

**Erarbeitung eines Grundsatzpapiers zur
Feststellung der Umweltverträglichkeit
von genormten Betonausgangsstoffen**

T 3026

T 3026

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2003, ISBN 3-8167-6530-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

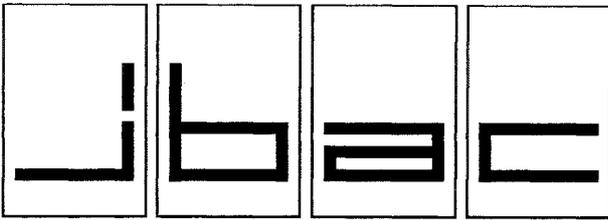
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

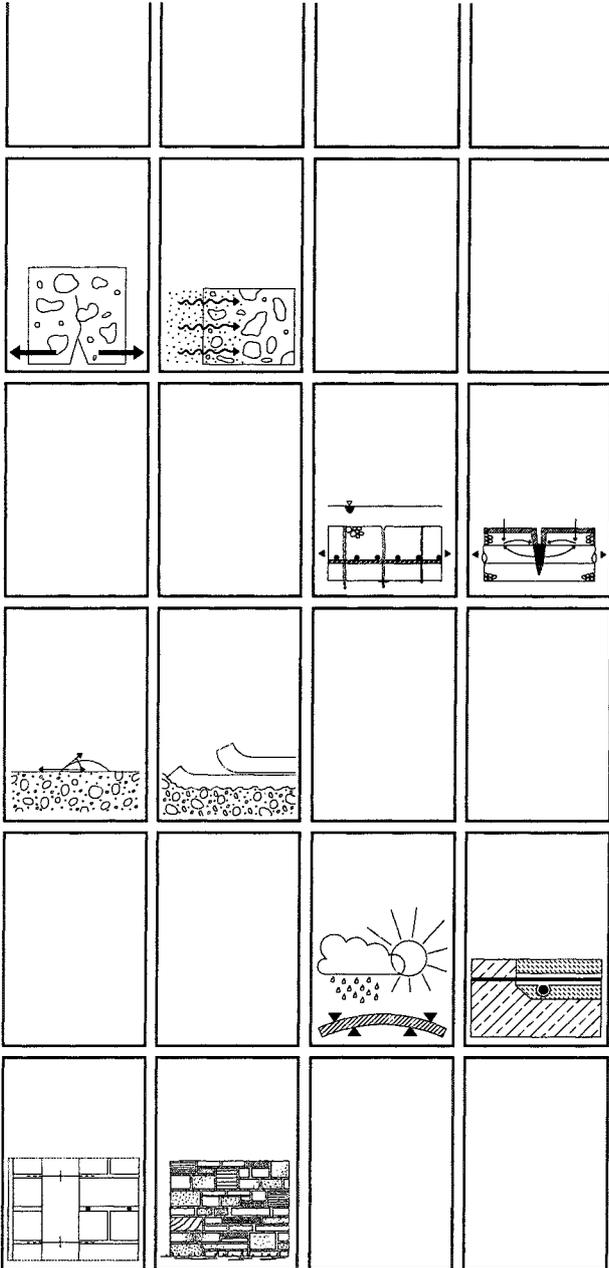
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fhg.de

www.IRBbuch.de



Institut für Bauforschung Aachen
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

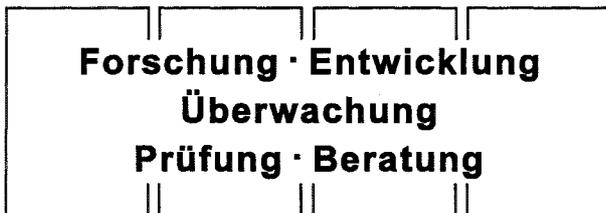


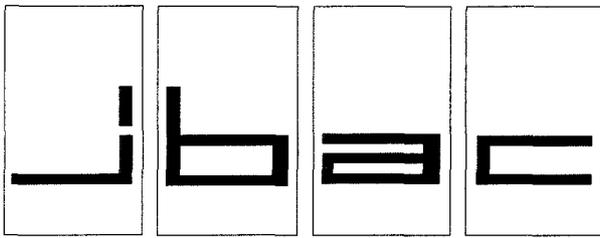
Forschungsbericht

F 836

Erarbeitung eines Grundsatzpapiers zur
 Feststellung der Umweltverträglichkeit von
 genormten Betonausgangsstoffen

Baustoff · Bauteil · Bauwerk





INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber
Professor Dr.-Ing. M. Raupach

Postfach, D-52056 Aachen
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-9 51 00 · Telefax (02 41) 80-9 21 39 · www.ibac.rwth-aachen.de

Vp/Ki

2. Ausfertigung

THEMA

Erarbeitung eines Grundsatzpapiers zur Feststellung der Umweltverträglichkeit von genormten Betonausgangsstoffen

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 836

vom 19.05.2003

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. Brameshuber

Dipl.-Ing. Vollpracht

Auftraggeber/
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Kolonnenstr. 30 L

10829 Berlin

Auftragsdatum

26.02.2002

Aktenzeichen

P 32-5-20.36-1026/02

Dieser Bericht umfasst 117 Seiten, davon 104 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1	EINLEITUNG.....	1
2	UNTERSUCHUNGSMETHODEN ZUR BEURTEILUNG DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT	1
2.1	Toxikologische Untersuchungen – Bestimmung der Wassergefährdungsklasse.....	1
2.1.1	Bestimmung der Säugetiertoxizität.....	2
2.1.2	Bestimmung der aquatischen Toxizität.....	3
2.1.2.1	Fischttest.....	3
2.1.2.2	Daphnientest.....	4
2.1.2.3	Bakterientest.....	4
2.1.2.4	Algenzellvermehrungshemmtest	5
2.1.2.5	Bewertung der aquatischen Toxizität	5
2.1.3	Bestimmung der Wassergefährdungszahl.....	6
2.1.4	Abbaubarkeit und Wasserlöslichkeit	6
2.1.5	Erweiterungsprüfung und Gesamtbewertung.....	6
2.2	Bestimmung der Gesamtgehalte	6
2.3	Auslaugverfahren	7
2.3.1	Schütteltest	7
2.3.2	Säulentests.....	8
2.3.3	Standtest	9
3	KONZENPT DES DIBT-MERKBLATTS ZUR BEWERTUNG DER AUSWIRKUNGEN VON BAUPRODUKTEN AUF BODEN UND GRUNDWASSER	9
4	BETONAUSGANGSSTOFFE	11
4.1	Zemente.....	11

4.1.1	Portlandzementklinker	12
4.1.1.1	Toxikologische Daten.....	13
4.1.1.2	Auslaugverhalten von Portlandzementklinker	13
4.1.1.2.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe in Portlandzementklinker.....	13
4.1.1.2.2	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe.....	14
4.1.1.3	Ausgasung	17
4.1.1.4	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Portlandzement	17
4.1.2	Hüttensand.....	17
4.1.2.1	Toxikologische Daten.....	17
4.1.2.1.1	Auslaugverhalten von Hüttensand	18
4.1.2.1.2	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Hüttensand	18
4.1.2.1.3	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe.....	19
4.1.2.2	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Hüttensand	20
4.1.3	Natürliche Puzzolane	20
4.1.4	Gebannter Ölschiefer	20
4.1.5	Kalkstein.....	21
4.1.6	Calciumsulfat	22
4.1.7	Zementzusatzmittel	23
4.2	Gesteinskörnungen.....	24
4.2.1	Normale Gesteinskörnungen.....	24
4.2.1.1	Natürliche Gesteinskörnungen für Normalbeton	24
4.2.1.2	Normale Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen.....	25
4.2.1.2.1	Toxikologische Daten	26
4.2.1.2.2	Auslaugverhalten von normalen Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen.....	27
4.2.1.2.2.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen.....	27
4.2.1.2.2.2	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe.....	29
4.2.1.2.3	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen	29

