



Verein deutscher
Zementwerke e. V.

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie

Inhalt

Inhalt	2
Vorwort.....	3
1 Zementherstellung	4
2 Produktions- und Strukturdaten	6
3 Einsatzstoffe.....	8
3.1 Rohstoffe.....	8
3.2 Brennstoffe.....	10
4 Energie	12
5 Emissionen	14
5.1 Klimarelevante Gase / Kohlenstoffdioxid	16
5.2 Staub.....	17
5.3 Stickstoffoxide	18
5.4 Schwefeldioxid	20
5.5 Kohlenstoffmonoxid und organischer Gesamtkohlenstoff.....	21
5.6 Dioxine und Furane	22
5.7 Polychlorierte Biphenyle	23
5.8 Polyaromatische Kohlenwasserstoffe	24
5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol	25
5.10 Anorganische gasförmige Chlorverbindungen	26
5.11 Anorganische gasförmige Fluorverbindungen.....	27
5.12 Spurenelemente.....	28
6 Spurenelemente im Zement.....	38
Literatur	49
Ergänzende Literatur	50
Impressum	51

Mit der vorliegenden Broschüre legt der Verein Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) erstmals eine umfassende Dokumentation umweltrelevanter Daten vor. Die Informationen wurden aus verschiedenen Quellen zusammengestellt und sind repräsentativ für die deutsche Zementindustrie.

Im Vordergrund dieser Broschüre stehen die für die Zementherstellung eingesetzten Roh- und Brennstoffe einschließlich einer detaillierten Aufstellung der eingesetzten Sekundärstoffe. Die Angaben basieren auf einer Umfrage, die über 90 % der deutschen Zementproduktion abdeckt. Die Erhebung umfasste zusätzlich Messungen sowohl der kontinuierlichen Emissionsüberwachung als auch der Einzelmessungen von Spurenelementen und organischen Abgasbestandteilen. Darüber hinaus wurden erstmals alle deutschen nach DIN 1164 hergestellten und überwachten Zemente auf ihren Spurenelementgehalt hin untersucht und elementspezifisch ausgewertet.

Insgesamt werden mit den vorliegenden Umweltdaten etwa 500 Emissionsmessungen an Drehofenanlagen der Zementindustrie sowie mehr als 7.000 Einzelanalysen von Spurenelementgehalten in Zementen dokumentiert. Für die Fülle dieser erstmals erfassten Informationen wurden die bis zum Beginn des Jahres 1999 vorliegenden Emissionsdaten ausgewertet, gleiches gilt für die Spurenelementgehalte in den Zementen. Nur in wenigen Fällen konnten auch jüngere Daten berücksichtigt werden. Es ist vorgesehen, die Erhebung in regelmäßigen Abständen zu aktualisieren und den vorliegenden Bericht fortzuschreiben.

Düsseldorf, im September 2000

VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V.

1 Zementherstellung

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

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

Das Rohstoffgemisch wird in einem Drehrohrföfen bei einer Temperatur von etwa $1.450\text{ }^\circ\text{C}$ bis zum Sintern erhitzt. Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei neue Verbindungen, die so genannten Klinkerphasen.

Das sind bestimmte Calciumsilicate und Calciumaluminat, die dem Zement seine charakteristischen Eigenschaften 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.

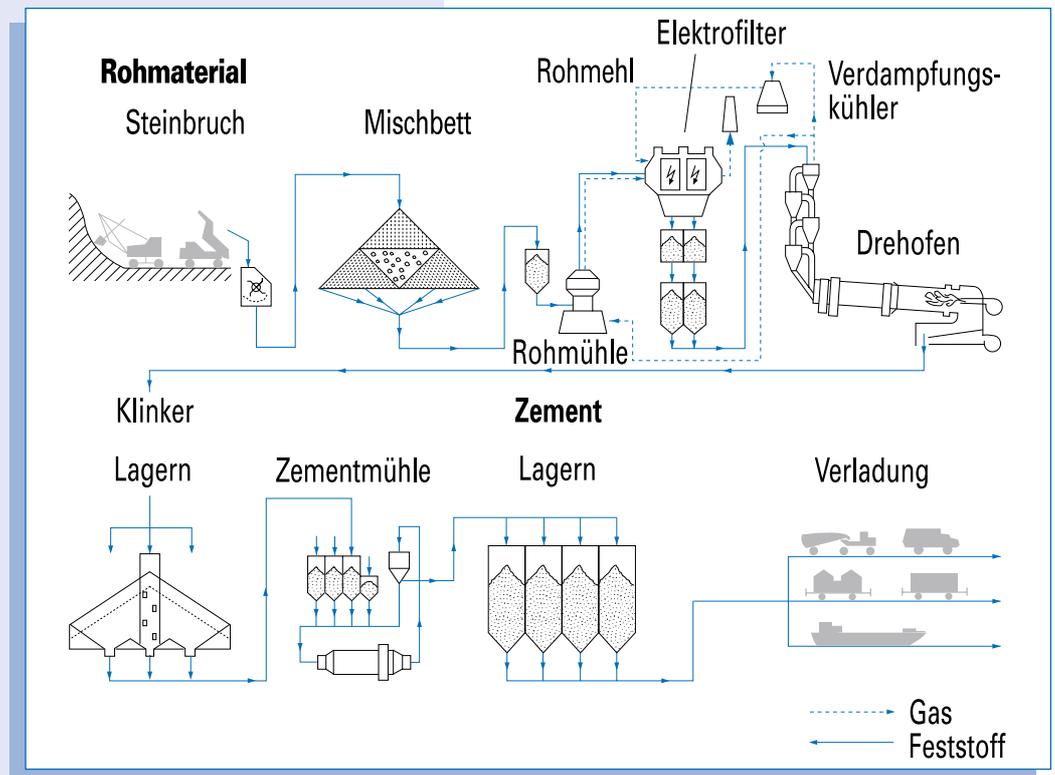


Bild 1-1: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand.

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.

2 Produktions- und Strukturdaten

Zement ist ein homogenes, transportkostenintensives Massengut, das fast ausschließlich zu lokalen Absatzmärkten geliefert wird. Die Produktionsstandorte der deutschen Zementindustrie sind gleichmäßig über das Bundesgebiet verteilt und befinden

sich in unmittelbarer Nähe zu den jeweiligen Kalksteinvorkommen. Im Jahr 1999 produzierten bundesweit 38 Unternehmen in 66 Werken ca. 36,7 Mio. t Zement (Bild 2-1).

Die Tafeln 2-1 und 2-2 geben einen Überblick über die Klinkerproduktion in Deutschland sowie den daraus hergestellten Zement. Zu den Hauptabnehmern gehört die Transportbetonindustrie (53 % der Zementproduktion) sowie die Hersteller von Betonbauteilen (25 % der Zementproduktion). 12 % des Zements wird als Sackzement versandt.

Zementklinker wird heute in Deutschland zum überwiegenden Teil nach dem Trockenverfahren in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern hergestellt. Einen deutlich geringeren Anteil an der Produktion haben Öfen mit Rostvorwärmern (Tafel 2-3).



Bild 2-1: Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1999.

	Einheit	1997	1998	1999
Klinkerproduktion	1.000 t	26.493	27.520	27.739
Zementabsatz (einschl. Klinkerexport)*	1.000 t	31.753	34.943	36.705
davon: Inlandsabsatz*	1.000 t	28.803	32.010	33.776
Export einschl. Klinker	1.000 t	3.015	2.933	2.929
Zementimport (einschl. Saar)	1.000 t	5.474	4.241	3.765

Tafel 2-1: Produktion, Absatz und Import [1].
* Ab 1998 Änderung des Berichtskreises
- mit Vorjahr nicht vergleichbar.

Zementart	Gruppe	Einheit	1997	1998	1999
Portlandzement	CEM I	1.000 t	21.623	21.925	22.131
Portlandhüttenzement	CEM II	1.000 t	1.023	3.436	4.417
Portlandpuzzolanzement		1.000 t	103	86	143
Portlandflugaschezement		1.000 t	2	0	0
Portlandölschieferzement		1.000 t	355	406	412
Portlandkalksteinzement		1.000 t	1.602	1.504	1.852
Portlandflugaschehüttenzement		1.000 t	97	0	0
Hochofenzement	CEM III	1.000 t	3.916	4.524	4.651
Sonstige Zemente		1.000 t	82	129	170
Gesamt		1.000 t	28.803	32.010	33.776

Tafel 2-2: Inlandsabsatz nach Zementarten [1].
Ab 1998 Änderung des Berichtskreises
- mit Vorjahr nicht vergleichbar.

	Stand: 01.01.1998			Stand: 01.01.1999			Stand: 01.01.2000		
	Anzahl	Kapazität t/d	%	Anzahl	Kapazität t/d	%	Anzahl	Kapazität t/d	%
Öfen mit Zyklonvorwärmer	50	118.500	85,4	47	113.700	84,9	46	112.500	84,8
Öfen mit Rostvorwärmer	19	17.770	12,8	19	17.770	13,3	19	17.970	13,5
Trockenöfen	1	1.050	0,7	1	1.050	0,7	1	1.050	0,8
Schachtofen	8	1.200	0,9	8	1.200	0,9	8	1.200	0,9
Schwefelsäure- Zement-Verfahren	2	280	0,2	2	280	0,2	-	-	-
Summe	80	138.800	100	77	134.000	100	74	132.720	100
mittlere Drehöfen		1.962			1.980			1.993	
Ofen- kapazität in t/d	Schachtofen	150			150			150	
	Schwefelsäure- Zement- Verfahren	140			140			-	
Klinkerproduktion (Jahr)		(1997)			(1998)			(1999)	
Mio. t/a		26,5			27,5			27,7	
Auslastung %		60			64			65	

Tafel 2-3: Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1997 bis 1999. Die Auslastung ist auf eine angenommene Anlagenverfügbarkeit von 320 Tagen im Jahr bezogen [1, 2].

3 Einsatzstoffe

Gruppe	Rohstoff	Einsatz [1.000 t/a]
Ca	Kalkstein / Mergel / Kreide	45.700
	Sonstige, wie: - Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasseraufbereitung - Kalkhydrat - Porenbetongranulat - Calciumchlorid - Industrielle Kalkabfälle	180
Si	Sand	1.100
	Gießereialtsand	100
Si-Al	Ton	2.140
	Bentonit / Kaolinit	44
	Rückstände aus der Kohleaufbereitung	20
Fe	Eisenerz	87
	Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie, wie:	170
	- Kiesabbrand	
	- verunreinigtes Erz - Stahlwerksstäube - Walzzunder	
Si-Al-Ca	Hüttensand	4.600
	Flugasche	390
	Ölschiefer	340
	Trass	90
	Sonstige, wie:	300
	- Papierreststoffe	
	- Rostasche aus Verbren- nungsprozessen	
	- Eisenoxid/Flugasche- Gemisch	
	- Schlacken	
	- Mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden	
S	Natürlicher Gips	595
	Natürlicher Anhydrit	475
	Gips aus der Rauchgas- entschwefelung	420
	Sonstige Gipse aus der chemischen oder kera- mischen Industrie	29
F	Calciumfluorid- / fluor- haltige Reststoffe	43
Al	Einsatzstoffe aus der Metall-Industrie, wie:	22
	- Aluminium-Werksstäube	
	- Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken	
	- Katalysatorstaub	
	- Aluminium-Hydroxid	

Tafel 3-1: Rohstoffeinsatz 1998 [3].

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 sekundäre Rohstoffe, wie z. B. Kalkschlämme, Gießereialtsande 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 Sekundärrohstoffs erfüllen muss, hängen in erster Linie von der vorgegebenen Rohstoffsituation eines Zementwerks, d. h. der Zusammensetzung des Kalkstein- bzw. Mergelvorkommens ab.

In Tafel 3-1 werden die im Jahr 1998 eingesetzten Rohstoffe aufgeführt. Ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechend lassen sie sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Der Einsatz erfolgt hauptsächlich als Rohmaterialkomponente beim Klinkerbrennprozess. Hüttensand, ein geringer Teil des Kalksteins, Ölschiefer (in gebrannter Form) sowie Trass werden als Hauptbestandteil im Zement verwendet.

Die Zementindustrie bemüht sich, den Anteil anderer Hauptbestandteile 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 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sinnvoll verwertet werden.

Als Stoffe, die Zementklinker im Zement ersetzen können, sind in Deutschland in erster Linie Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) und daneben Kalkstein von technischer Bedeutung. Hüttensand ist ein Produkt der Roheisenherstellung und wird zur Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet. Im Jahr 1999 wurden in Deutschland etwa 4,9 Mio. t Hüttensand für die Zementherstellung eingesetzt. Die Entwicklung im Verlauf der vergangenen Jahre zeigt Tafel 3-2.

Jahr	Hüttensand	
	absolut [Mio. t]	Gesamtschlackeerzeugung [%]
1997	3,9	52,0
1998	4,6	62,2
1999	4,9	70,0

Tafel 3-2: Hüttensandeinsatz in der Zementindustrie.

3.2 Brennstoffe

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. In geringem Umfang wird thermische Energie auch für die Trocknung von Rohstoffen und weiteren Zement-Hauptbestandteilen, wie z. B. Hütensand eingesetzt. Die traditionellen Brennstoffe in der Zementindustrie sind seit Mitte der 70er-Jahre Steinkohle und Braunkohle, in geringem Umfang auch schweres Heizöl. Seit den 90er-Jahren wird ein nennenswerter Teil der Kohle durch Petrolkoks ersetzt. Petrolkoks ist eine kohleähnliche Fraktion des Mineralöls, die bei der Rohölaufbereitung anfällt. Zum Anfahren des Ofens sowie für Trocknungsprozesse wird darüber hinaus leichtes und schweres Heizöl sowie Gas verwendet. Die Gesamtaufstellung der in der Zementindustrie eingesetzten Energieträger zeigt Tafel 3-3.

Brennstoff	1996 [Mio. GJ/a]	1997 [Mio. GJ/a]	1998 [Mio. GJ/a]
Steinkohle	37,9	38,2	32,0
Braunkohle	32,1	31,4	33,2
Petrolkoks	9,9	9,5	10,2
Heizöl S	2,4	2,2	4,5
Heizöl EL	0,3	0,2	0,3
Erdgas und andere Gase	1,3	1,6	0,6
Sonstige fossile Brennstoffe	0,6	0,5	1,1
Fossile Brennstoffe insgesamt	84,5	83,6	81,9
Sekundärbrennstoffe insgesamt	13,1	15,7	18,8
Brennstoffenergieverbrauch insgesamt	97,6	99,3	100,7

Tafel 3-3: Brennstoffenergieverbrauch nach Energieträgern [5].

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage vermehrt Sekundärbrennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieverbrauch der deutschen Zementindustrie betrug 1999 etwa 23 %. Eine Aufstellung über die im Jahr 1998 eingesetzten Sekundärbrennstoffe sowie deren durchschnittliche Heizwerte enthält Tafel 3-4.

Sekundärbrennstoff	1.000 t/a	MJ/kg
Reifen / Gummi	229	26
Altöl	168	34
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen (wie z. B. Kunststoffe, Papier, Textilien, etc.)	176	22
Altholz	76	14
Lösungsmittel	18	22
Teppichabfälle	18	19
Bleicherde	13	14
Sonstige, wie:	84	12
- Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen		
- Ölschlamm		
- Organische Destillationsrückstände		
- Nahrungs- und Futtermittelabfälle		
- Ölverunreinigte Papier- und Stoffabfälle		

Tafel 3-4: Einsatz und durchschnittliche Heizwerte von Sekundärbrennstoffen 1998 [3].

