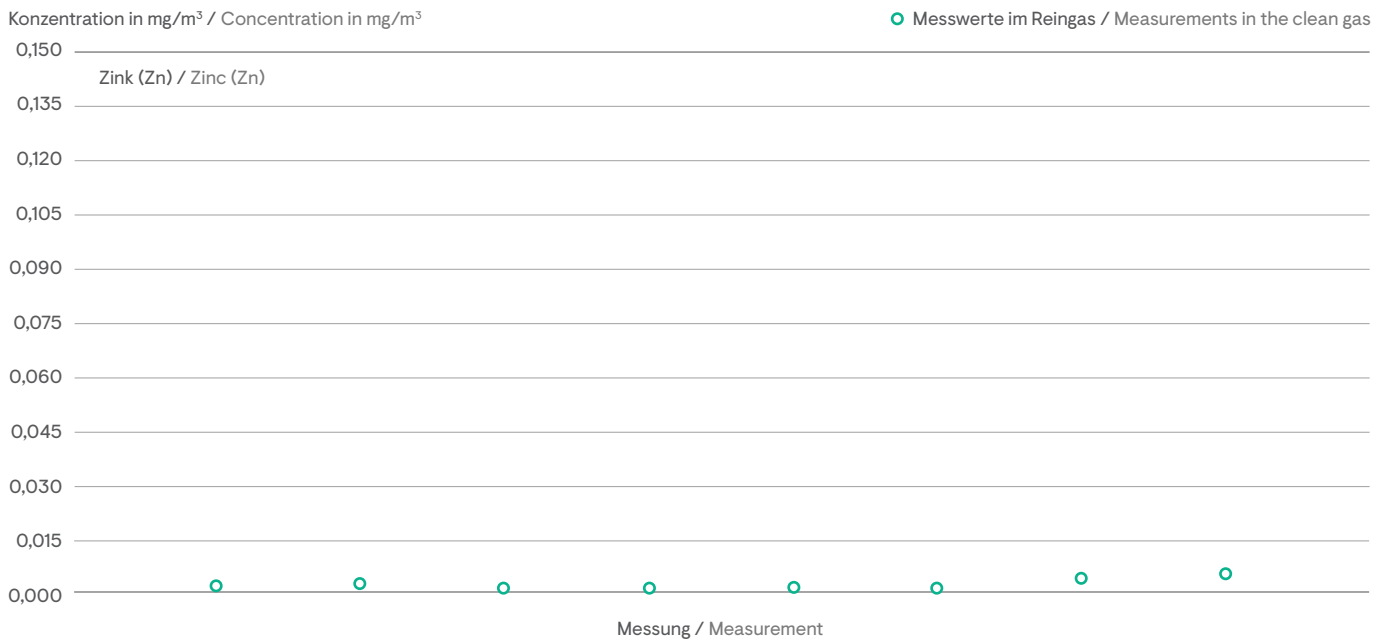
In 2023 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-32).

5.16.16 Tellurium (Te)

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

Bild 5-32 Tellur (Te, Messwerte 2023)**Fig. 5-32 Tellurium (Te, measurements 2023)**

Bild 5-33 Zink (Zn, Messwerte 2023)
Fig. 5-33 Zinc (Zn, measurements 2023)



5.16.17 Zink (Zn)

In 2023 wurden acht Werte aus Messungen im Reingas von zwei Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-33).

5.16.17 Zinc (Zn)

Figure 5-33 shows eight values from clean gas measurements at two rotary kilns.

Literatur

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien, Düsseldorf, 2020
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Anforderungen an eine CO₂-Infrastruktur in Deutschland – Voraussetzungen für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung. Düsseldorf, 2024
- [3] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022
- [4] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2024, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [5] Verminderung der CO₂-Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [6] Klein, H.; Hoenig, V.: Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [7] Verordnung (EG) 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG
- [8] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 1; Cement International 3/2013
- [9] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 2, Cement International 4/2013

Literature

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, ed., Decarbonising Cement and Concrete: A CO₂ Roadmap for the German cement industry, Dusseldorf, 2020
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Requirements for a CO₂ infrastructure in Germany – Achieving climate neutrality in the cement, lime and waste incineration sectors. Dusseldorf, 2024
- [3] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, ed., Resources of the future for cement and concrete – Potential and action strategies, Dusseldorf, 2022
- [4] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2024, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dusseldorf
- [5] Verminderung der CO₂ Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dusseldorf
- [6] Klein, H.; Hoenig, V.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [7] 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
- [8] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 1; Cement International 3/2013
- [9] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 2; Cement International 4/2013

Ergänzende Literatur

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (1998 - 2022), 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, 2015.

Richtlinie VDI 2094:2021-01. Zementwerke: Emissionsminderung

Norm DIN EN 1164-10:2023-02 Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt

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

Additional Literature

Environmental Data of the German Cement Industry (1998 - 2022), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf

Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf

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 2015.

VDI-Guideline 2094:2021-01. Cement plants: Emission control

Standard DIN EN 1164-10:2023-02. Special cement – Part 10: Cement with low effective alkali content

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: September 2024

Zitierung:
Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg.
Umweltdaten der deutschen
Zementindustrie 2023;
Düsseldorf, 2024

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: September 2024

Quotation:
Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Ed.)
Environmental data of the
German cement industry 2023;
Duesseldorf, 2024

Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

Kochstraße 6-7
10969 Berlin

www.vdz-online.de