4.2.2	Schwere Gesteinskörnungen	30
4.2.3	Leichte Gesteinskörnungen	31
4.2.3.1	Auslaugverhalten von leichten Gesteinskörnungen	33
4.2.3.1.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von leichten Gesteinskörnungen	33
4.2.3.1.2	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe	35
4.2.3.2	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von leichten Gesteinskörnungen	35
4.2.4	Rezyklierte Gesteinskörnung	36
4.3	Betonzusatzstoffe	37
4.3.1	Allgemeines	37
4.3.2	Steinkohlenflugasche	37
4.3.2.1	Toxikologische Daten	38
4.3.2.2	Auslaugverhalten von Flugasche	39
4.3.2.2.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Flugasche	39
4.3.2.2.2	Bewertung der mobilen Inhaltsstoffe	42
4.3.2.2.2.1	Schütteltests	42
4.3.2.2.2.2	Standtest	45
4.3.2.3	Freisetzung flüchtiger Substanzen	48
4.3.2.4	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Steinkohlenflugasche	50
4.3.3	Silikastaub / Mikrosilika	50
4.3.3.1	Ökotoxikologische Daten	51
4.3.3.2	Auslaugverhalten von Mikrosilika	51
4.3.3.2.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Mikrosilika	51
4.3.3.2.1.1	Schütteltests	52
4.3.3.2.1.2	Analyse von Drainagewasser	53
4.3.3.2.2	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe	54
4.3.3.3	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Mikrosilika	54
4.3.4	Trass (natürliches Puzzolan)	54
4.3.5	Gesteinsmehle	55

		Seite
4.3.6	Farbpigmente.....	55
4.3.6.1	Toxikologische Daten.....	56
4.3.6.2	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Pigmenten	57
4.3.6.3	Bewertung der Umweltverträglichkeit von Pigmenten.....	58
4.3.7	Organische Betonzusatzstoffe.....	58
4.3.7.1	Auslaugung von organischen Zusatzstoffen	58
4.3.7.1.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von organischen Zusatzstoffen ..	58
4.3.7.1.2	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe.....	59
4.3.7.1.2.1	Schütteltests.....	59
4.3.7.1.2.2	Standtest	60
4.3.7.2	Freisetzung flüchtiger Substanzen.....	60
4.3.7.3	Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von organischen Zusatzstoffen.....	62
4.4	Betonzusatzmittel.....	63
4.4.1	Betonverflüssiger und Fließmittel (BV und FM).....	64
4.4.1.1	Ligningsulfonat.....	65
4.4.1.2	Melaminsulfonat.....	65
4.4.1.3	Naphthalinsulfonat	65
4.4.1.4	Polycarboxylate	66
4.4.1.5	Auslaugverhalten von Fließmitteln	66
4.4.1.5.1	Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe	66
4.4.1.5.1.1	Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe.....	67
4.4.2	Verzögerer (VZ).....	70
4.4.2.1	Auslaugverhalten.....	71
4.4.3	Beschleuniger (BE)	71
4.4.3.1	Silikate.....	71
4.4.3.2	Aluminate	72
4.4.3.3	Carbonate.....	72
4.4.3.4	Formiate.....	72
4.4.3.5	Amorphe Aluminiumhydroxide	72
4.4.3.6	Aluminiumsulfat.....	72

	Seite
4.4.3.7	Auslaugverhalten..... 73
4.4.4	Luftporenbildner (LP) 74
4.4.4.1	Auslaugverhalten..... 74
4.4.5	Dichtungsmittel (DM)..... 74
4.4.5.1	Auslaugverhalten..... 75
4.4.6	Einpresshilfen (EH)..... 75
4.4.6.1	Auslaugverhalten..... 75
4.4.7	Stabilisierer (ST) 75
4.4.7.1	Auslaugverhalten..... 76
4.4.8	Recyclinghilfen 76
4.4.8.1	Phosphonsäuren..... 76
4.4.8.2	Fruchtsäuren (Hydroxycarbonsäuren)..... 77
4.4.8.3	Auslaugverhalten..... 77
4.4.9	Chromatreduzierer..... 77
4.4.9.1	Auslaugverhalten..... 78
4.4.10	Additive und Hilfsstoffe für Betonzusatzmittel..... 78
4.4.11	Freisetzung flüchtiger Substanzen bei Verwendung von Betonzusatz- mitteln..... 78
4.4.11.1	Freisetzung von Formaldehyd..... 79
4.4.11.2	Freisetzung sonstiger organischer Stoffe 81
4.4.12	Bewertung der Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln..... 85
4.5	Zugabewasser..... 85
5	ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG..... 87
5.1	Allgemeines..... 87
5.2	Auslaugung 87
5.3	Emission von Gasen..... 89
6	LITERATUR..... 90
	TABELLEN A1-A9

1 EINLEITUNG

In den technischen Regelwerken und Normen für das Bauwesen wird in zunehmendem Maße ein Nachweis der Umweltverträglichkeit gefordert. Eine Reihe von genormten Produkten, die z. T. seit Jahrzehnten eingesetzt werden, wurden bisher nur unzulänglich oder gar nicht auf ihre Umweltverträglichkeit untersucht. Die europäischen Normen fordern nun einen Nachweis, wobei jedoch häufig noch keine harmonisiert genormten Verfahren zur Beurteilung existieren. Daher wird nach heutigem Stand in diesen Normen die Prüfung der Umweltverträglichkeit in die Zuständigkeit der Bauaufsicht am Ort der Verwendung des Baustoffs übertragen. Für diese sowie für neue Produkte, für die eine bauaufsichtliche Zulassung beantragt wird, hat das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, ein Merkblatt zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser erarbeitet, dessen Anforderungen prinzipiell auch für genormte Produkte gelten sollten. Es wird hier als Grundlage verwendet.

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) wurde vom DIBt beauftragt, eine Positivliste zusammenzustellen, die Spannweiten der Gesamtgehalte und – soweit vorhanden – Ergebnisse von toxikologischen Untersuchungen und Auslaugversuchen enthält. Die Liste soll die Basis für einen Anforderungskatalog für genormte Betonausgangsstoffe darstellen: Für einen Stoff, der der Liste entspricht, müssten keine weiteren Nachweise zur Umweltverträglichkeit gefordert werden.

Bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit ist zu beachten, dass sich die Positivliste nur auf die Nutzungsphase bezieht, d. h., Einträge in das Grundwasser während der Herstellung oder bei unsachgemäßem Umgang mit den Ausgangsstoffen werden nicht betrachtet. Allerdings werden bei den jeweiligen Ausgangsstoffen einige Angaben zur Toxizität im Rohzustand gemacht.