4 Energie

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurde 1998 durchschnittlich 2905 MJ Brennstoffenergie und 104,7 kWh elektrische Energie eingesetzt (Tafeln 4-1 und 4-2). Brennstoffenergie wird im wesentlichen für das Brennen des Klinkers benötigt; elektrische Energie wird vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 35 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers

(ca. 22 %) und für die Zementmahlung (ca. 38 %) verwendet.

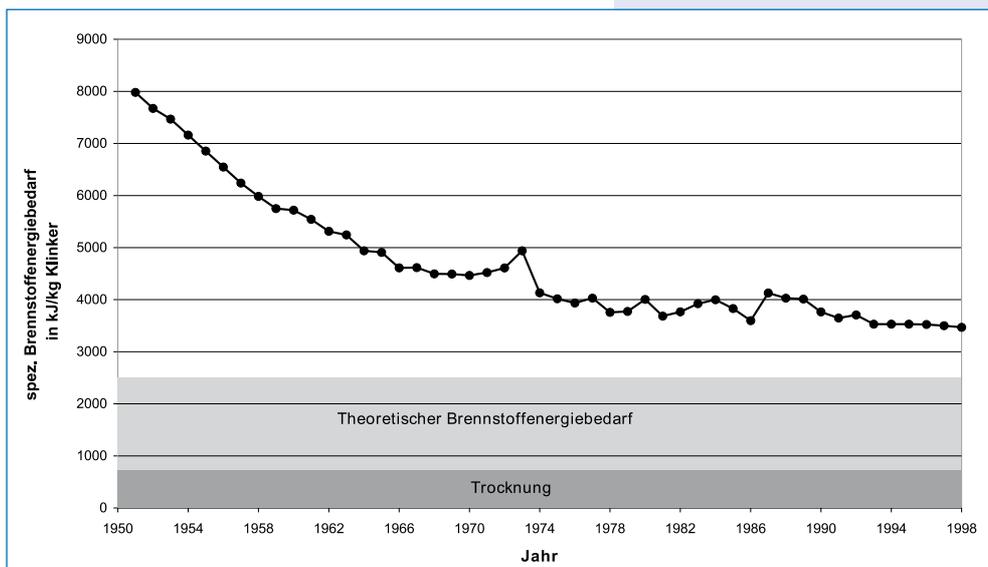


Bild 4-1: Entwicklung des spezifischen Brennstoffenergiebedarfs (Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987) [5]. Anmerkung: In dieser Darstellung wird die Brennstoffenergie auf Klinker bezogen.

Die Entwicklung des spezifischen thermischen Energieverbrauchs in der Zementindustrie von 1950 bis 1998 (ab 1987 inklusive der neuen Bundesländer) zeigt die deutliche Verringerung des Energiebedarfs während der letzten 50 Jahre. Sie ist vor allem auf

Verbesserungen bei der Anlagen- und Verfahrenstechnik zurückzuführen. Nach 1990 hat u. a. die Modernisierung

der Zementwerke in den neuen Bundesländern zu einer weiteren Abnahme des spezifischen Brennstoffenergieverbrauchs beigetragen.

Jahr	Brennstoffenergieverbrauch	
	absolut [Mio. GJ/a]	spezifisch [kJ/kg Zement]
1996	97,6	2.995
1997	99,3	2.975
1998	100,7	2.905

Tafel 4-1: Absoluter und spezifischer Brennstoffenergieverbrauch [5].

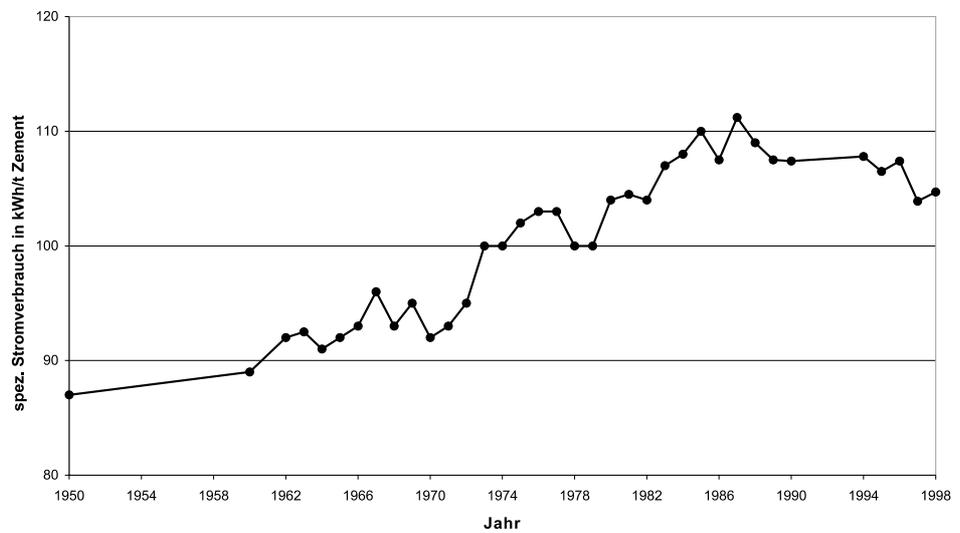


Bild 4-2: Entwicklung des spezifischen Stromverbrauchs (Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987) [5].

Höhere Anforderungen an die Produktqualität sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes waren die wesentlichen Ursachen für den tendenziell steigenden Stromverbrauch der letzten Jahrzehnte (Bild 4-2). In jüngster Zeit trugen u. a. Verbesserungen in der Mahltechnik zu einer Stabilisierung des spezifischen Stromverbrauchs bei.

Jahr	Elektrischer Energieverbrauch	
	absolut [Mio. MWh/a]	spezifisch [kWh/t Zement]
1996	3,50	107,4
1997	3,47	103,9
1998	3,63	104,7

Tafel 4-2: Absoluter und spezifischer elektrischer Energieverbrauch [5].

5 Emissionen

Die Errichtung und der Betrieb von Zementwerken unterliegt den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach Brennstoffeinsatz werden unterschiedliche Anforderungen an die einzuhaltenen Emissionskonzentrationen gestellt. Falls ausschließlich Regelbrennstoffe eingesetzt werden, sind

Messobjekt	Norm, Richtlinie
Gesamtstaub	ISO 10155 VDI 2066, Blatt 4 VDI 2066, Blatt 6
Schwermetalle - Probenahme - Analyse	VDI 3868, Blatt 1, 2E VDI 2268, Blatt 1 - 4
Schwefeloxide	VDI 2462, Blatt 7
Stickstoffoxide	VDI 2456, Blatt 6
Kohlenstoffmonoxid	VDI 2459, Blatt 6
Gasförmige, anorganische Chlorverbindungen	DIN EN 1911, Teil 1 - 3
Gasförmige, anorganische Fluorverbindungen	VDI 2470, Blatt 1
Dioxine, Furane - Probenahme - Analyse	DIN EN 1948, Teil 1 DIN EN 1948, Teil 2 - 3
Polyaromatische Kohlenwasserstoffe - Probenahme - Analyse	VDI 3499, Blätter 1E, 2E DIN EN 1948, Teil 1 VDI 3873, Blatt 1
Organische Stoffe	DIN EN 12619 E
Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol	VDI 3482, Blatt 4

die Regelungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) maßgeblich. Wird ein Teil der Regelbrennstoffe durch Abfälle als Sekundärbrennstoffe 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 beson-

Tafel 5-1: Messverfahren für Emissionen.

derem Anlass als auch erstmalige und wiederkehrende Messungen anordnen, die nur von zugelassenen Messstellen durchgeführt werden dürfen.

Zur Bestimmung der Emissionen von Zementwerken stehen dabei sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Messverfahren zur Verfügung, die in entsprechenden VDI-Richtlinien und DIN-Normen beschrieben sind (Tafel 5-1). Kontinuierlich werden hauptsächlich Staub, NO_x und SO_2 gemessen; die anderen immissionsrechtlich relevanten Parameter werden in der Regel diskontinuierlich auf der Basis von Einzelmessungen bestimmt.

Die in diesem Kapitel dargestellten Messergebnisse [3] beruhen auf den gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsmessungen an Drehrohrofenanlagen der deutschen Zementindustrie. Kontinuierlich gemesse-

ne Emissionen (Staub, NO_x, SO₂) wurden dabei in Jahresmittelwerte umgerechnet. Für die Messwerte der diskontinuierlich gemessenen Emissionen wurden für jede Ofenanlage Mittelwerte aus den jeweiligen Einzelmessungen bestimmt. Sämtliche Messwerte sind auf 1 m³ trockenes Abgas im Normzustand mit einem Sauerstoffgehalt von 10 % bezogen.

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

5.1 Klimarelevante Gase / Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Zum weit überwiegenden Teil ist dies Kohlenstoffdioxid (CO₂). Andere klimarelevante Gase, wie z. B. Distickstoffoxid (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 (CaCO₃) und haben einen Anteil von etwa 60 % an den CO₂-Gesamtemissionen. Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Tafel 5-2 werden die CO₂-Emissionen diesen Anteilen entsprechend aufgeführt.

spezifische und absolute CO ₂ -Emissionen					
Jahr	thermisch bedingt	elektrisch bedingt	rohstoffbedingt	Summe	Einheit
1996	0,245	0,072	0,451	0,768	t CO ₂ /t Zement
1997	0,231	0,070	0,453	0,754	t CO ₂ /t Zement
1998	0,218	0,070	0,443	0,731	t CO ₂ /t Zement

Im Jahr 1995 hat sich die deutsche Zementindustrie gemeinsam mit anderen energieintensiven Industriebranchen verpflichtet, ihren

Tafel 5-2: CO₂-Emissionen der Zementindustrie [5].

Beitrag zum Klimaschutz zu leisten und den spezifischen Brennstoffenergieverbrauch von 1987 bis 2005 um 20 % zu senken. Da das verfahrenstechnische Potenzial zur Energieverbrauchsminderung heute praktisch erschöpft ist, konzentrieren sich die zukünftigen Anstrengungen auf den Ersatz fossiler Brennstoffe durch Sekundärbrennstoffe sowie die verstärkte Herstellung von Zementen mit anderen Hauptbestandteilen als Zementklinker. Sekundärbrennstoffe ersetzen beim Klinkerbrennprozess heizwertäquivalent fossile Brennstoffe. Entsprechend werden die CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Sekundärbrennstoffen im Zementwerk insgesamt reduziert.

Für die Erzeugung von 1 t Portlandzement müssen während der Produktion ca. 1,5 bis 1,7 t Rohmaterialien, 0,1 t Kohle sowie 1 t Klinker (abzüglich der weiteren Hauptbestandteile und Sulfatträger) staubfein gemahlen werden. Wesentliche Emissionsquellen für die staubförmigen Komponenten liegen dabei in den Bereichen Rohmaterialaufbereitung, Brennstoffaufbereitung, Klinkerbrennprozess sowie Zementmahlung. Während es in den 50er-Jahren am Kamin von Drehofenanlagen der Zementindustrie noch zu Staubemissionen von bis zu 3.000 mg/m³ kam, ist es heute möglich, sie auf 30 mg/m³ zu begrenzen (Bild 5-1).

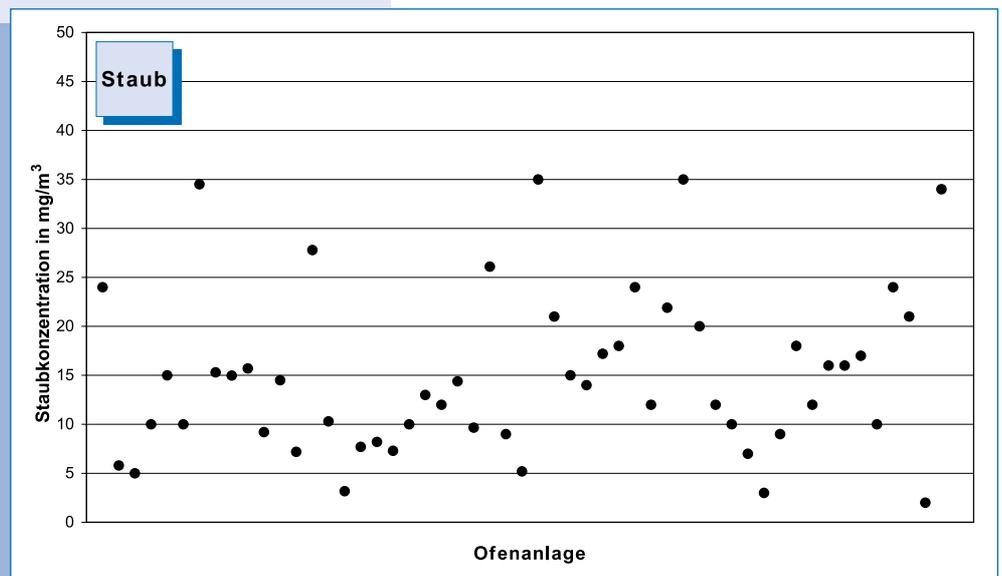


Bild 5-1: Jahresmittelwerte (Jahr 1998) der Staubkonzentration aus kontinuierlicher Überwachung des Reingases von 53 Drehofenanlagen.

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 entsprechenden Emissionen der deutschen Zementindustrie sind in Bild 5-2 aufgeführt.

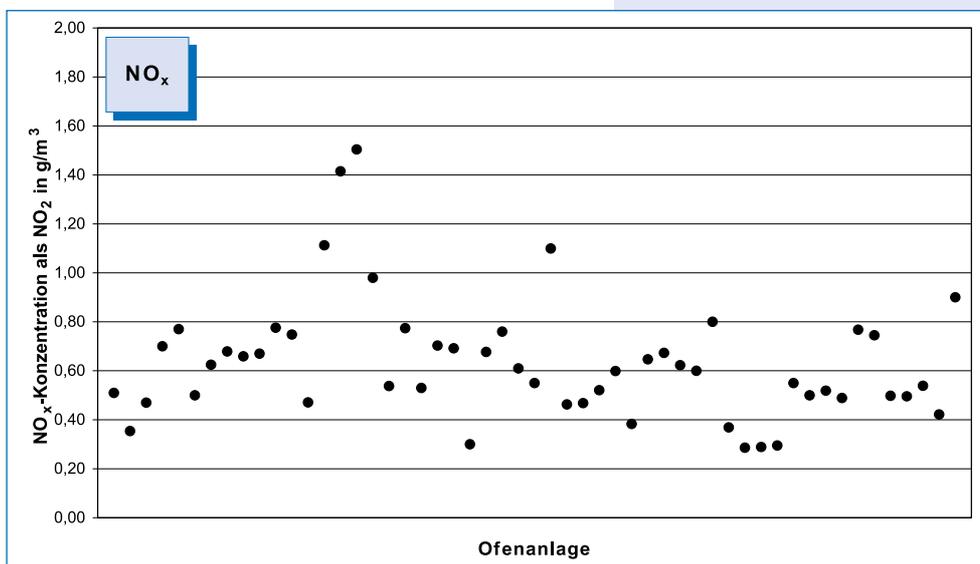


Bild 5-2: Jahresmittelwerte (Jahr 1998) der NO_x-Konzentration im Abgas aus kontinuierlicher Überwachung des Reingases von 53 Drehofenanlagen.

Anmerkung: Im Jahr 1998 überstiegen die Emissionen mehrerer Ofenanlagen die heute in der TA Luft für Zementwerke vorgesehenen Emissionswerte. Die Betriebsgenehmigungen für diese Werke beruhen noch auf höheren NO_x-Grenzwerten. Vier dieser Anlagen sind bzw. werden demnächst stillgelegt, eine weitere wird mit einer Anlage zur NO_x-Minderung nachgerüstet.

Die prozessbedingten NO_x-Gehalte im Abgas von Drehofenanlagen würden ohne Minderungsmaßnahmen in den meisten Fällen die heute gültigen Vorgaben der TA Luft (0,50 g/m³ für Neuanlagen sowie 0,80 g/m³ für bestehende Anlagen) deutlich übersteigen. Minderungsmaßnahmen betreffen eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Darüber hinaus wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um auf verschiedene Weise die anspruchsvollen NO_x-Grenzwerte einhalten zu können: in 1999 wurden sieben Anlagen mit gestufter Verbrennung und ca. 20 Anlagen mit SNCR-Verfahren betrieben.

Die hohen Prozesstemperaturen in der Zementindustrie sind erforderlich, um das Rohstoffgemisch in Portlandzementklinker umzuwandeln. In der Sinterzone des Drehofens betragen die Brennguttemperaturen etwa 1.450 °C. Um sie zu erreichen, sind Flammentemperaturen von ca. 2.000 °C erforderlich sind. Aus Gründen der Klinkerqualität findet der Brennvorgang unter oxidierenden Bedingungen statt. Unter diesen Voraussetzungen überwiegt die partielle Oxidation des molekularen Stickstoffs der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid, die auch als thermische NO-Bildung bezeichnet wird.

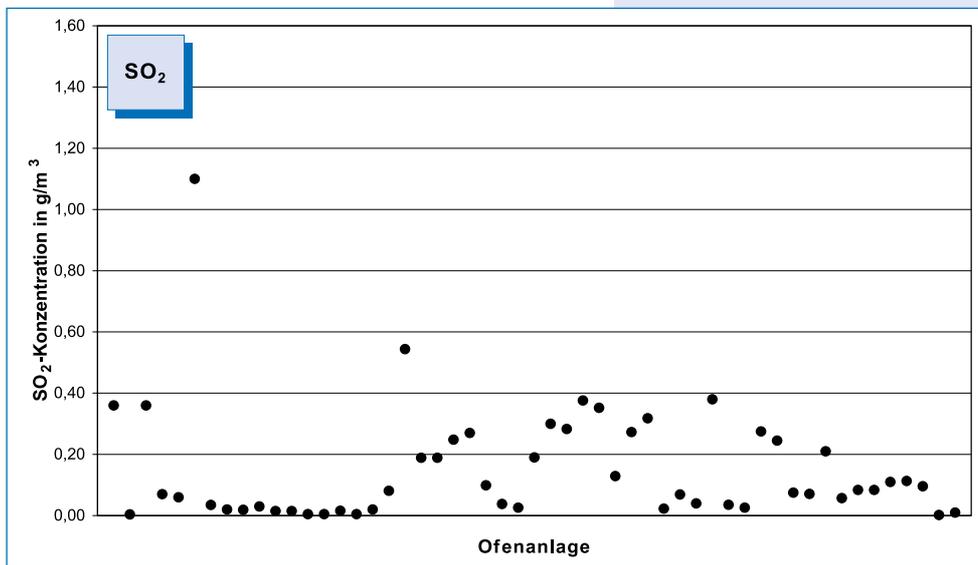
Die thermische NO-Bildung ist bei den niedrigeren Temperaturen in einer Zweitfeuerung hingegen kaum von Bedeutung: hier kann der im Brennstoff gebundene Stickstoff zum so genannten brennstoffbedingten NO führen.

5.4 Schwefeldioxid (SO₂)

Schwefel wird dem Klinkerbrennprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen.

Ursache höherer SO₂-Emissionen von Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen, sulfidischen Schwefelverbindungen sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370 °C und 420 °C zu SO₂ oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor.

Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die SO₂-Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu etwa 1,2 g/m³ betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO₂-Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11



5.5 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC)

Der Gehalt an Kohlenstoffmonoxid und organisch gebundenem Kohlenstoff im Abgas ist bei Energieumwandlungsanlagen, wie z. B. Kraftwerken, ein Maß für den Ausbrand der eingesetzten Brennstoffe. Der Klinkerbrennprozess ist dagegen ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Gründen der Klinkerqualität stets mit Luftüberschuss betrieben werden muss. In Verbindung mit langen Verweilzeiten im Hochtemperaturbereich führt dies zu einem vollständigen Brennstoffausbrand.

Ursache der Emissionen von Kohlenstoffmonoxid und organisch gebundenem Kohlenstoff beim Klinkerbrennprozess sind 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 zu Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid oxidiert. Dabei werden auch geringe Anteile organischer Spurengase (organischer Gesamtkohlenstoff) gebildet. Der im Reingas vorliegende Gehalt an Kohlenstoffmonoxid und organischen Spurengasen lässt beim Klinkerbrennprozess somit keinen Rückschluss auf die Verbrennungsbedingungen zu.

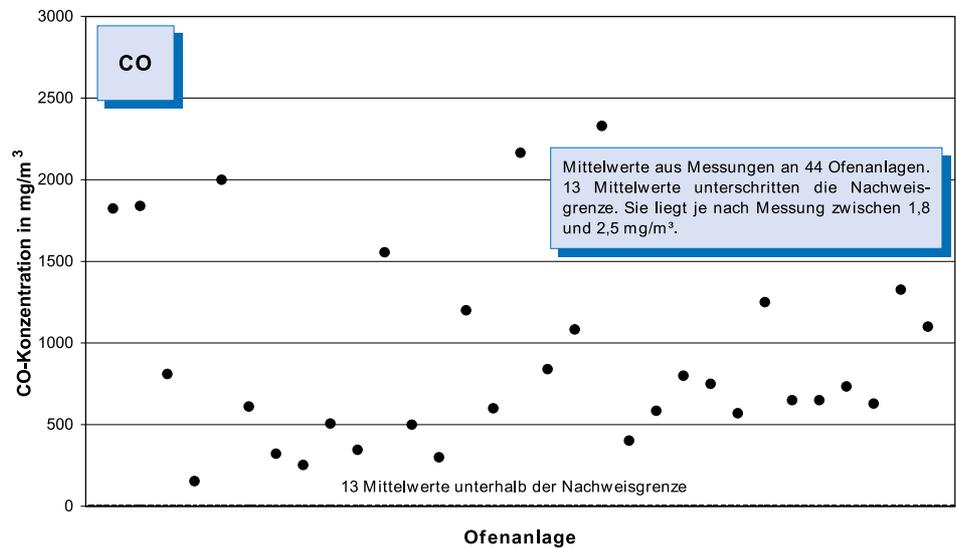


Bild 5-4: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der CO-Konzentration im Reingas von 44 Drehofenanlagen.

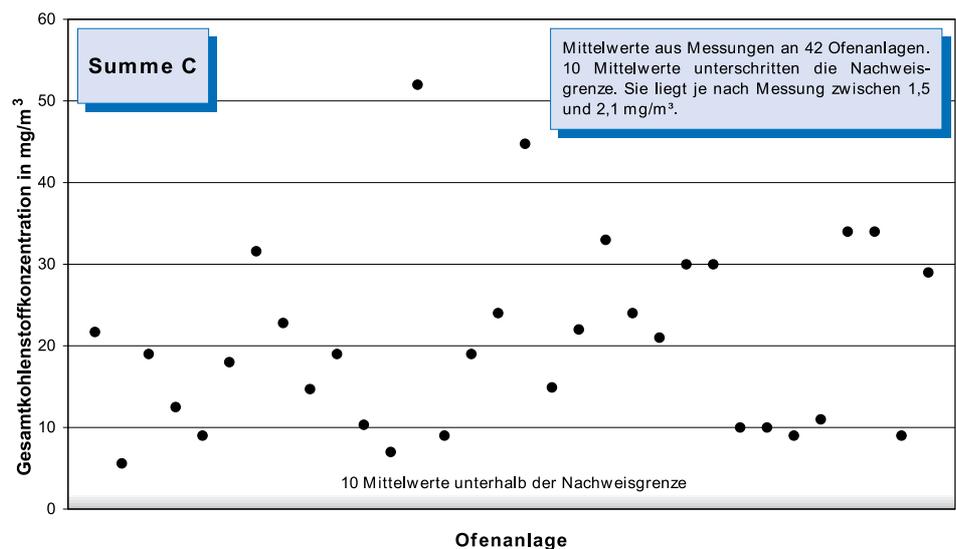


Bild 5-5: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration von organischem Gesamtkohlenstoff im Reingas von 42 Drehofenanlagen.

5.6 Dioxine und Furane (PCDD/F)

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

Polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane (kurz: Dioxine und Furane) liegen deshalb in Abgasen

von Drehöfen der Zementindustrie nur in sehr geringen Konzentrationen vor (Bild 5-6). Untersuchungen haben gezeigt, dass sie unabhängig von der Art der Einsatzstoffe sind und durch verfahrenstechnische Maßnahmen nicht beeinflusst werden können.

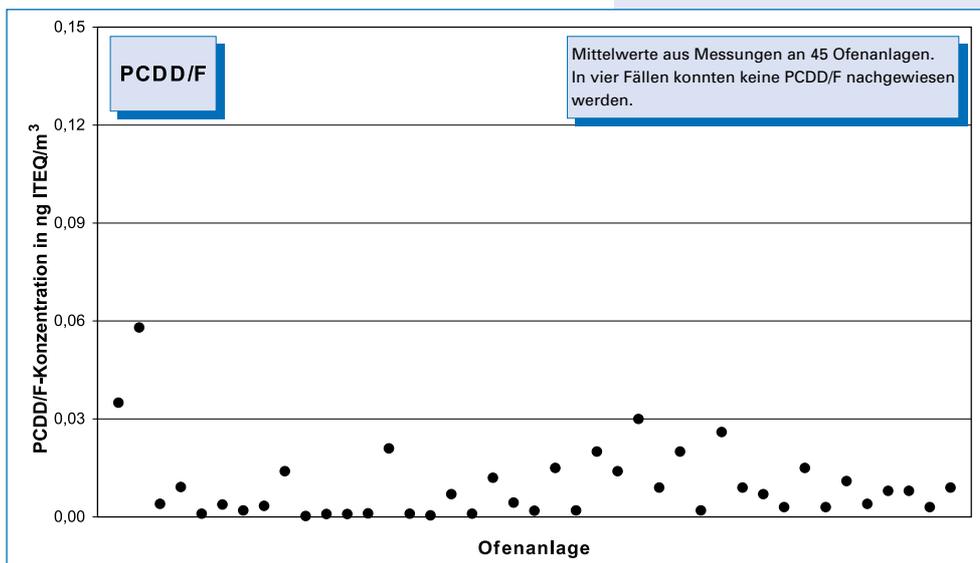


Bild 5-6: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) im Reingas von 45 Drehofenanlagen. In vier Fällen konnten keine PCDD/F nachgewiesen werden.

Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Nachweisgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Laboratorien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948 $\pm 0,05$ ng ITEQ/m³. (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent)

5.7 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Das Emissionsverhalten der PCB ist mit dem der Dioxine und Furane vergleichbar. PCB können mit den Sekundärroh- und -brennstoffen in den Prozess gelangen. In der Drehofenanlage ist eine praktisch vollständige Zerstörung gewährleistet (Bild 5-7).

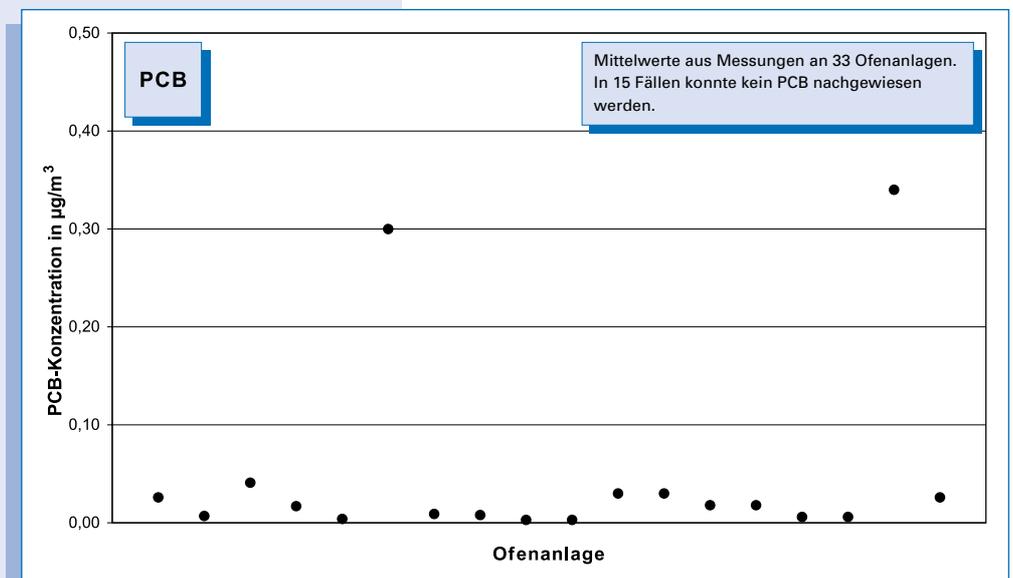


Bild 5-7: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration von polychlorierten Biphenylen (PCB nach DIN 51527) im Reingas von 33 Drehofenanlagen. In 15 Fällen konnte kein PCB nachgewiesen werden.

Anmerkung: Für die Messung von PCB im Reingas von Drehofenanlagen gibt es keine genormte Prüfvorschrift, in der die Genauigkeit der eingesetzten Messverfahren festgelegt wird. Nachweisgrenzen lassen sich deshalb nicht angeben. Bei den derzeit eingesetzten Verfahren sind gemessene Emissionskonzentrationen unterhalb von $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Wesentlichen durch Störeinflüsse geprägt.

5.8 Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im Abgas von Drehofenanlagen liegt i. A. eine Verteilung der polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (nach EPA 610) vor, in der Naphtalin mit einer Massenkonzentration von über 90 % dominiert. Bei optimaler Verbrennungsführung der Drehofenanlage ist eine weitreichende Zerstörung der aus den Brennstoffen stammenden polyaromatischen Kohlenwasserstoffe gewährleistet. Emissionen (Bild 5-8) entstammen den organischen Bestandteilen im Rohmaterial und sind Bestandteil der organischen Abgasbestandteile.

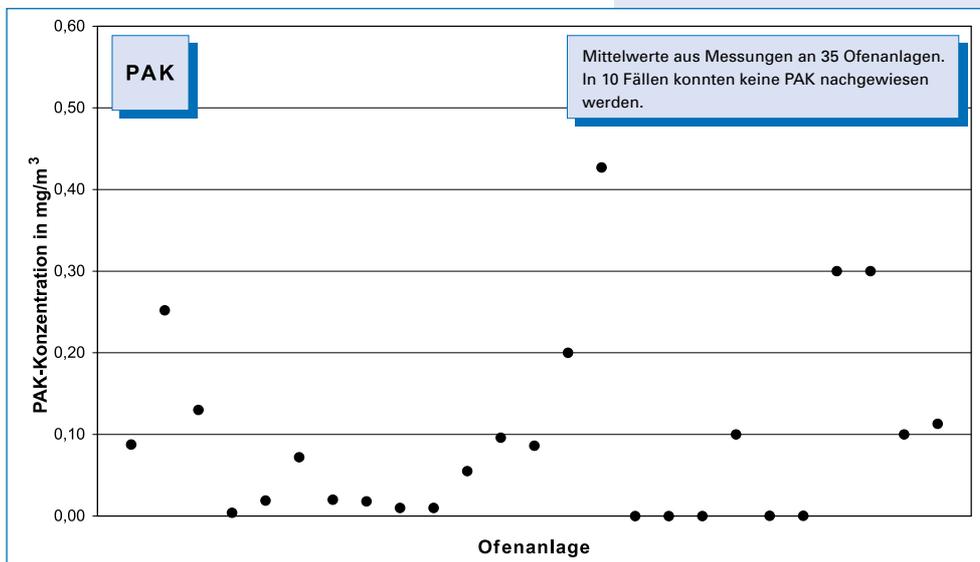


Bild 5-8: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration von polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK nach EPA 610) im Reingas von 35 Drehofenanlagen. In 10 Fällen konnten keine PAK nachgewiesen werden. Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten.