2 UNTERSUCHUNGSMETHODEN ZUR BEURTEILUNG DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT

2.1 Toxikologische Untersuchungen – Bestimmung der Wassergefährdungsklasse

Laut Forschungsantrag sollten neben den Daten zum Auslaug- und Emissionsverhalten auch ökotoxikologische Daten zu den Betonausgangsstoffen aufgenommen werden; diese Ergebnisse werden jedoch in die Bewertung hier nicht mit einbezogen.

In einer Reihe von Quellen wurde im Zuge einer toxikologischen Untersuchung eine Einteilung in Wassergefährdungsklassen vorgenommen. Das angewendete Konzept ist inzwischen veraltet und gilt auch für Stoffe wie Schlacken und Aschen strenggenommen nicht. In Ermangelung aktuellerer Daten werden die Ergebnisse hier dennoch aufgenommen und das zugrunde liegende Konzept erläutert.

Für die Bewertung der Wassergefährdung (im Sinne des § 19g des Wasserhaushaltsgesetzes) war ein dreigeteiltes Bewertungsverfahren vorgesehen /1/:

Grundprüfung (obligatorisch): Untersuchung der Säugetiertoxizität, der Toxizität gegenüber zwei aquatischen Organismen sowie der biologischen Abbaubarkeit. Für die Toxizität werden Bewertungszahlen vergeben, aus denen eine vorläufige Wassergefährdungszahl bestimmt wird (s. Abschnitt 2.1.1 bis 2.1.3).

Erweiterungsprüfung: Recherche zu anderen wassergefährdenden Eigenschaften des Stoffes (nur in Sonderfällen experimentell). Hiermit wird die Grundprüfung kontrolliert.

Gesamtbewertung: Gewichtung der be- und entlastenden Argumente, Prüfung ob durch Bonus- oder Malusvergabe eine höhere oder niedrigere WGK zuzuordnen ist, als sich aus der Grundprüfung ergibt.

2.1.1 Bestimmung der Säugetiertoxizität

Unter akuter Toxizität bei Säugetieren wird die pathologische Auswirkung im Organismus der Versuchstiere (i. d. R. Ratten) nach einmaliger Einnahme des zu untersuchenden Materials verstanden. Die Testdurchführung kann nach EG- oder OECD-Prüfmethode 92/69/EEC B.1 OECD 401, 402, 403 erfolgen. Auch die versuchstiersparende Methode OECD 423 wird empfohlen /1/.

Die akute Toxizität wird als mittlere tödliche Dosis (lethal dosis, LD₅₀ in mg/kg Körpergewicht) angegeben. Als LD₅₀ wird die Menge eines Stoffes bezeichnet, bei der 50% der Versuchstiere bei einmaliger Einnahme überleben. Die Versuchstiere bekommen eine definierte Menge der Versuchssubstanz in Abhängigkeit des Körpergewichtes verabreicht (oral) und werden über einen Untersuchungszeitraum von 14 Tagen beobachtet.

Tabelle 1: Bewertung des LD₅₀ bei der Bestimmung der Säugetiertoxizität

LD ₅₀	Bewertungszahl (BWZ _S)
mg/kg	-
1	2
≤ 25	7
> 25 – 200	5
> 200 – 2000	3
> 2000	1

2.1.2 Bestimmung der aquatischen Toxizität

2.1.2.1 Fischttest

Der Fischttest wird nach DIN 38 412, Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) /83/, durchgeführt. Dabei werden folgende Tests unterschieden:

- Bestimmung der Wirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Fische - Fischttest (L 15),
- Bestimmung der Giftwirkung von Abwasser auf Fische - Fischttest (L 20),
- Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Fischen über Verdünnungsstufen (L 31).

In den im Rahmen dieses Forschungsprojekts herangezogenen Quellen wird i. d. R. der Test der akuten Fischtoxizität – L 15 – verwendet (Testdauer 48 bis 96 Stunden). Alternativ kann ISO 7364 oder OECD 203 angewendet werden.

Bei der Prüfung der akuten Toxizität nach L 15 erfolgt die Beurteilung auf Basis der Anzahl der überlebenden Fische. In ein Aquarium mit 10 l Testwasser, das die gewünschte Konzentration der zu testenden Substanz enthält, werden 10 Fische, i. d. R. Goldorfen, eingesetzt. Die Temperatur beträgt 20 ± 1 °C. Die Schädigung der Fische erfolgt nicht primär über die Nahrung (Anreicherung innerhalb der Nahrungskette), sondern in der Mehrzahl der Fälle über die Kiemen. Die Substanzen gelangen auch nicht in Form einer einmaligen Dosis in den Organismus, sondern über den ganzen Testzeitraum. Daher ist die aufgenommene Substanzmenge nicht bekannt, sondern nur ihre Konzentration und ihre Wirkung. Die Be-

wertung erfolgt über die tödliche Konzentration (lethal concentration). Folgende Parameter können angegeben werden:

LC₀ : maximal geprüfte Dosis, bei der 0% aller Organismen sterben,

LC₅₀ : errechnete Dosis, bei der 50% aller Organismen sterben,

LC₁₀₀ : minimal geprüfte Dosis; bei der 100% aller Organismen sterben.

Als Kriterium gilt der LC₅₀ Wert /2/.

2.1.2.2 Daphnientest

Daphnia magna (Wasserfloh) wird i. d. R. als empfindlich reagierender Testorganismus zur Beurteilung der Toxizität von Chemikalien herangezogen (DIN 38 412, L 11 – akute Toxizität, L 30 – chronische Toxizität /83/; ISO 6341; OECD 202 Teil 1).

Da Daphnien ein wichtiges Glied in der Nahrungskette darstellen (z. B. Nahrung für Fische), ist ihre Reaktion auf Verunreinigungen als aussagekräftiger ökotoxikologischer Test zu nutzen. Eluate oder Aufschlammungen können dem Daphnientest unterzogen werden, dabei sind je Verdünnungsstufe mindestens zwei Parallelproben zu testen. Zu testende Proben werden mit einem speziell hergestellten Verdünnungswasser bzw. mit Daphnienzuchtwater verdünnt. In jeweils 20 ml Probenflüssigkeit werden 5 Daphnien eingesetzt. Nach 24 Stunden werden die schwimmunfähigen Tiere gezählt. Der Verlust der Schwimmfähigkeit beruht auf einer Schädigung durch die Wasserinhaltsstoffe. Zur Kontrolle wird eine Probe mit 100% Verdünnungswasser getestet. Aus dem Prozentsatz der schwimmunfähigen Tiere lässt sich der EC₅₀-Wert (effective concentration) errechnen. Der EC₅₀-Wert gibt an, bei welcher Verdünnungsstufe des Testguts 50% der Daphnien immobilisiert sind /3/.

2.1.2.3 Bakterientest

Auch der Versuch zur Bestimmung der Bakterientoxizität ist in DIN 38 412 /83/ geregelt. In der Regel gilt L 8 /1/. Das Verfahren basiert darauf, dass gelöste Wasserinhaltsstoffe die Zellteilung von Bakterien der Gattung *Pseudomonas putida* hemmen können. Aus der Gegenüberstellung der Anzahl von Zellen einer nicht beeinflussten Testkultur mit definiertem Nährstoffangebot und einer Kultur mit gelösten Stoffen wird die Konzentration ermittelt, bei der eine Hemmung/Aktivierung des Bakterienwachstum eintritt /3/.