5.9 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegen die o. g. Verbindungen i. A. 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. Mittelwerte für die Emissionen des Jahres 1998 sind im Bild 5-9 dargestellt.

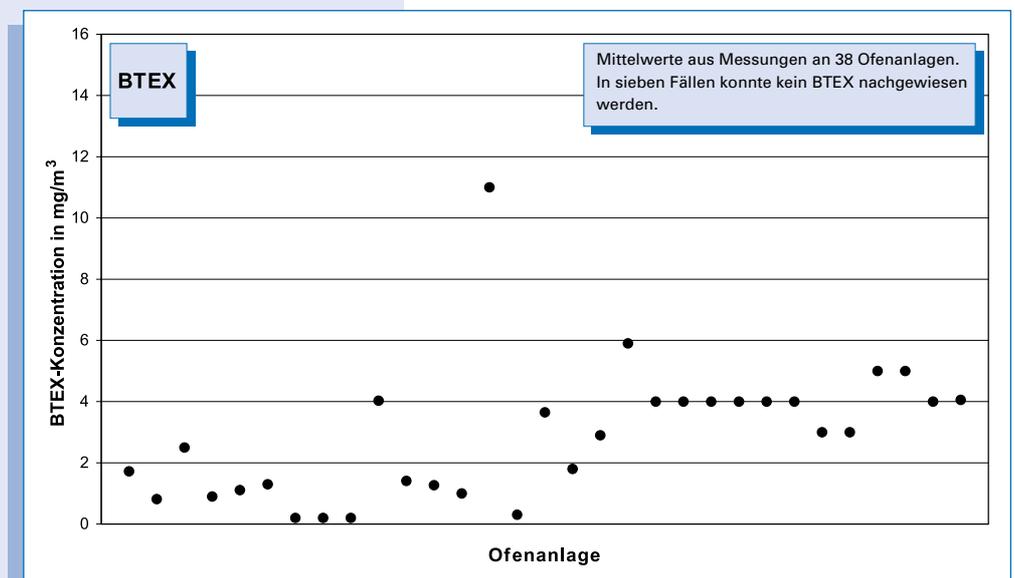


Bild 5-9: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration von BTEX im Reingas von 38 Drehofenanlagen. In sieben Fällen konnte kein BTEX nachgewiesen werden. Eine Nachweisgrenze lässt sich aus der Norm nicht ableiten.

5.10 Anorganische gasförmige Chlorverbindungen (HCl)

Rohmaterialien und Brennstoffe des Klinkerbrennprozesses enthalten als Nebenbestandteile Chloride. Sie werden beim Verbrennen der Brennstoffe oder dem 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 Drehrohfen und werden wieder verdampft. 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 (Bild 5-10). Das Auftreten von Chlorwasserstoff (HCl) im Abgas kann aufgrund der basischen Ofengasatmosphäre praktisch ausgeschlossen werden. Werden anorganische gasförmige Chloride im Abgas von Drehofenanlagen nachgewiesen, so ist dies i. A. auf feinste Kornfraktionen von Alkalichloriden im Reingasstaub zurückzuführen. Sie können Messgasfilter passieren und das Vorliegen der gasförmigen Verbindungen vortäuschen.

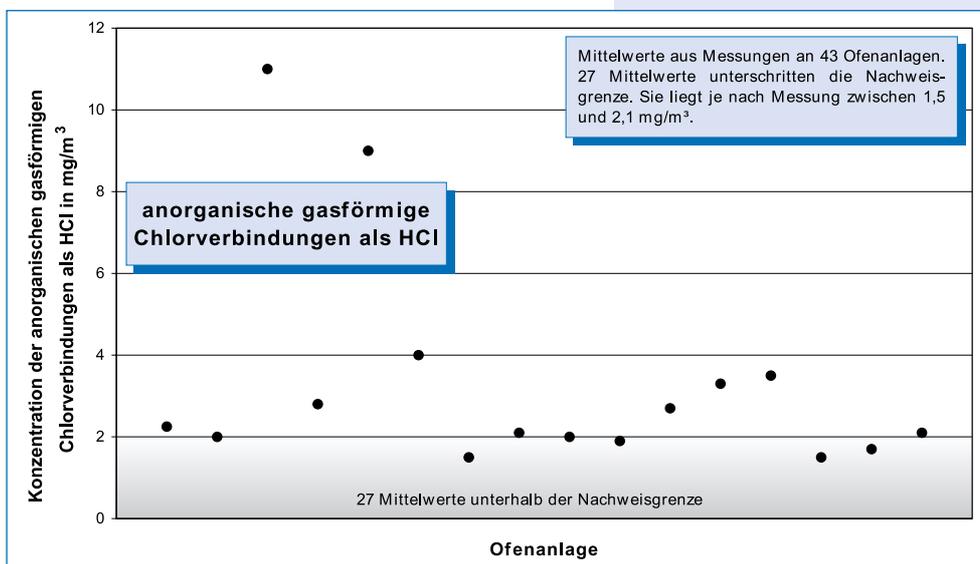


Bild 5-10: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration anorganischer gasförmiger Chlorverbindungen, berechnet als HCl, im Reingas von 43 Drehofenanlagen.

5.11 Anorganische gasförmige Fluorverbindungen (HF)

Fluor liegt in Drehrohröfen 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 Fluorwasserstoff, ist wegen des hohen Calcium-Überschusses praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das Messgasfilter passieren, können bei Drehofenanlagen der Zementindustrie geringe Gehalte an gasförmigen Fluorwasserstoffverbindungen vortäuschen (Bild 5-11).

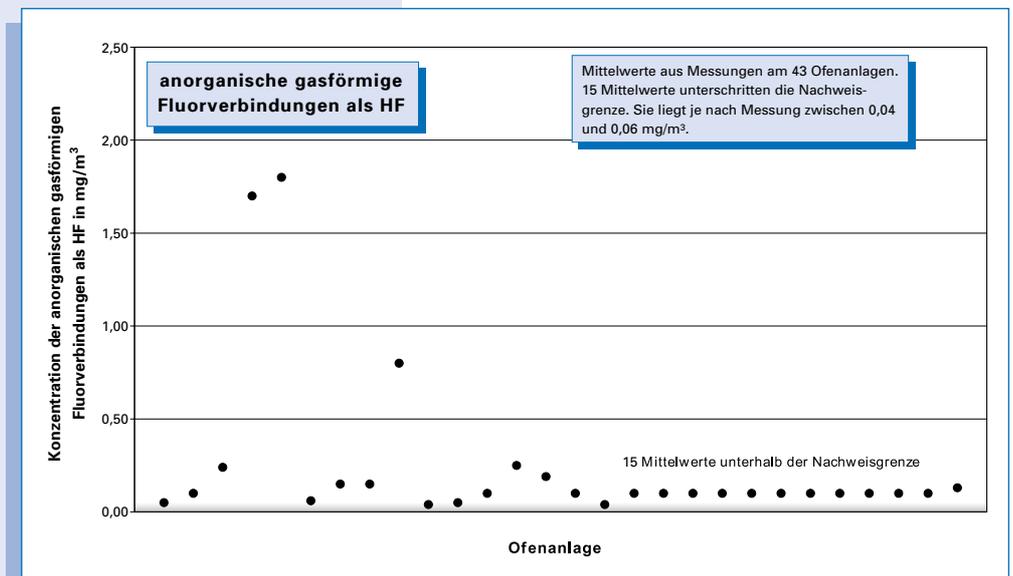


Bild 5-11: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Konzentration anorganisch gasförmiger Fluorverbindungen, berechnet als HF, im Reingas von 43 Drehofenanlagen.

5.12 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 Drehrohr-Ofens 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 die Ofenanlage beschränkt bleiben oder auch die Mahltrocknungsanlage mit einschließen.

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

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

Quecksilber und seine Verbindungen werden im 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.

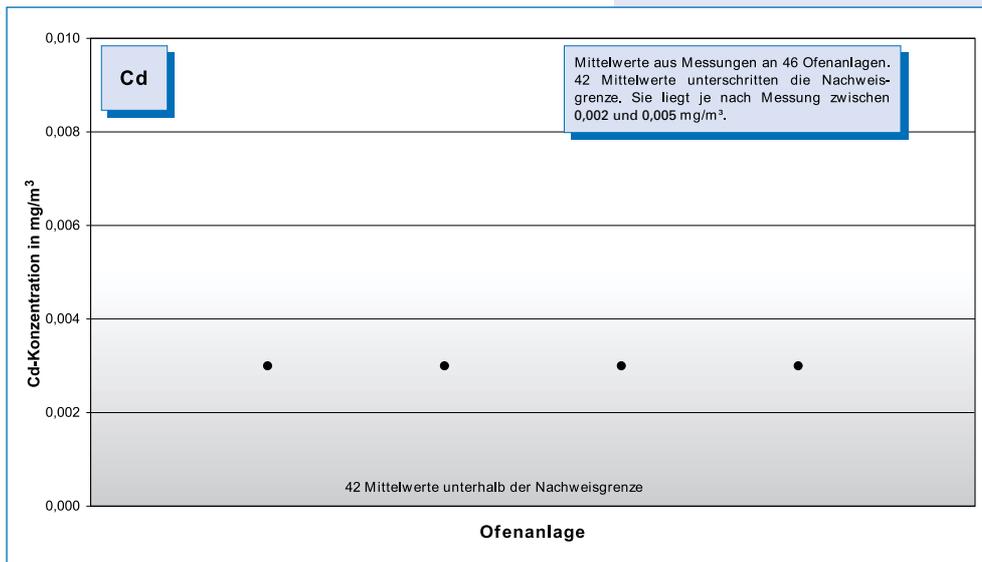


Bild 5-12: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Cadmium-Konzentration im Reingas von 46 Drehofenanlagen.

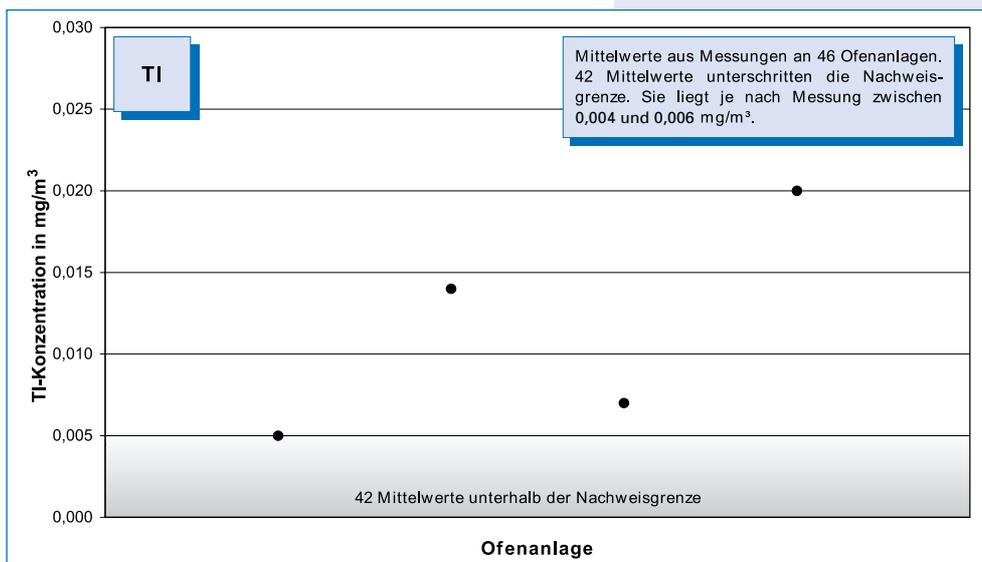


Bild 5-13: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Thallium-Konzentration im Reingas von 46 Drehofenanlagen.

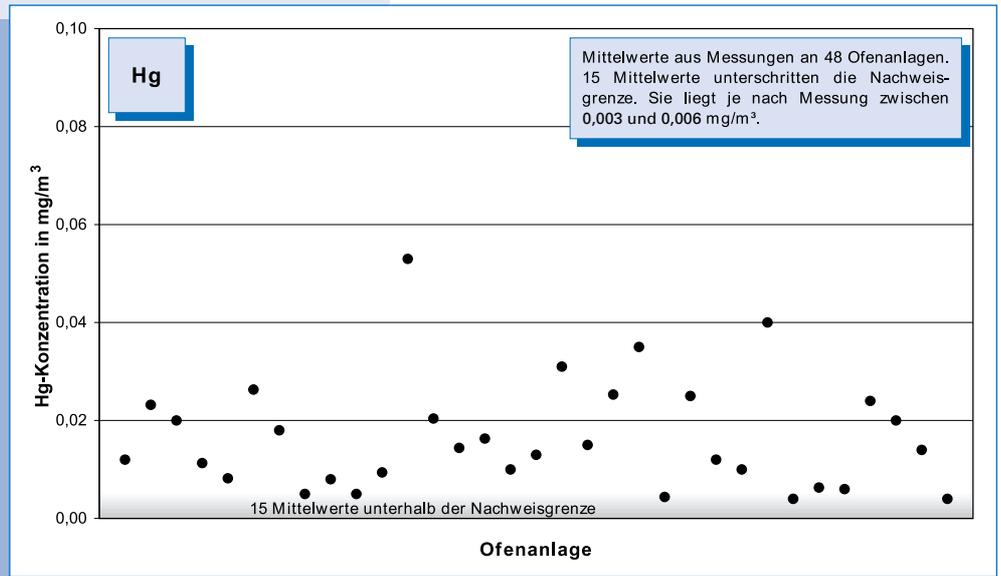


Bild 5-14: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Quecksilber-Konzentration im Reingas von 48 Drehofenanlagen. Anmerkung: Gemäß 17. BImSchV muss Quecksilber zukünftig kontinuierlich gemessen werden.

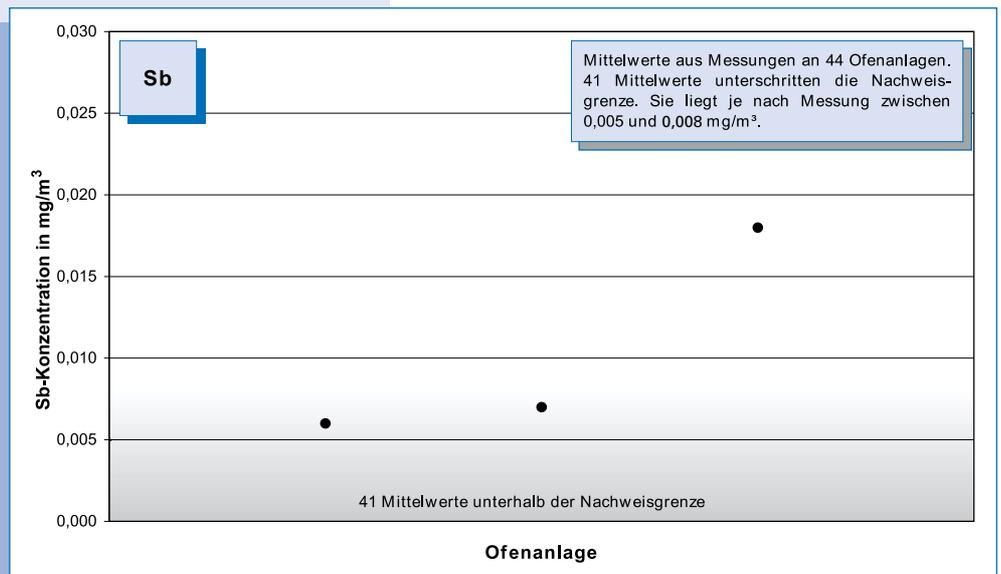


Bild 5-15: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Antimon-Konzentration im Reingas von 44 Drehofenanlagen.

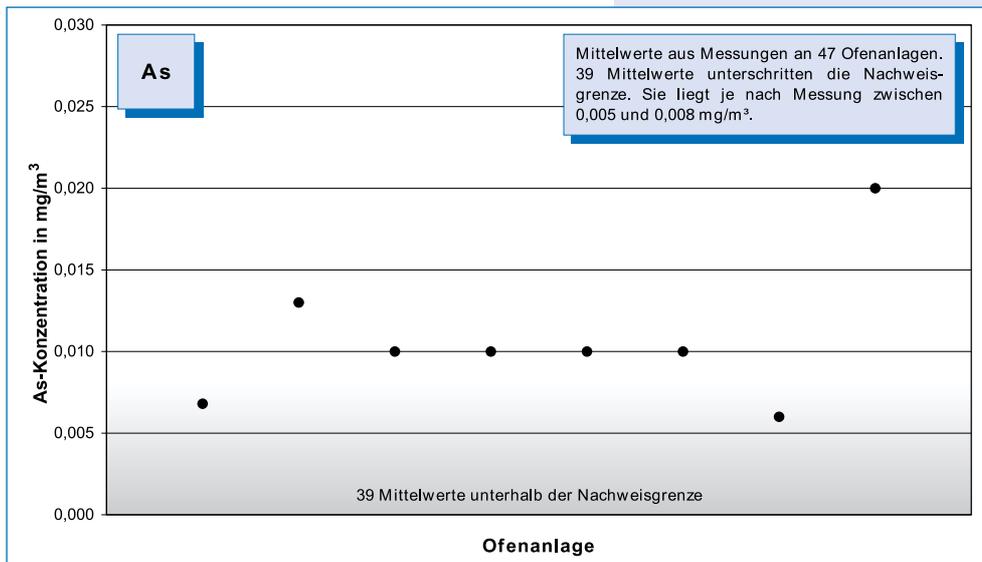


Bild 5-16: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Arsen-Konzentration im Reingas von 47 Drehofenanlagen.

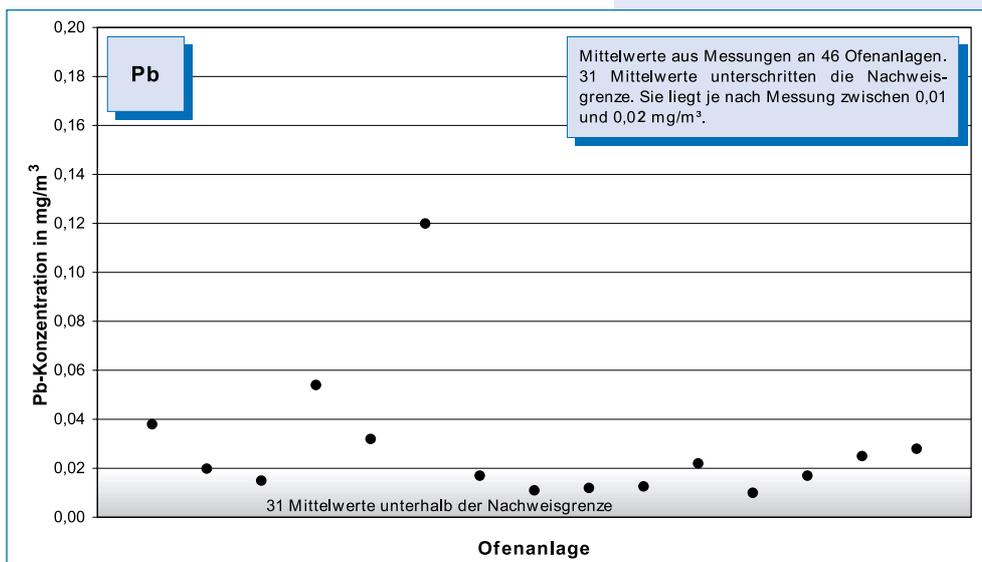


Bild 5-17: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Blei-Konzentration im Reingas von 46 Drehofenanlagen.

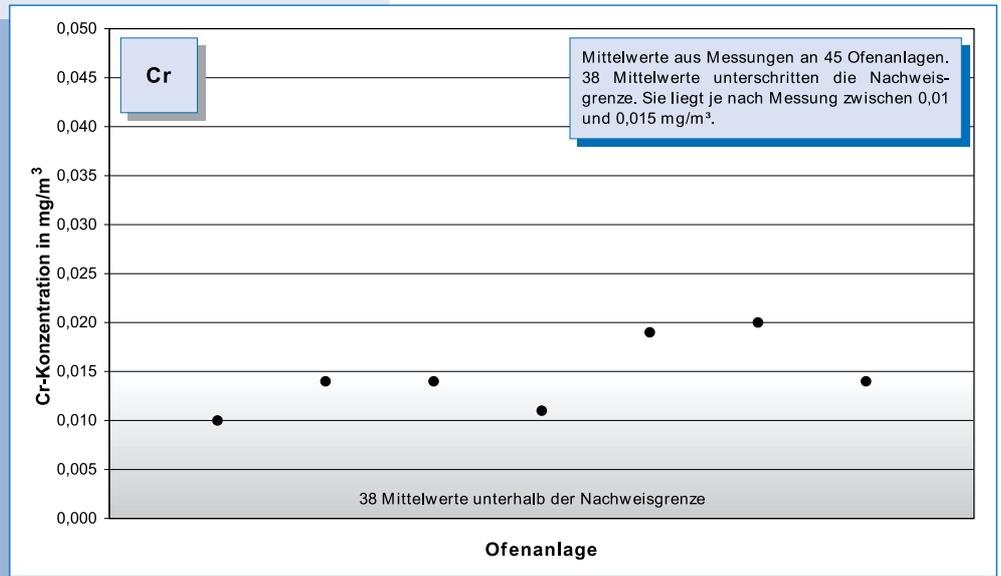


Bild 5-18: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Chrom-Konzentration im Reingas von 45 Drehofenanlagen. Anmerkung: Chrom liegt im Abgas nicht in sechswertiger Form vor.

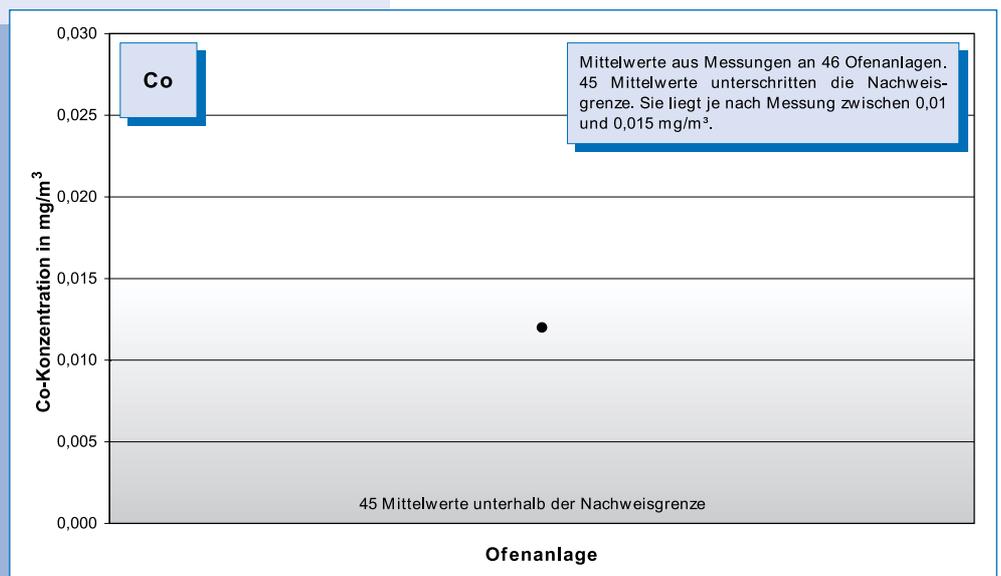


Bild 5-19: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Cobalt-Konzentration im Reingas von 46 Drehofenanlagen.

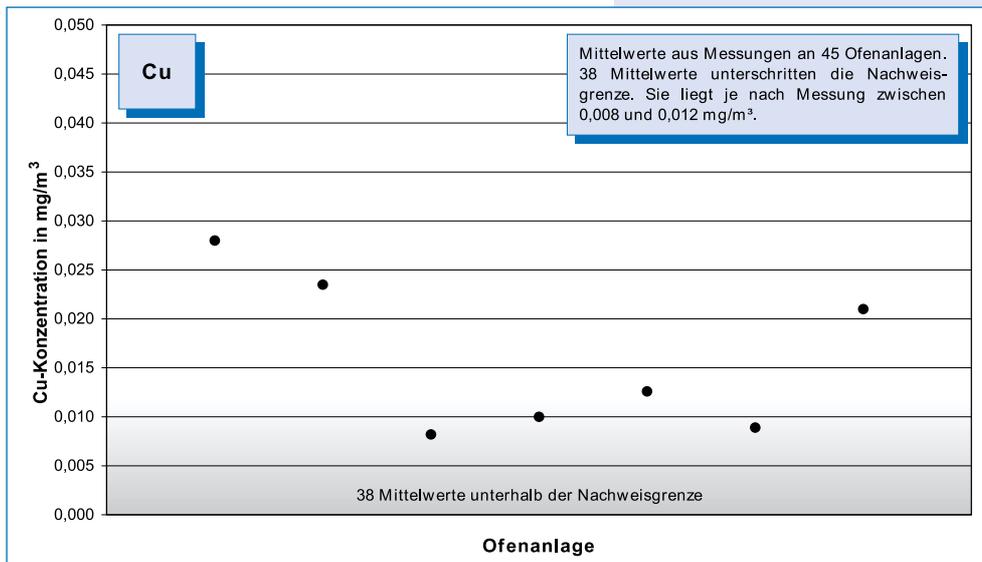


Bild 5-20: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Kupfer-Konzentration im Reingas von 45 Drehofenanlagen.

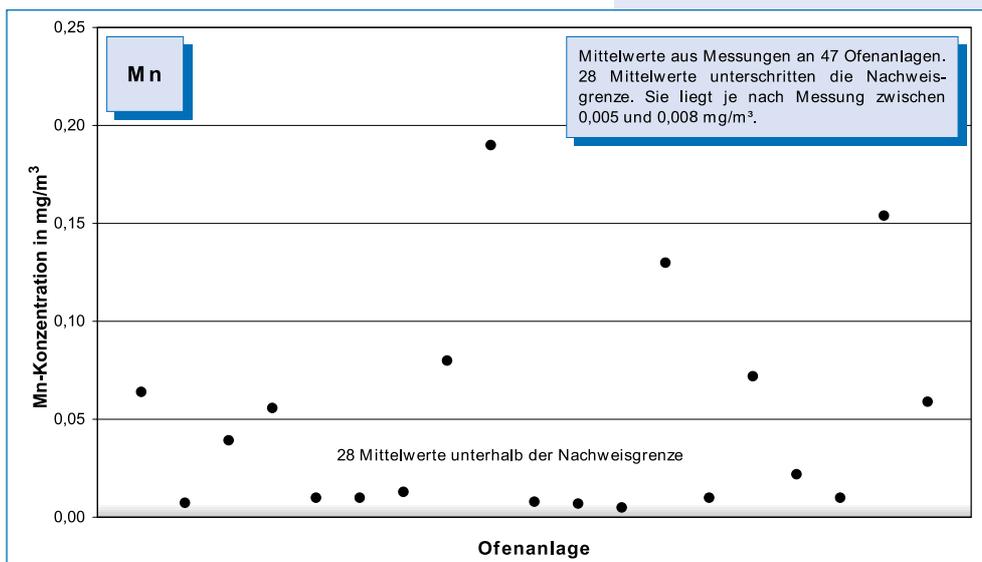


Bild 5-21: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Mangan-Konzentration im Reingas von 47 Drehofenanlagen.

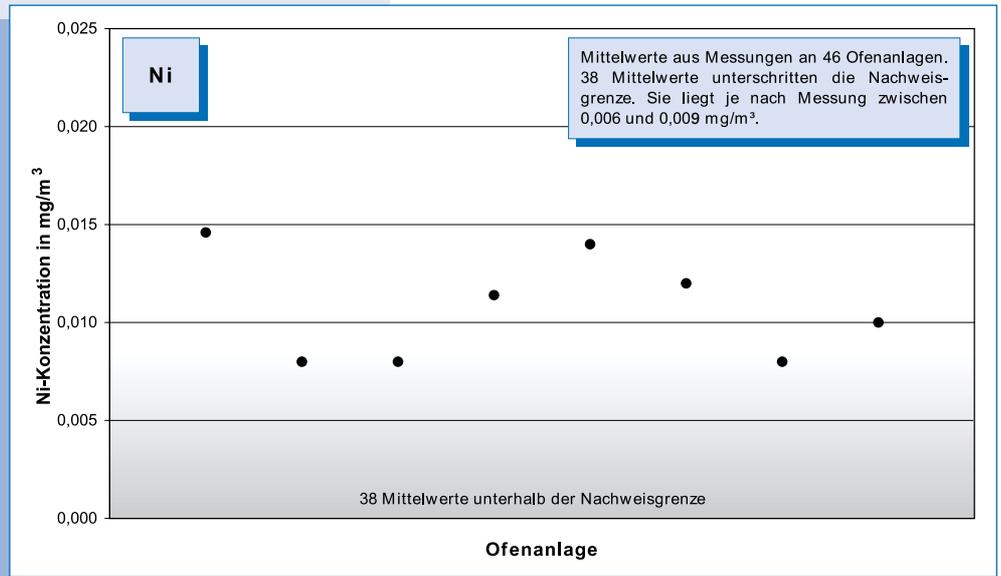


Bild 5-22: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Nickel-Konzentration im Reingas von 46 Drehofenanlagen.