Als Bewertungsmaß dient der EC_{10} (effective concentration, Konzentration bei der eine 10% Hemmung bzw. Aktivierung auftritt).

Hilfsweise kann auch L 34, der Leuchtbakterientest, angewandt werden. Hier wird die Hemmwirkung der zu testenden Substanz auf die Lichtemission von *Photobacterium phosphoreum* – Leuchtbakterien – festgestellt /2/. Es kann allerdings auch eine Wachstumshemmung, wie oben beschrieben, ermittelt werden. Da dieser Test eine höhere Empfindlichkeit aufweist, wird hier EC_{50} verwendet /1/.

2.1.2.4 Algenzellvermehrungshemmtest

Für den Algenzellvermehrungshemmtest gilt Teil 9 der DIN 38 412 /83/, daneben können CEN 28 692, ISO 8692 oder OECD 201 angewendet werden.

Die zu testende Probe wird zusammen mit Nährmedium und einer Suspension von *Scenedesmus subspicatus* (Grünalge) 72 Stunden lang bei 23 °C unter Dauerbeleuchtung inkubiert. Vor der Inkubation wird die Anzahl der Algenzellen in der zum Animpfen verwendeten Algensuspension durch mikroskopische Direktauszählung bestimmt. Nach Ablauf von jeweils einem, zwei und drei Tagen wird die Zellzahlbestimmung wiederholt. Die Kontrolle wird mit deionisiertem Wasser angesetzt. Durch Vergleich der in den Proben gewachsenen Algen-Biomasse mit derjenigen in der Kontrolle wird die prozentuale Hemmung der Algenvermehrung berechnet. Als Bewertungsmaße gelten die Konzentrationen des Testguts, bei denen innerhalb von 72 Stunden die Zellvermehrung um 10% und 50% gehemmt wurde (EC_{10} und hilfsweise EC_{50}).

Bei farbigen Stoffen kann die Hemmung ausschließlich auf der Lichtadsorption beruhen. Wenn dies der Fall ist, fällt der Test aus der Bewertung heraus.

2.1.2.5 Bewertung der aquatischen Toxizität

Zur Bewertung der unterschiedlichen Tests zur aquatischen Toxizität wird der negative dekadische Logarithmus der jeweils maßgebliche Konzentrationen (LC_{50} , EC_{50} , EC_{10}) berechnet. Die Konzentration wird zur Berechnung der Bewertungszahlen in kg/l angegeben. Damit ergibt sich z. B. für $LC_{50} = 0,05 \text{ mg/l} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ kg/l}$ eine Bewertungszahl (BWZ) von 7,3 /1/.

2.1.3 Bestimmung der Wassergefährdungszahl

Die Wassergefährdungszahl (WGZ) entspricht einer vorläufigen Bewertung zur Einteilung der Substanz in eine Wassergefährdungsklasse (WGK). Zunächst werden bei der aquatischen Toxizität die beiden empfindlichsten Toxizitäten (höchste Bewertungszahlen) ausgewählt, die anderen entfallen. Die WGZ entspricht dann dem arithmetischen Mittelwert der Bewertungszahlen für die Säugetiertoxizität und den ausgewählten aquatischen Tests.

2.1.4 Abbaubarkeit und Wasserlöslichkeit

Neben der Toxizität muss die Abbaubarkeit der zu untersuchenden Substanz ermittelt werden. Die meisten Betonausgangsstoffe sind jedoch mineralische Stoffe, so dass diese Prüfung entfällt. Die Abbaubarkeit ist nur für die organischen Zusatzmittel und Zusatzstoffe von Interesse; Einzelheiten sind in /1/ beschrieben.

Auch die Wasserlöslichkeit der Stoffe geht in die Bewertung ein; schwer (< 100 mg/l) oder sehr schwer (< 1 mg/l) lösliche Stoffe können einen Bonus erhalten.

2.1.5 Erweiterungsprüfung und Gesamtbewertung

Zusätzlich zu den oben genannten Tests sind im Rahmen der Erweiterungsprüfung weitere Daten zu berücksichtigen, wenn ein konkreter Verdacht z. B. über Bioakkumulation, Kanzerogenität, Mutagenität und sonstige toxikologische Gefährdungsmerkmale besteht, oder entsprechende Erkenntnisse vorliegen. Solche Eigenschaften führen zu einer Malusvergabe.

Im Zuge der Gesamtbewertung werden die Ergebnisse bilanziert und die Wassergefährdungsklasse festgelegt.

2.2 Bestimmung der Gesamtgehalte

Die Gesamtgehalte werden an gemahlenem (< 125 μm) und getrocknetem Material bestimmt. Die Analysen wurden in den unterschiedlichen Quellen z. T. mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und teilweise nach Totalaufschluss durchgeführt. Für einige gelöste Elemente wurde Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES) oder Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) verwendet.

Die Gesamtgehalte spielen bei der Betrachtung der Umweltverträglichkeit nur unter dem Aspekt der Schadstoffanreicherung und Schadstoffverteilung in Baustoffen eine Rolle. Für den Grundwasser- und Bodenschutz sind die mobilen Anteile der Schadstoffe relevant. Bei der Bestimmung dieser mobilen Anteile sind wiederum die Auslaugbedingungen entscheidend.

In einigen Quellen werden statt den Gesamtgehalten die säurelöslichen Bestandteile gemessen. Wie Versuche zur Löslichkeit von Schwermetallverbindungen bei verschiedenen pH-Werten gezeigt haben, beeinflusst der pH-Wert das Ergebnis der Untersuchung sehr stark /5/. So sind z. B. Blei-, Cadmium-, Kupfer- und Zink-Ionen im sauren Bereich löslich, im neutralen Bereich bilden sie stabile Verbindungen und bei pH-Werten über 10 steigt die Löslichkeit wieder an (amphoterer Lösungsverhalten). Andere Ionen sind nur in saurer Lösung löslich und im alkalischen Milieu stabil (z. B. Calcium, Barium und dreiwertiges Chrom). Chromat (Cr (VI)) dagegen bleibt über den ganzen PH-Bereich löslich. Die absoluten Gesamtgehalte einiger Schwermetalle können nur im extrem sauren Bereich im Totalaufschluss bestimmt werden.

Wegen der bei unterschiedlichen pH-Werten ermittelten Werte sind nicht alle Quellen direkt miteinander vergleichbar.

2.3 Auslaugverfahren

Da die Bestimmung der Gesamtgehalte i. d. R. keine Rückschlüsse auf Boden- und Grundwassergefährdung eines Baustoffs zulässt, werden Auslaugversuche durchgeführt. Hier gibt es international eine Vielzahl von Verfahren /4/. Im Folgenden sollen nur drei generelle Verfahren kurz beschrieben werden.

2.3.1 Schütteltest

Bei den Schütteltests (batch-tests) wird das Probenmaterial mit dem Eluenten in definiertem Flüssigkeit / Feststoff – Verhältnis (L/S) versetzt und über eine festgelegte Zeitspanne geschüttelt oder gerührt. Die international angewendeten Verfahren unterscheiden sich neben der Bewegungsart und dem L/S auch bezüglich des verwendeten Eluenten, der Elutionsdauer und der Korngröße des Materials. Es gibt auch Verfahren, bei denen der pH-Wert während der gesamten Auslaugdauer konstant auf einen bestimmten pH-Wert eingestellt wird (pH-stat.-Verfahren).