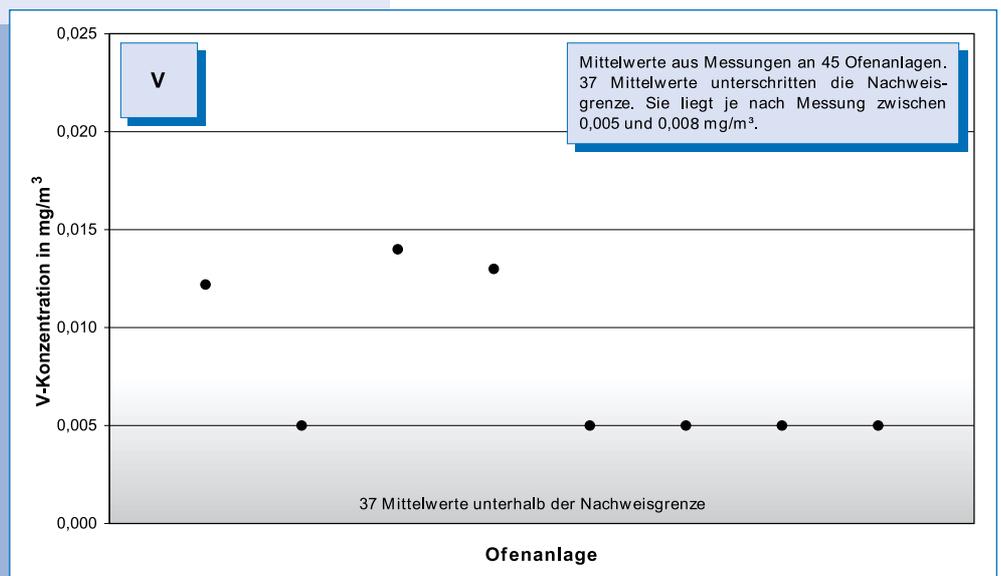


Bild 5-23: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Vanadium-Konzentration im Reingas von 45 Drehofenanlagen.

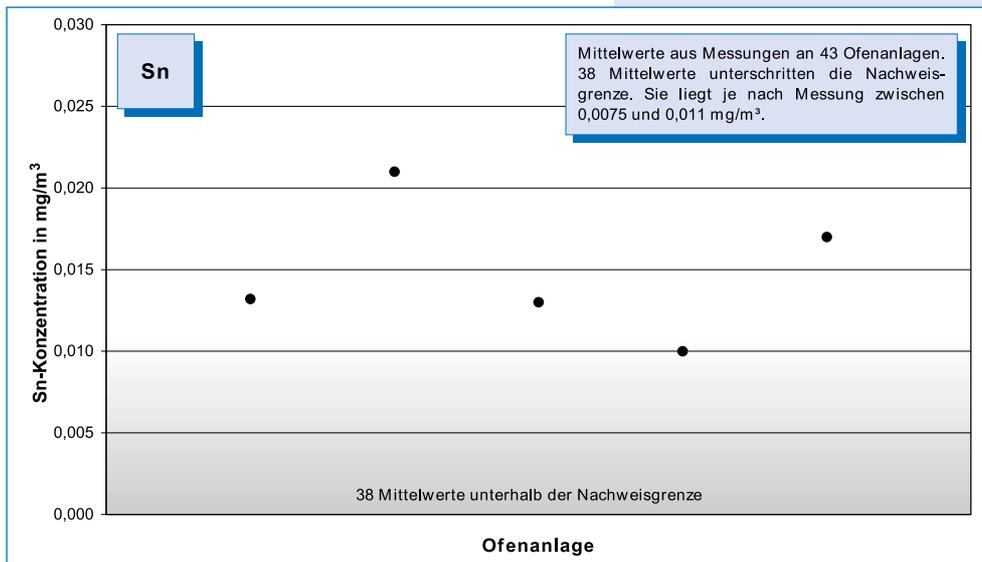


Bild 5-24: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Zinn-Konzentration im Reingas von 43 Drehofenanlagen.

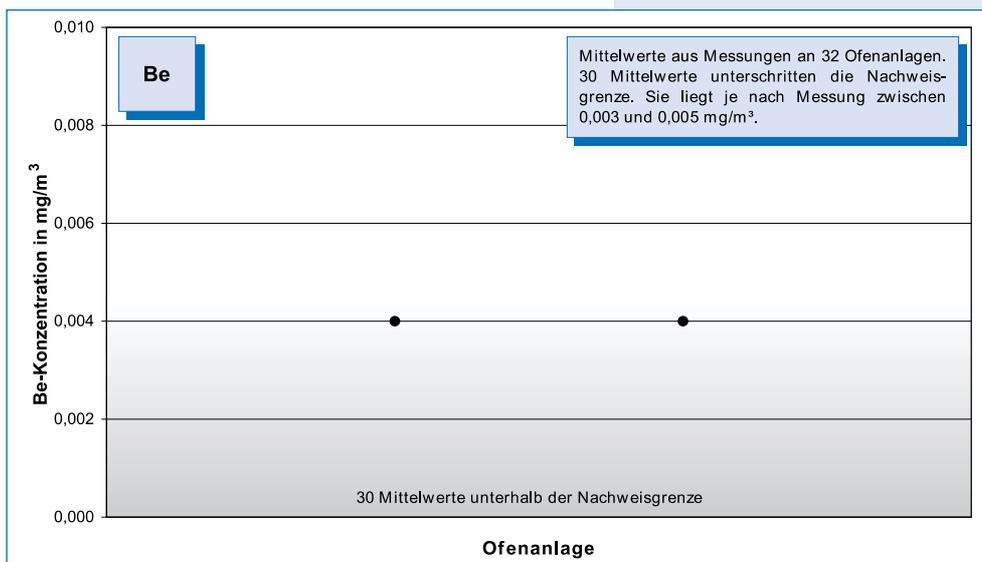


Bild 5-25: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Beryllium-Konzentration im Reingas von 32 Drehofenanlagen.

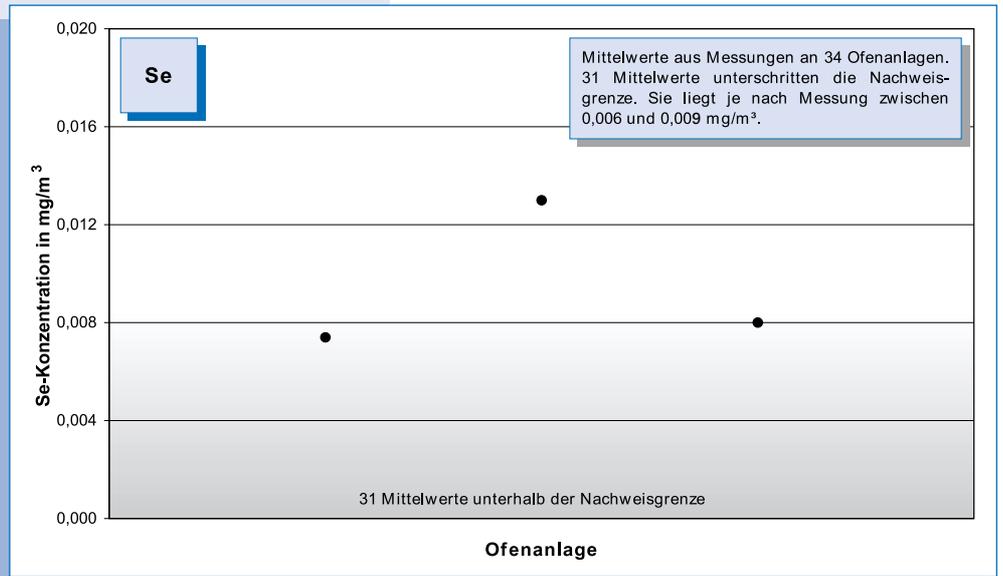


Bild 5-26: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Selen-Konzentration im Reingas von 34 Drehofenanlagen.

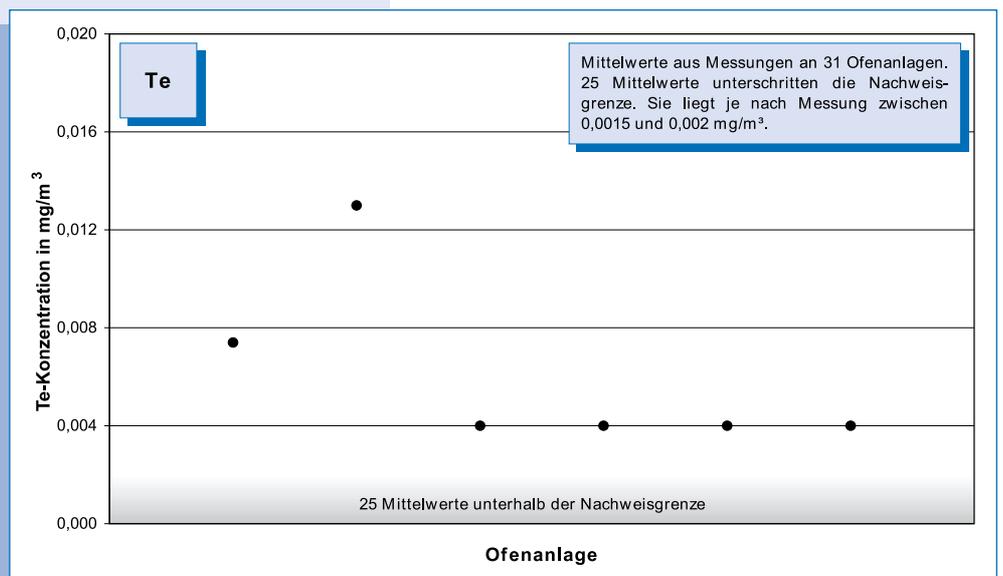


Bild 5-27: Mittelwerte aus Einzelmessungen (Jahr 1998) der Tellur-Konzentration im Reingas von 31 Drehofenanlagen.

6 Spurenelemente im Zement

Alle Einsatzstoffe zur Zement- und Betonherstellung enthalten Haupt-, Neben- und Spurenelemente. Dabei macht die Summe der Haupt- und Nebenelemente über 99 Gew.-Prozent aus. Für die entsprechenden Spurenelementgehalte in Zement und Beton sind die jeweiligen Mengen der Einsatzstoffe und deren Elementgehalte maßgebend. In den verwendeten Rohmaterialien können dabei Spurenelementgehalte vorliegen, die sich je nach Lagerstätte deutlich voneinander unterscheiden. Die Spurenelementgehalte von Betonen sind mit denen von natürlichen Gesteinen vergleichbar.

Die Freisetzungsrate von Spurenelementen aus Mörtel und Beton ist gering. Untersuchungen bestätigen, dass sie in der Zementsteinmatrix fest eingebunden sind. Darüber hinaus gewährleistet gefügedichter Beton einen hohen Diffusionswiderstand, der zusätzlich einer Freisetzung entgegenwirkt.

Untersuchungen an Mörteln und Betonprüfkörpern belegen, dass die Konzentrationen in Eluaten z. B. die Werte der Trinkwasser-Verordnung deutlich unterschreiten. Die Lagerung unter unterschiedlichen, zum Teil extremen Bedingungen hat zu keiner umweltrelevanten Freisetzung geführt. Das gilt auch, wenn das Probenmaterial vor dem Auslaugtest gebrochen und zerkleinert wurde.

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse einer umfangreichen Untersuchung zu Spurenelementgehalten von Zementen gezeigt. Es handelt sich hierbei um mehr als 400 Stichproben aus der Güteüberwachung deutscher Normzemente des Jahres 1998. Tafel 6-1 enthält die Ergebnisse einer Auswertung.

In einigen Bildern wurde als Beurteilungshilfe die Bestimmungsgrenze als grau unterlegter Bereich gekennzeichnet. Oberhalb dieses Bereiches lassen sich Konzentrationswerte quantitativ auswerten.

Spurenelement	Probenanzahl	Mittelwert [$\mu\text{g/g}$]
Arsen	417	6,8
Beryllium	417	0,7
Cadmium	417	0,4
Cobalt	418	10
Chrom	418	40
Kupfer	417	25
Quecksilber	416	0,07
Mangan	418	680
Nickel	418	24
Blei	418	27
Antimon	414	6,0
Selen	417	n. b.
Tellur	418	n. b.
Thallium	418	n. b.
Vanadium	418	56
Zink	418	140,0
Zinn	411	4,6

**Tafel 6-1: Spurenelemente in Normzementen
(n. b.: nicht bestimmbar)
Anmerkung: Werte unterhalb der
Bestimmungsgrenze wurden bei der
Mittelwertbildung mit dem halben Wert
der Bestimmungsgrenze berücksichtigt.**

Bei den Analysen hat sich gezeigt, dass wegen der vielfältigen potenziellen Fehlerquellen bei der Spurenelementanalytik Routineanalysen leicht zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Für die hier gezeigten Messergebnisse wurden die Zemente doppelt vollständig aufgeschlossen, indem sie in einem Gemisch aus Salpetersäure und Flusssäure in einem Mikrowellenofen behandelt wurden. Im Anschluss daran wurden die Elemente mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) mit der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) analysiert. Die Quecksilberbestimmung erfolgte dabei mit einem Fließinjektionssystem nach dem Kaltdampf-AAS-Verfahren. Für die übrigen AAS-Bestimmungen kam die Graphitrohrofen bzw. die Flammen-AAS-Technik zum Einsatz.

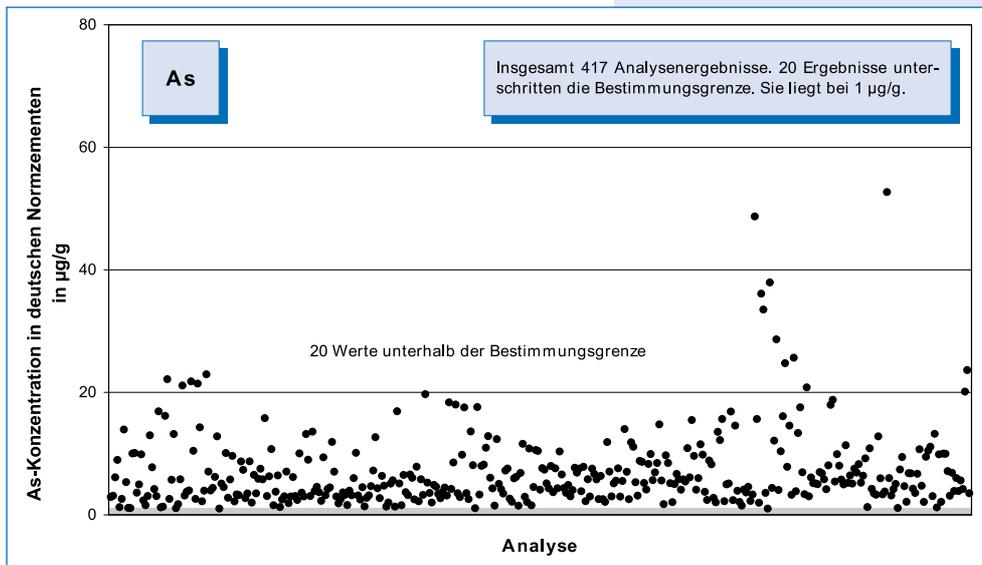


Bild 6-1: Arsen in Normzementen.

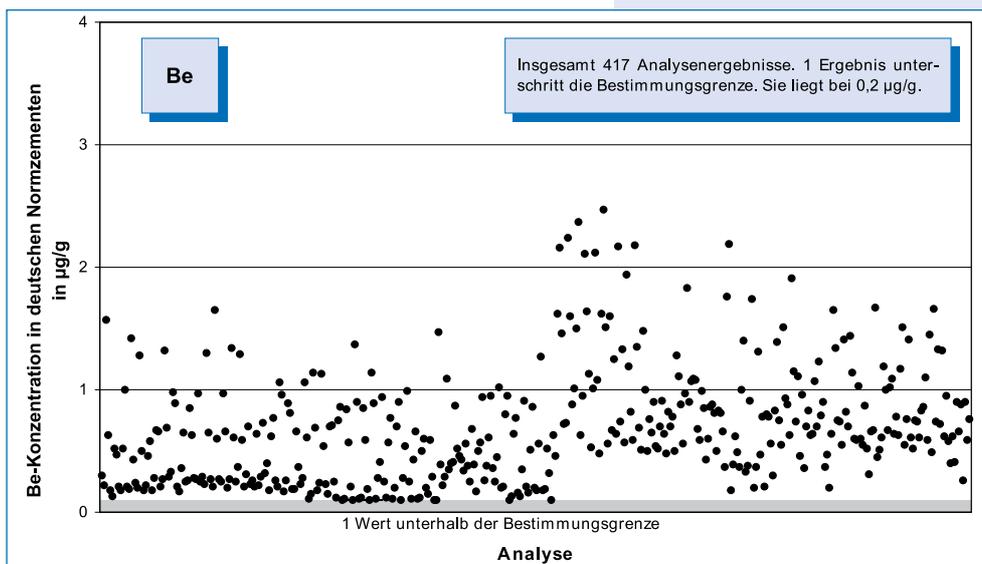


Bild 6-2: Beryllium in Normzementen.

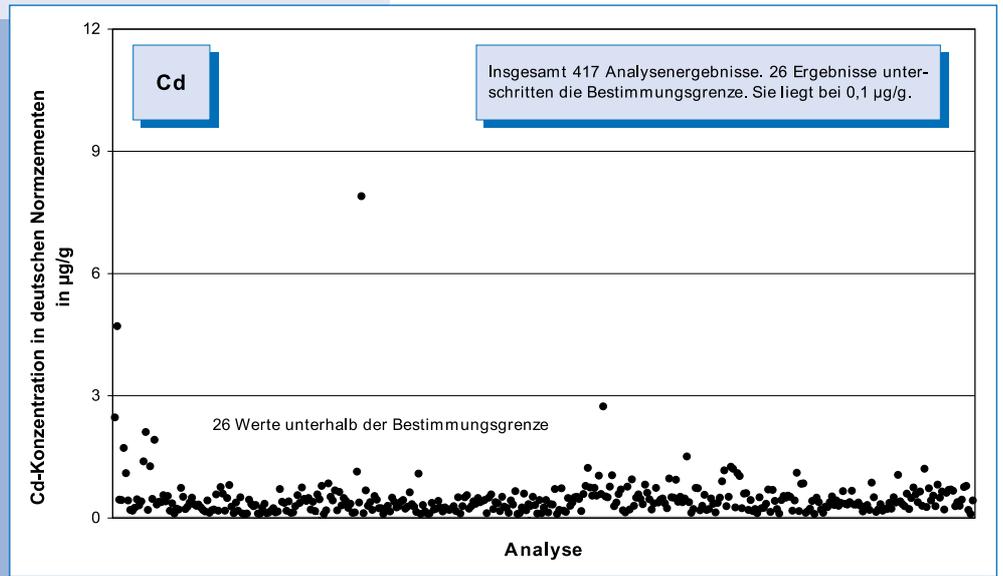


Bild 6-3: Cadmium in Normzementen.

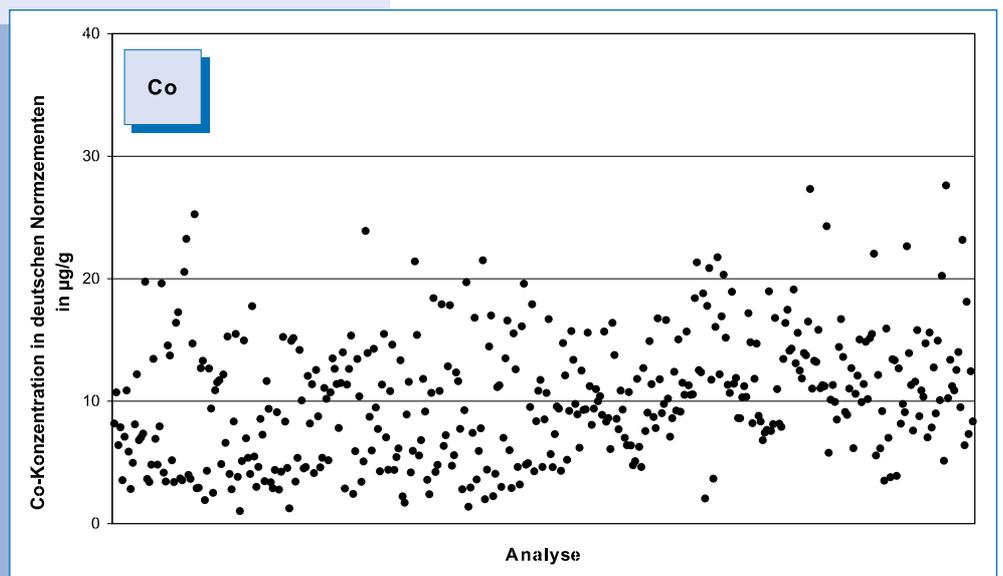


Bild 6-4: Cobalt in Normzementen.

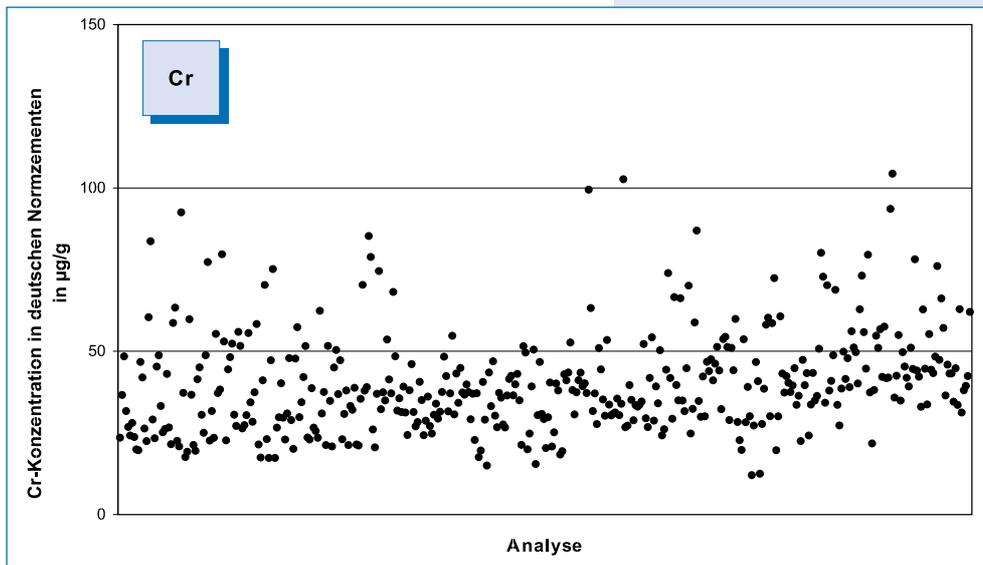


Bild 6-5: Chrom in Normzementen.

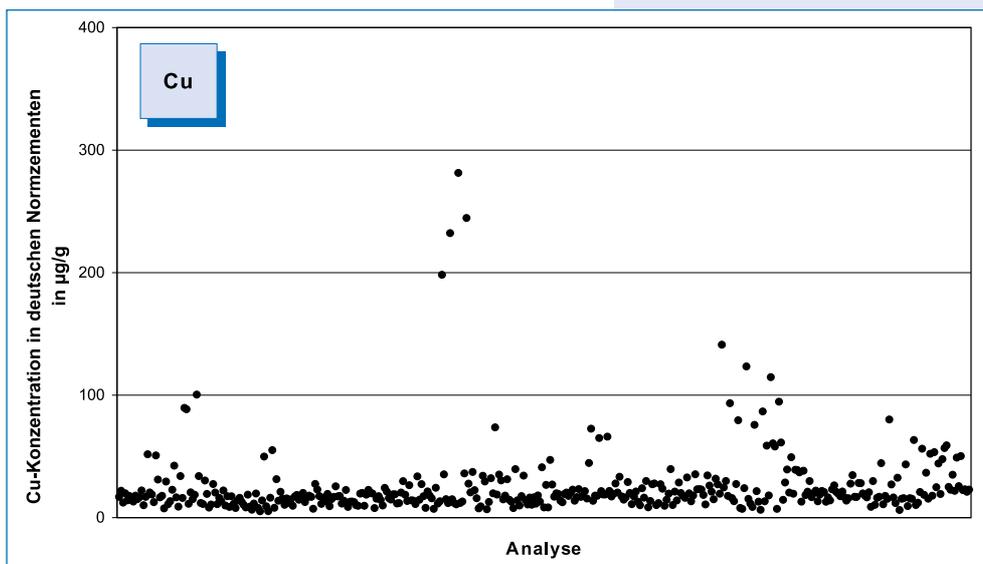


Bild 6-6: Kupfer in Normzementen.

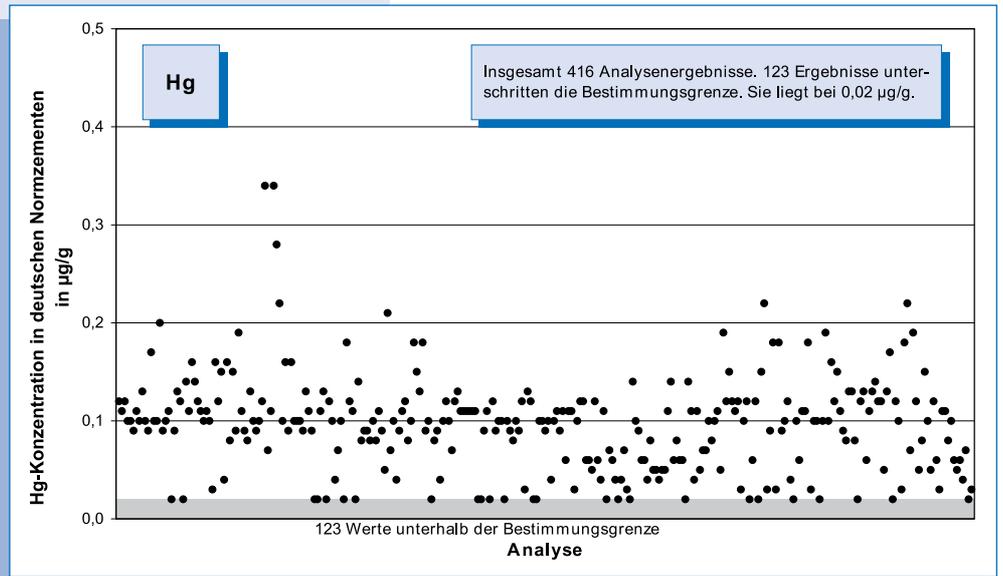


Bild 6-7: Quecksilber in Normzementen.

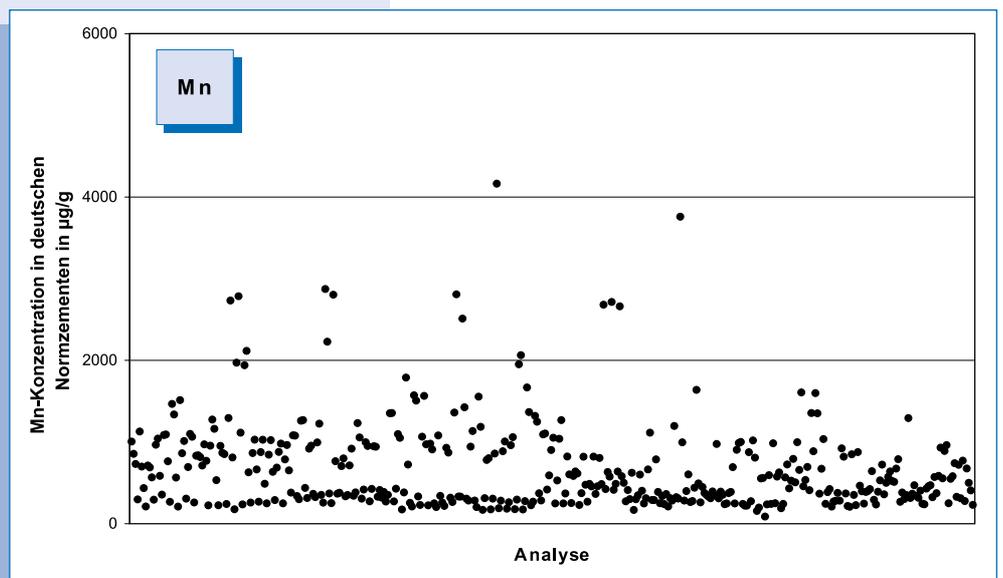


Bild 6-8: Mangan in Normzementen.

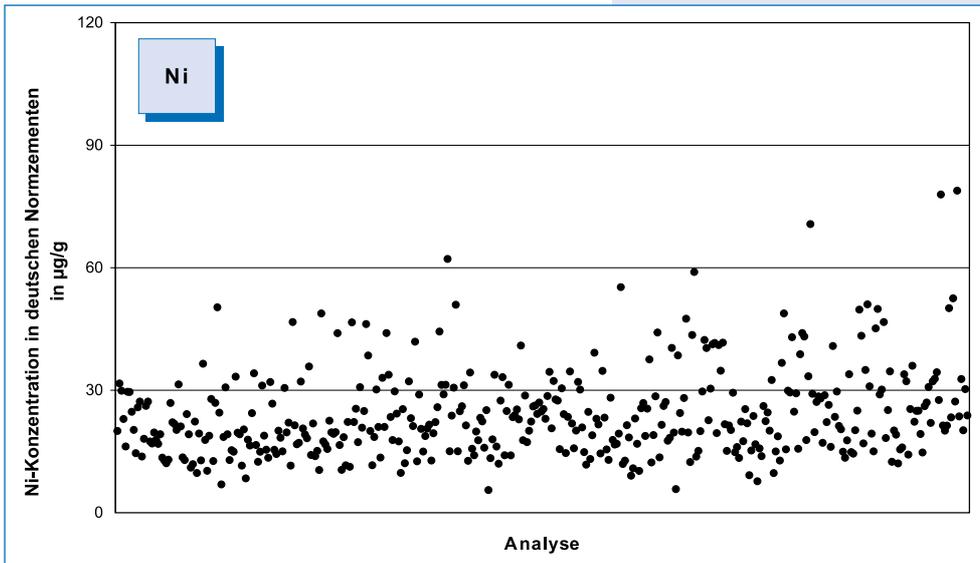


Bild 6-9: Nickel in Normzementen.

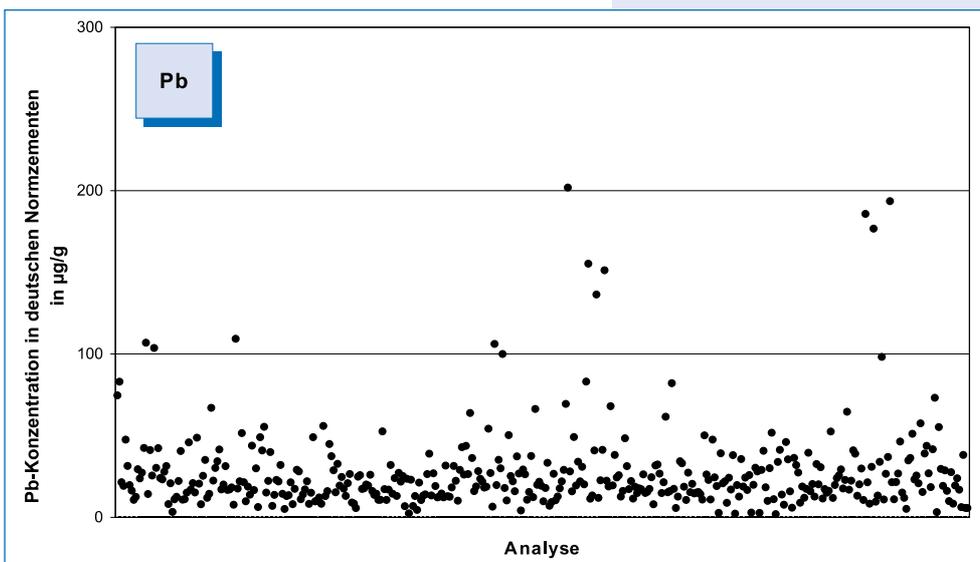


Bild 6-10: Blei in Normzementen.