Als Testverfahren in Deutschland wird für die Elution hauptsächlich der Schütteltest nach DIN 38 414 S-4 /99/, kurz DEV-S4-Verfahren genannt, eingesetzt. Der Eluent ist destilliertes Wasser, das im Verhältnis $L/S = 10$ mit 100 g Probenmaterial versetzt wird. Die Versuchsdauer beträgt 24 Stunden; es wird der pH-Wert, die Massenkonzentrationen eluierter Stoffe und die elektrische Leitfähigkeit des Eluates bestimmt.

Das Verfahren ist für ungebundene, unverdichtete Mineralstoffe geeignet, wird aber auch für zementgebundene Baustoffe angewendet, die dann zerkleinert werden (beim DEV-S4-Verfahren auf < 10 mm). Dadurch werden zusätzliche Oberflächen geschaffen, die sonst nicht mit dem Boden bzw. Grundwasser in Kontakt kommen. Das Verfahren führt deshalb zu überhöhten Eluatkonzentrationen. Langzeitprognosen oder Vorhersagen der Freisetzungsraten unter realen Bedingungen sind nicht möglich. Es ist daher nur bedingt geeignet, hat aber den Vorteil einer schnellen Versuchsdurchführung und es ermöglicht eine getrennte Untersuchung der Ausgangsstoffe.

2.3.2 Säulentests

Säulentests sind in der Praxis für Stoffe unterschiedlicher Korngröße weit verbreitet. Sie eignen sich für stückiges bis feinkörniges Material, nicht aber für kompakte Festkörper. Säulentests werden häufig zur Überprüfung der Deponierbarkeit oder für den Einsatz eines Stoffes im Straßenbau eingesetzt. Üblicherweise wird das zu untersuchende Material in Säulen (Länge z. B. 0,5 bis 1 m; Durchmesser 5-30 cm) eingebracht und dann auf verschiedene Weise mit dem Eluenten in Kontakt gebracht:

- Überregnen/Percolation: die Flüssigkeit fließt von oben nach unten und wird unterhalb der Säule aufgefangen. Dabei gibt es auch die Möglichkeit, die Beregnungsintervalle beliebig zu variieren;
- Inverse Säuleneelution: die Elutionsflüssigkeit wird von unten durch das Material gepumpt (mit Hilfe einer peristaltischen Pumpe) und durch eine Überlaufvorrichtung abgeleitet;
- Statische Elution: die Säule wird mit Elutionsflüssigkeit gefüllt, und erst zum Ende der Versuchsdauer wird das Eluat abgelassen und aufgefangen.

Außerdem können die Elutionsflüssigkeiten, die L/S-Verhältnisse, und die Beschickungsdauer variiert werden.

Mit dem Säulentest kann man innerhalb kurzer Zeit L/S-Verhältnisse erreichen, die unter realen Bedingungen erst in Jahren/Jahrzehnten auftreten, wobei eine große Bandbreite erfasst werden kann. Vergleiche mit Großlysimeterverfahren (Simulation von Feldbedingungen) haben gezeigt, dass für große Werte des L/S-Verhältnisses die Ergebnisse gut vergleichbar sind. Allerdings werden durch Säulentests keine mikrobiologischen oder mineralogischen Effekte erfasst.

Der größte Nachteil der Säulentests ist die relativ schlechte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Diese ist dadurch verursacht, dass das Einbringen des zu prüfenden Materials in die Säulen nicht automatisiert werden kann /7/.

2.3.3 Standtest

Mit diesem Verfahren können gebundene oder verfestigte Probekörper untersucht werden. Die Probekörper sind in diesem Test von allen Seiten mit dem Eluenten umgeben. Dabei sollen die Probekörper so gewählt werden, dass während der Auslaugdauer die Konzentrationen der betrachteten Stoffe im Inneren des Probekörpers als konstant anzusehen sind. Es gibt auch hier eine Reihe von Variationen (unterschiedliche Versuchsdauer, mit oder ohne Eluentenwechsel, Kreislaufverfahren). Für den Standtest existiert ein Normentwurf /8/; hier wird zwischen dem Kurzzeitstandtest über einen Zeitraum von 24 Stunden und dem Langzeitstandtest über 56 Tage unterschieden. Beim Langzeitstandtest wird der Eluent – demineralisiertes Wasser – in festen Zeitabständen gewechselt, daher hat dieser Versuch den Vorteil, dass die Zeitabhängigkeit der Auslaugung erfasst werden kann. Er ermöglicht somit eine realistische Einschätzung der Auswirkung von zementgebundenen Stoffen auf Boden und Grundwasser. Der Entwurf lehnt sich an die niederländische Norm NEN 7345 an. Die meisten hier verwendeten Quellen folgen diesem Normentwurf. Bei der Auswertung von Standtests ist zu beachten, dass immer eine Betonmischung betrachtet wird, d. h. der Einfluss eines Ausgangsstoffs kann nur durch Vergleichsuntersuchungen bestimmt werden.

3 KONZEPTE DES DIBT-MERKBLATTS ZUR BEWERTUNG DER AUSWIRKUNGEN VON BAUPRODUKTEN AUF BODEN UND GRUNDWASSER

Das Merkblatt verfolgt ein zweistufiges Bewertungssystem:

In Stufe 1 werden die Inhaltsstoffe des zu bewertenden Ausgangsstoffs betrachtet. Es gelten hier eine Reihe von Ausschlusskriterien:

- Verwendungsverbote und Beschränkungen für spezielle Stoffe müssen eingehalten werden,
- Stoffe, die nach EU-Richtlinie 67/548/EWG mit N, T+ oder T zu kennzeichnen sind sollen vermieden werden, falls der Einsatz unvermeidbar ist, muss eine Bewertung nach Stufe 2 durchgeführt werden,
- Kanzerogene (R 45), mutagene (R 46) und teratogene Stoffe (R 60, R 61) dürfen nicht aktiv eingesetzt werden,
- Für mineralische Abfälle gelten die LAGA-Regeln /73/. Die Stoffgehalte im Eluat müssen mindestens die Z2-Werte der Technischen Regeln einhalten (Genauerer, s. /11/).

Wird eines der Ausschlusskriterien maßgebend, erfüllt das Bauprodukt die Anforderungen des Merkblatts nicht. Der Nachweis nach Stufe 1 gilt als erbracht, wenn es Nachweise über alle Inhaltsstoffe gibt, die belegen, dass keine Gefahren für Boden und Grundwasser bestehen. Ein solcher Nachweis kann z. B. durch einen DEV-S4-Schütteltest erbracht werden, wenn die Geringfügigkeitsschwellen des Merkblatts /11/ im Elfat eingehalten sind. Des weiteren kann die Stufe 2 entfallen, wenn bereits Bauprodukte gleichartiger Zusammensetzung dem Merkblatt entsprechend geprüft und als unbedenklich eingestuft wurden. Gilt das nicht, so ist ein Nachweis nach Stufe 2 zu führen.

In Stufe 2 werden die mobilisierbaren Inhaltsstoffe betrachtet, die aus dem Beton ausgelaugt werden können. Dazu müssen praxisnahe Eluate der Bauprodukte hergestellt werden. Nach dem Entwurf zum Kapitel Beton und Betonausgangsstoffe des Teils II des Merkblatts /11a/ soll hier im Normalfall die Festbetonphase betrachtet werden, die auch Gegenstand dieses Forschungsberichts ist. Als Testverfahren wird der Langzeitstandtest /8/ für den kritischeren Anwendungsfall B2 – wasserundurchlässige Bauweise im Grundwasser – vorgeschrieben. Die Geringfügigkeitsschwellen müssen am Ort der Beurteilung eingehalten werden. Hier wird in /11a/ eine zeitliche und räumliche Mittelung eingeführt, bei der die mittlere Konzentration im Kontaktgrundwasser mit einer Schichtdicke von 30 cm über einen Zeitraum von 6 Monaten als maßgebliche Konzentration gilt. Mit Hilfe eines Transportprogramms sind für eine Reihe von Schwermetallen den Geringfügigkeitsschwellen entsprechende Freisetzungen (in mg/m^2) ermittelt worden, die mit den im Standtest gemessenen Daten verglichen werden können. Dabei sind Randbedingungen für das Modellgebiet definiert worden, die in /11a/ beschrieben sind.

Wenn für alle zu erfassenden Stoffe Geringfügigkeitsschwellen existieren und diese eingehalten werden, ist der Nachweis für Stufe 2 erfüllt. Liegen keine Geringfügigkeitsschwellen vor, so ist ein Nachweis notwendig, dass diese Stoffe aus ökotoxikologischer Sicht als geringfügig wirksam eingestuft werden können. Hierfür sind die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Tests zur aquatischen Toxizität geeignet. Der TOC am Ort der Beurteilung muss unter 20 mg/l liegen.

4 BETONAUSGANGSSTOFFE

4.1 Zemente

Zement ist ein feingemahlendes, hydraulisches Bindemittel für Mörtel und Beton, das im Wesentlichen aus Verbindungen von Calciumoxid (CaO) mit Siliciumdioxid (SiO₂), Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Eisenoxid (Fe₂O₃) besteht, die durch Sintern oder Schmelzen entstanden sind.

Die in Deutschland verwendeten Zemente entsprechen den Anforderungen und Definitionen der Zementnorm DIN EN 197 Teil 1 /85/. Die unterschiedlichen Zemente werden in 5 Klassen (CEM I bis CEM V) eingeteilt. Bei der Zusammensetzung der Zemente wird eine Unterscheidung in Hauptbestandteile (> 5 M.-%) und Nebenbestandteile (< 5 M.-%) vorgenommen. Hauptbestandteile sind Portlandzementklinker, Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke), Silicastaub, natürliches Puzzolan (in erster Linie Trass), Flugasche, gebrannter Ölschiefer und Kalkstein. Nebenbestandteile können Füller oder die oben genannten Bestandteile sein, wenn deren Anteil unter 5 M.-% liegt. Eine Übersicht ist in Tabelle A2 im Anhang gegeben. Der gebrauchsfertige Zement besteht aus den Haupt- und Nebenbestandteilen, dem für die Erstarrungsregelung erforderlichen Calciumsulfat und den gegebenenfalls verwendeten Zementzusatzmitteln.

Tabelle A1 im Anhang enthält Werte für die Gesamtgehalte verschiedener Spurenelemente. Für die Schwermetallgehalte von CEM II -, CEM IV - und CEM V-Zementen sind in der Literatur weniger Daten vorhanden als für Portlandzement und Hochofenzement. Schwermetallgehalten der Zementbestandteile können diese abgeschätzt werden, dabei sind die Bandbreiten der Schwermetallgehalte der Zementbestandteile angesetzt worden (ebenfalls in der Tabelle enthalten). In /20/ sind Schwermetalle von über 400 deutschen Normzementen zusammengestellt worden. Es wird jedoch nicht zwischen den einzelnen Gruppen unterschieden. Die Werte sind in Tabelle A1 gesondert aufgeführt.

In diesem Kapitel werden die Zementbestandteile auf ihre Umweltverträglichkeit hin betrachtet. Verschiedene Bestandteile von CEM II, wie Steinkohlenflugasche, oder Silikastaub, werden auch als Zusatzstoff oder verwendet und sind dort beschrieben.

4.1.1 Portlandzementklinker

Portlandzementklinker besteht hauptsächlich aus den Klinkerphasen Tricalciumsilikat (C_3S), Dicalciumsilikat C_2S , Tricalciumaluminat (C_3A) und Tetracalciumaluminatferrit (C_4AF), d. h. Verbindungen von Calciumoxid (CaO) mit Siliciumdioxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3). Nach DIN EN 197-1 /85/ müssen mindestens zwei Drittel des Portlandzementklinkers aus C_3S und C_2S bestehen. Das Verhältnis CaO / SiO_2 muss mindestens zwei betragen. Der Gehalt an Magnesiumoxid (MgO) darf 5% nicht überschreiten.

Rohstoffe für die Herstellung von Portlandzementklinker sind Im Wesentlichen natürliche Gesteine, wie z. B. Kalkstein, Ton und ihr natürliches Gemisch, der Kalkmergel. Im Einzelfall werden zur stofflichen Ergänzung der natürlichen Gesteine als Korrekturstoffe auch Sekundärrohstoffe wie z. B. Industriekalk oder Kiesabbrand in geringen Mengen eingesetzt /16/. Die zu Rohmehl oder Rohschlamm verarbeitete Rohstoffmischung besteht chemisch zum größeren Teil aus CaO , CO_2 und SiO_2 und zum geringeren Teil aus Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO und anderen Oxiden. Diese Stoffe machen in der Summe über 99 M.-% der Rohstoffmischung aus.

Mit Ausnahme von Anteilen leicht flüchtiger, filtergängiger Schwermetalle (z. B. Quecksilber), die im Abgasstrom emittiert werden, verbleiben die Schwermetalle, die mit den Roh- und Brennstoffen in den Klinkerbrennprozess gelangen, im Klinker, bzw. werden bei entsprechender Ofenauslegung aus dem Abgasstrom oder aus möglichen Bypassströmen in Filter- und Ofenstäuben abgeschieden /7/. In Tabelle A1 im Anhang sind die Spannweiten der Schwermetallgehalte in Portlandzementklinker zusammengestellt. Durch die Mitverbrennung von Abfallstoffen, z. B. Altreifen, kann es zu einer Anreicherung von Schwermetallen kommen /13/.

Aufgrund der hohen Temperaturen beim Klinkerbrennprozess mit Gastemperaturen im Drehrohrofen bis zu 2000 °C und Brennguttemperaturen von ca. 1450 °C werden toxisch relevante organische Verbindungen wie z. B. polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Dioxine und Furane im Klinker praktisch nicht nachgewiesen /9/.