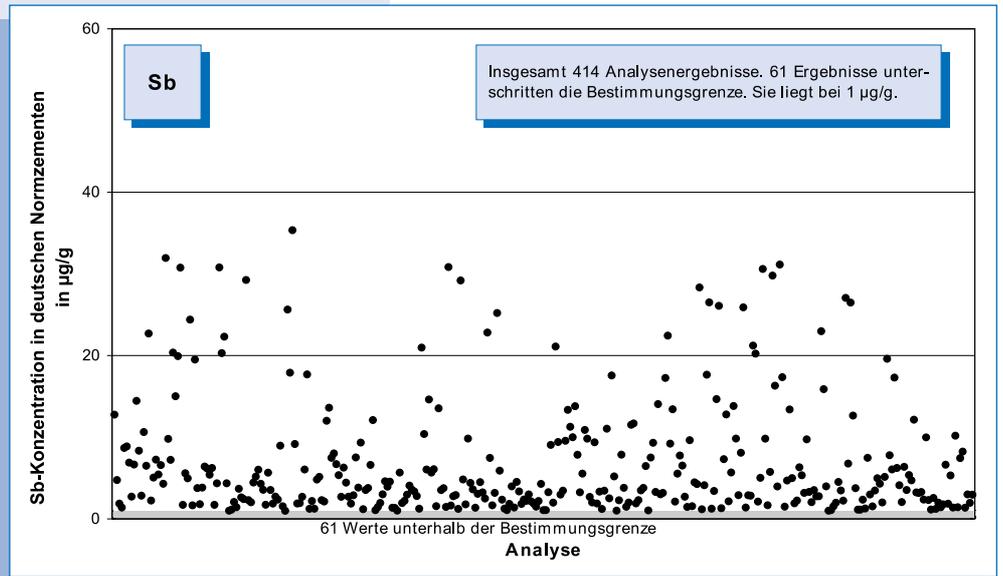


Bild 6-11: Antimon in Normzementen.

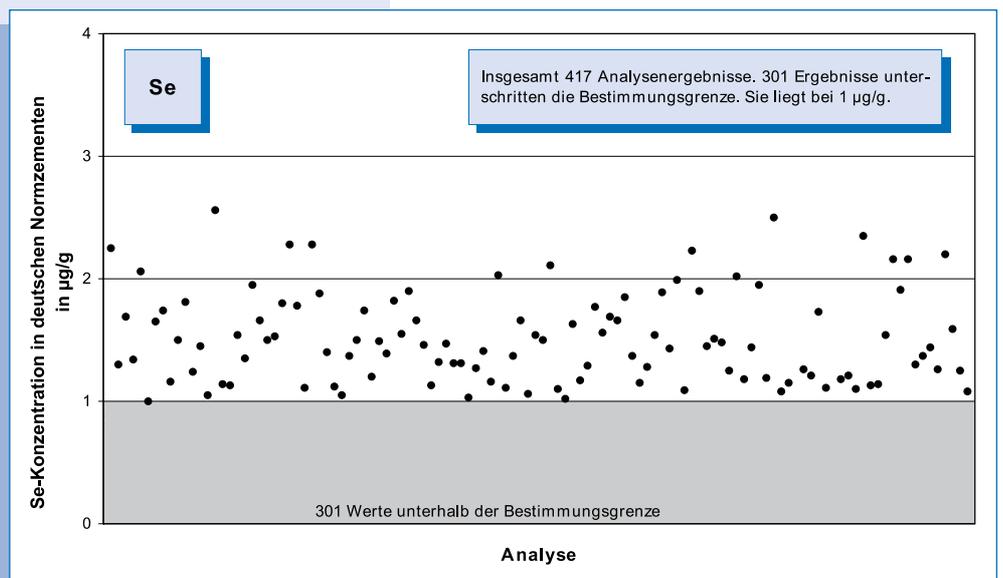


Bild 6-12: Selen in Normzementen.

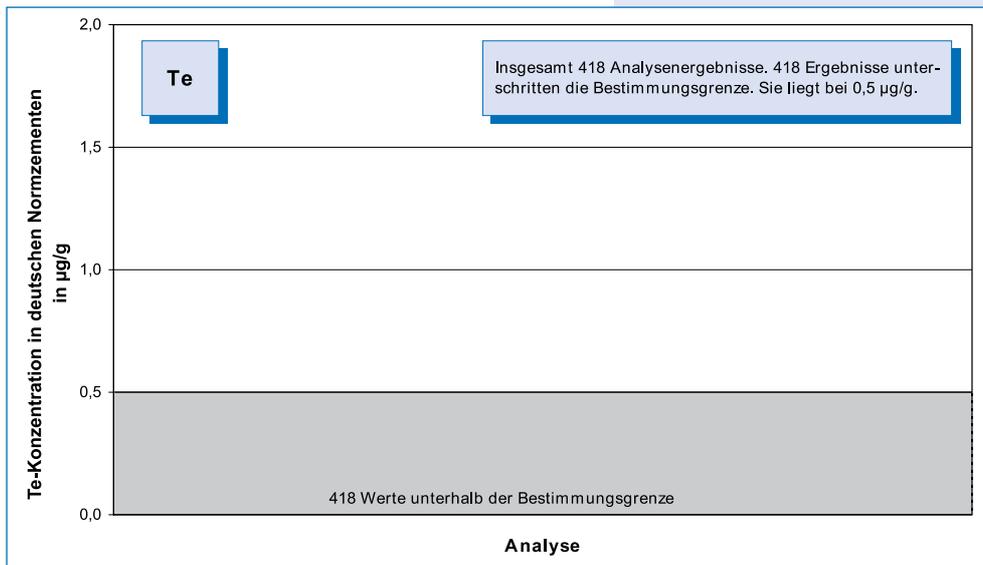


Bild 6-13: Tellur in Normzementen.

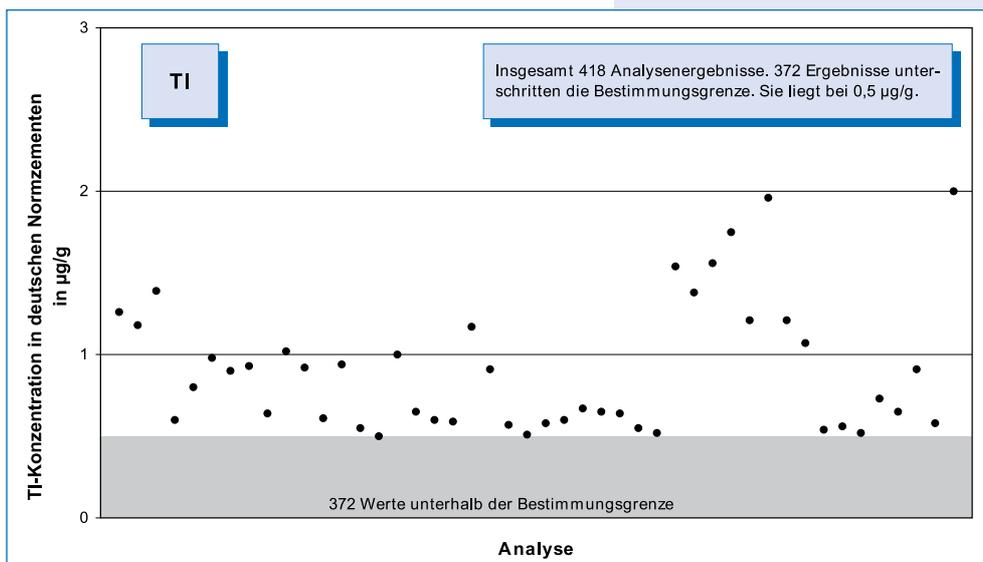


Bild 6-14: Thallium in Normzementen.

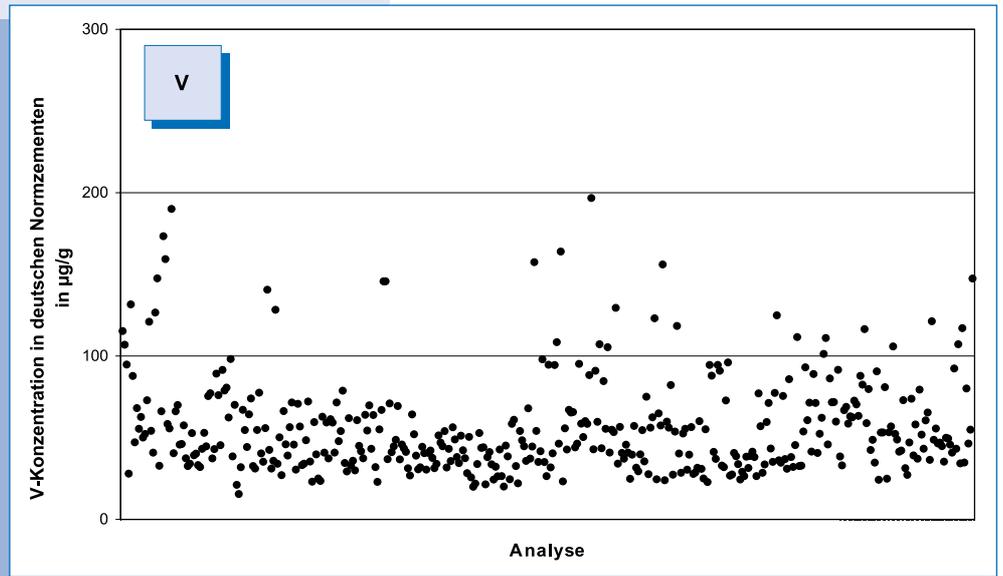


Bild 6-15: Vanadium in Normzementen.

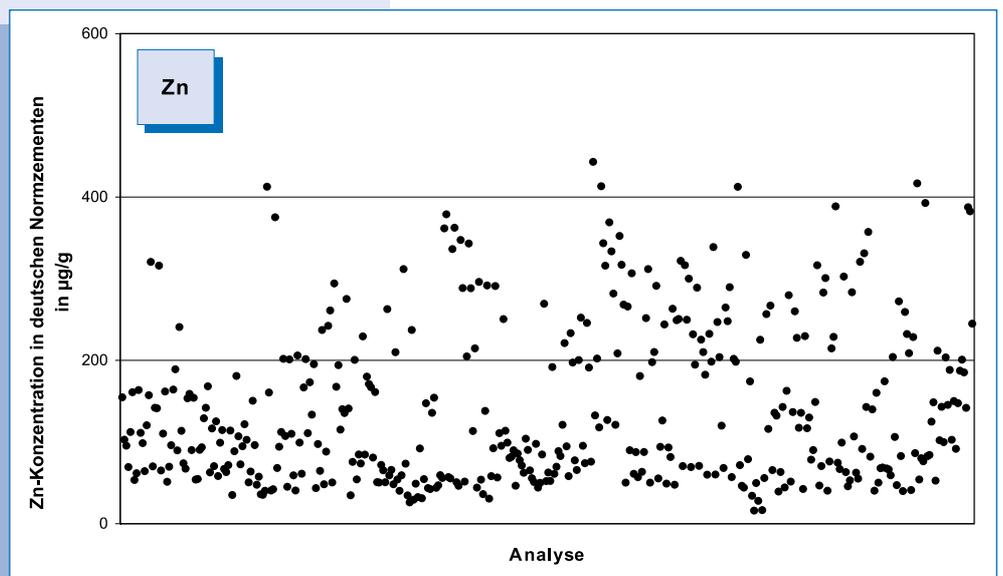


Bild 6-16: Zink in Normzementen.

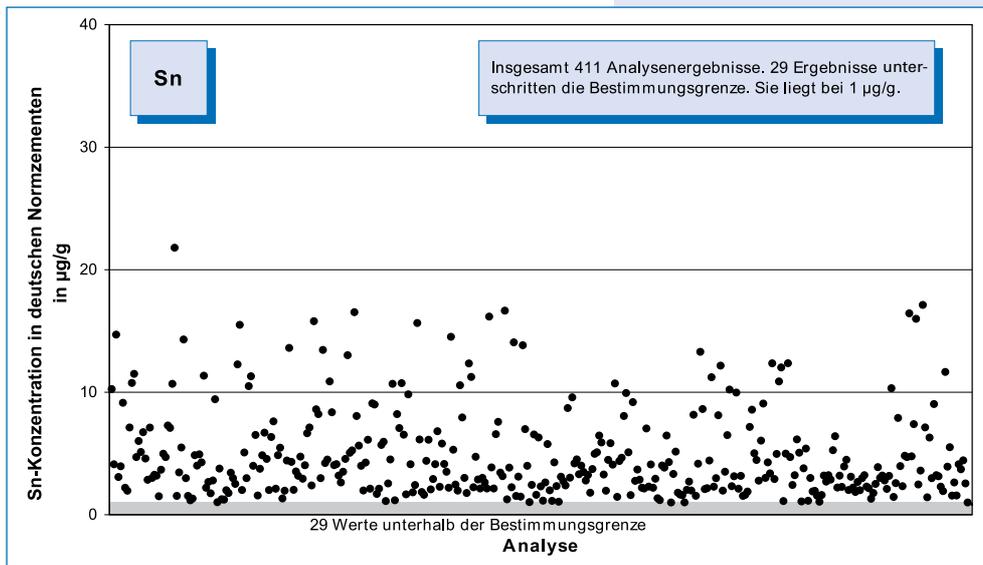


Bild 6-17: Zinn in Normzementen.

- [1] Zahlen und Daten 1999/2000
Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V.,
Köln
- [2] Tätigkeitsbericht 1996 - 99
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [3] Umfrage des Forschungsinstituts der Zementindustrie
1999/2000
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [4] FVEhS-Report
Jahresstatistiken des Fachverbandes
Eisenhüttenschlacken FVEhS
- [5] Verminderung der CO₂-Emission
Monitoring-Bericht 1998
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Ergänzende Literatur

Zement - Taschenbuch 2000

Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Ökologische Positionierung von Zement und Beton

InformationsZentrum Beton GmbH, Köln

Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln

Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, 1999

Zement-Jahresbericht 1999-2000

Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln

Beton - Hart im Nehmen, Stark in der Leistung, Fair zur

Umwelt

Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Altöl - Wo Abfall Wunder wirkt

Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Alte Steinbrüche - Neues Leben

Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf

Richtlinie VDI 2094: Emissionsminderung Zementwerke

Norm DIN 1164-1: Zement, Teil 1: Zusammensetzung,

Anforderungen

Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin

Copyright/Herausgeber:

VDZ Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Postfach 30 10 63, D-40410 Düsseldorf

Tannenstraße 2, D-40476 Düsseldorf

Telefon: (02 11) 45 78-1

Telefax: (02 11) 45 78-296

E-Mail: info@vdz-online.de

Internet: <http://www.vdz-online.de>

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlicht durch den Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Gesamtproduktion: Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf

Redaktionsschluss: August 2000



Verein Deutscher Zementwerke e. V.