4.1.1.1 Toxikologische Daten

Zement ist gemäß Gefahrstoffverordnung /42/ als Xi (reizend) einzustufen; es gelten die R-Sätze 38 (reizt die Haut), 41 (Gefahr ernster Augenverletzungen) und 43 (Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich; Gehalt an wasserlöslichem Chromat) /6/. Bei sachgemäßem Umgang wird der Kontakt jedoch vermieden; hinzu kommt, dass im vorliegenden Bericht nur die Nutzungsphase, d. h. der hydratisierte Zement betrachtet werden soll. Die reizende Wirkung von Zement beruht auf dem hohen pH-Wert, der an der Oberfläche des erhärteten Betons durch Carbonatisierung schnell auf ein unschädliches Maß sinkt.

4.1.1.2 Auslaugverhalten von Portlandzementklinker

4.1.1.2.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe in Portlandzementklinker

Wie in Abschnitt 4.1.1 erläutert ist aufgrund der Herstellungsbedingungen nicht mit relevanten Mengen an organischen Schadstoffen zu rechnen, daher sind bei Portlandzementklinker die enthaltenen Schwermetalle und Spurenelemente von Interesse. Tabelle A1 im Anhang enthält Angaben zu den Gesamtgehalten verschiedener umweltrelevanter Elemente. Es ist zu erkennen, dass Zement gegenüber natürlichen Gesteinen, wie Quarz oder Kalkstein, erhöhte Gehalte an As, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn aufweisen kann. Die Ausschlusskriterien des Merkblatts sind nicht erfüllt (vgl. auch Abschnitt 4.1.1.1).

Im Rahmen der Stufe 1 des Bewertungskonzepts (s. Abschnitt 3) kann der Nachweis der Unbedenklichkeit der Inhaltsstoffe durch einen Schütteltest an der Originalsubstanz erbracht werden. Tabelle 2 enthält Ergebnisse von Elutionsversuchen nach dem DEV-S4-Verfahren /99/, die an einem Portlandzement mit mittleren Schwermetallgehalten durchgeführt worden sind.

Tabelle 2: Ergebnisse von Elutionsversuchen von Portlandzement, DEV-S4 Verfahren /5/ (umgerechnet auf Eluatkonzentrationen)

Element	Einheit	Gehalt im Eluat	Geringfügigkeits-schwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4
Arsen, As	mg/l	< 0,001	0,01
Barium, Ba		0,173	-
Blei, Pb		0,019	0,025
Cadmium, Cd		< 0,001	0,005
Chrom ges.Cr		-	0,05
Chromat Cr(VI)		0,078	0,008
Kobalt, Co		< 0,001	0,05
Kupfer, Cu		0,003	0,05
Nickel, Ni		< 0,001	0,05
Quecksilber,Hg		< 0,001	0,001
Thallium, Tl		< 0,001	-
Zink, Zn		0,007	0,5

Im Eluat sind nur Barium, Blei, Chrom, Kupfer und Zink nachweisbar. Es ist davon auszugehen, dass unter den Versuchsbedingungen (wässrige Lösung im basischen Bereich) das Chrom als Chromat vorliegt. Die Geringfügigkeitsschwelle des DIBt-Merkblatts /11/ wird bei diesem scharfen Test nur für Chrom überschritten, daher ist ein Nachweis nach Stufe 2 nur für Chrom erforderlich.

4.1.1.2.2 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

Im Zuge der Bewertung nach Stufe 2 sind die aus dem erhärteten Beton auslaugbaren Inhaltsstoffe von Interesse. Das maßgebliche Verfahren ist der Langzeitstandtest. Portlandzement ist diesbezüglich umfassend untersucht worden, z. B. in /5/. Dabei konnten im Eluat die umweltrelevanten Stoffe Blei, Chrom, Kupfer und Zink in den Mischungen mit Portlandzement nachgewiesen werden. Die insgesamt eluierten Stoffmengen sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse von Elutionsversuchen von Mörtel und Beton mit Portlandzement, Standtest mit 8 Eluentenwechseln /5/

Element	Einheit	CEM I 32,5 R Mörtel	CEM I 32,5 R Beton
1	2	3	4
Arsen	mg/m ²	< 0,4	< 0,4
Blei		1,62	< 0,4
Cadmium		< 0,4	< 0,4
Chrom		2,05	1,58
Kupfer		1,04	0,47
Zink		4,31	3,02

Die höchsten Werte wurden für Zink und Chromat gemessen. Kritisch ist die Elution von Chromat, da hier die Geringfügigkeitsschwelle um rund Faktor 60 geringer ist als die von Zink. Bei Zink sind die Geringfügigkeitsschwellen bereits bei der Bewertung nach Stufe 1 eingehalten. Für Chrom wurde die Freisetzungsrates ermittelt und eine Modellierung der Schadstoffausbreitung durchgeführt. Der Beton mit Portlandzement lieferte dabei in einer 30 cm dicken Kontaktwasserschicht eine maximale Konzentration von 0,0045 mg/l im Grundwasser. Die Geringfügigkeitsschwelle für lösliches Chromat liegt bei 0,008 mg/l. Die Auslaugung ist also unbedenklich.

Das Langzeit-Auslaugverhalten von Beton mit Portlandzement unter etwas anderen Bedingungen ist in /22/ beschrieben. Hier wurden die Schwermetalle Chrom (Cr), Quecksilber (Hg) und Thallium (Tl) betrachtet. Der Versuchsaufbau bestand aus drei Betonprismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³, die von 18 l Leitungswasser mit einer Durchflussgeschwindigkeit von $1,44 \cdot 10^{-3}$ m/h umströmt wurden. Das Wasser floss dabei in einem Kreislauf von unten nach oben durch die Prüfeinrichtung und wurde zu festgelegten Zeitpunkten ausgetauscht und analysiert. Die verwendete Wassermenge entspricht einem Verhältnis Volumen des Eluenten zu Oberfläche des Probekörpers von $V/O = 208$ l/m² und einem L/S-Verhältnis von 10 (angelehnt an DEV-S4-Verfahren). Die Versuchszeit betrug 400 Tage. Der Eluent wurde bei einem Teil der Versuche mit Kohlendioxid versetzt (CO₂-Gehalt: 120 mg/l; entspricht "sehr stark angreifend" nach DIN 4030-1 /84/). Die Anreicherung mit kalklösender Kohlensäure wurde vorgenommen, um auf diese Weise mögliche Einflüsse auf die Auslaugvorgänge durch zusätzlichen lösenden chemischen Angriff z. B. im Grundwasserbereich zu untersuchen.

Der Beton entsprach der Sieblinie A/B 8, hatte einem Zementgehalt $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und Wasserzementwerte zwischen 0,5 und 0,7. Es wurde Quarzzuschlag eingesetzt mit einem Chromgehalt der unterschiedlichen Fraktionen von 2,2 bis 62,8 mg/kg. Für eine Fraktion (2/8 mm) konnte auch Quecksilber mit 0,03 mg/kg bestimmt werden. Charakteristisch für die verwendeten Zuschläge war der sehr geringe Anteil wasserlöslicher Schwermetalle. Er lag bei den untersuchten Schwermetallen bei $\leq 0,01 \text{ mg/kg}$. Der Zement hatte einen Chromgehalt von 79 mg/kg, Quecksilber und Thallium lagen unter 0,02 bzw. 0,2 mg/kg.

Bei der Auslaugung mit Trinkwasser und kohlensaurem Trinkwasser wurden in den Eluaten nur sehr geringe Mengen an Quecksilber und Thallium nachgewiesen. Für alle untersuchten Elemente wurde festgestellt, dass sich die eluierten Schwermetallkonzentrationen mit abnehmendem w/z-Wert verringerten /22/. Das Absinken der Auslaugrate mit dem w/z-Wert wird auf die steigende Dichte des Betons zurückgeführt. Es wurde festgestellt, dass der wesentliche Anteil des von den Betonen an das Trinkwasser abgegebenen Chroms während der ersten 7 Tage in Lösung ging, was auf eine Abwaschung von der Oberfläche ("wash-off"-Effekt) zurückzuführen war. Dieser Effekt konnte an allen Eluaten von sämtlichen Probekörpern, unabhängig von der Zementart, der Lagerungsdauer und dem w/z-Wert beobachtet werden. Bei der Auslaugung durch Wasser mit kalklösender Kohlensäure waren die Ergebnisse ähnlich, jedoch wurden bedingt durch den zusätzlichen chemischen Angriff leicht höhere Chromkonzentrationen gemessen. Die Tabelle 4 enthält die insgesamt ausgeaugten Stoffmengen für einen w/z-Wert von 0,5.

Tabelle 4: Eluierte Schwermetallmengen bezogen auf die Oberfläche der 3 Prismen (0,0864 m²), Werte aus /22/

Schwermetall	Einheit	Abgabe in Leitungswasser	Abgabe bei CO ₂ -Angriff
1	2	3	4
Chrom	mg/m ²	1,157	1,505
Thallium		0,116	0,116
Quecksilber		0,023	0,023

Die Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung wie die Werte aus Tabelle 3. Sie sind etwas geringer. D. h. bei einer Modellierung entsprechend /11a/ ist auch bei diesem Portlandzement unter den beschriebenen Auslaugbedingungen die Geringfügigkeitsschwelle des DIBt-Merkblatts eingehalten.

4.1.1.3 Ausgasung

In /9/ wurden 25 verschiedene Zemente (Vertreter der handelsüblichen Zementarten) bezüglich der Emission von flüchtigen Substanzen untersucht. In keinem Fall konnten organische Substanzen im Gasraum über den Zementen nachgewiesen werden (Head-Space-Gaschromatographie bei 80 °C). Die Versuche wurden mit Zementleim wiederholt, um sicherzustellen, dass die enthaltenen organischen Stoffe (Mahlhilfen) nicht im alkalischen Milieu freigesetzt werden. Es konnten auch hier keine Emissionen gemessen werden.

4.1.1.4 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Portlandzement

Die Ergebnisse von Auslaugversuchen und die Prüfung auf Emissionen von flüchtigen Stoffen zeigen, dass von Portlandzement keine Gefahr für die Umwelt ausgeht. Bei der Mitverbrennung von Abfällen sollten die Schwermetallgehalte anhand des Schütteltests kontrolliert werden. Ggf. ist ein Standtest durchzuführen.

4.1.2 Hüttensand

Hüttensand ist ein latent hydraulischer Stoff, d. h. er weist bei geeigneter Anregung hydraulische Eigenschaften auf. Hüttensand ist ein industrielles Nebenprodukt der Roheisenerzeugung und entsteht durch schnelles Abkühlen einer Schlackenschmelze geeigneter Zusammensetzung, die im Hochofen beim Schmelzen von Eisenerz gebildet wird /85/. Die chemischen Hauptbestandteile von Hüttensand sind Calciumoxid (CaO) und Siliciumdioxid (SiO₂). Die restlichen Bestandteile sind Aluminiumoxid (Al₂O₃), Magnesiumoxid (MgO) und geringe Mengen anderer Oxide.

4.1.2.1 Toxikologische Daten

Hüttensand wurde am Hygiene Institut des Ruhrgebiets auf seine toxikologischen Eigenschaften hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Ergebnisse toxikologischer Tests Hüttensand, /33/

Test	Organismen	Kennzahl	Bewertung
1	2	3	4
Säugetiertoxizität nach OECD 401	Ratten	LC ₅₀	> 2000 mg/kg
Fischttest nach OECD 203	Goldorfen	LC ₅₀	> 1000 ml/l
Algenzellvermehrungs- hemmttest nach OECD 201	Grünalgen	EC ₁₀	≥ 1000 ml/l
		EC ₅₀	> 1000 ml/l
Daphnientest nach OECD 202	Wasserflöhe	EC ₅₀	> 1000 ml/l

Der untersuchte Hüttensand ist als toxikologisch unbedenklich zu bewerten.

4.1.2.1.1 Auslaugverhalten von Hüttensand

4.1.2.1.2 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Hüttensand

Die Gesamtgehalte von umweltrelevanten anorganischen Stoffen sind in Tabelle A1 im Anhang angegeben. Sie liegen i. d. R. deutlich unter den Gehalten in Portlandzement.

Die Tabelle 6 enthält Untersuchungsergebnisse, die bei Analysen von Hüttensand nach dem DEV-S4-Verfahren ermittelt wurden.

Tabelle 6: Ergebnisse von Elutionsversuchen von Hüttensand, DEV-S4 Verfahren /13/

Element	Einheit	Gehalt im Eluat	Geringfügigkeitsschwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4
Arsen, As	mg/l	< 0,001	0,01
Blei, Pb		< 0,001	0,025
Cadmium, Cd		< 0,0005	0,005
Chrom ges. Cr		-	0,05
Chromat Cr(VI)		0,001	0,008
Kobalt, Co		n. b.	0,05
Kupfer, Cu		0,001	0,05
Nickel, Ni		0,002	0,05
Quecksilber, Hg		< 0,0005	0,001
Zink, Zn		< 0,002	0,5

Alle gemessenen Schwermetallgehalte liegen unter der jeweiligen Geringfügigkeitsschwelle des DIBt-Merkblatts /11/. Damit ist ein Nachweis nach Stufe 2 nicht erforderlich. Die vorhandenen Daten der Untersuchungen von Mörteln und Betonen mit Hochofenzement bestätigen die Umweltverträglichkeit von Hüttensand und sind hier nur der Vollständigkeit halber mit aufgenommen worden.

4.1.2.1.3 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

Zum Vergleich des Elutionsverhaltens von Portlandzement und hüttensandhaltigem Zement werden die Ergebnisse der Standtests aus /5/ gegenübergestellt (s. Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnisse von Standtests mit Mörteln aus Portland- und Hochofenzement mit und ohne Flugasche nach 56 Tagen¹⁾

Element	Einheit	CEM I 32,5 R - Mörtel ohne SFA	CEM III /A 32,5 R - Mörtel ohne SFA	CEM I 32,5 R - Mörtel mit SFA ²⁾	CEM III /A 32,5 R - Mörtel mit SFA ³⁾
1	2	3	4	5	6
Arsen	mg/m ²	< 0,34	< 0,33	< 0,32 - < 0,52	< 0,33
Barium		n. b.	n. b.	24,3	12,3
Blei		1,62	< 0,33	< 0,32 - 0,52	< 0,33
Chrom		1,75	1,66	0,41 - 2,91	1,71 - 1,94
Kupfer		0,89	< 0,33	0,35 - 0,71	< 0,33
Zink		3,68	0,37	0,61 - 3,41	0,37 - 0,38

- 1) Die Freisetzung nach 56 Tagen wurde zum besseren Vergleich aus den Werten der Standtests in /5/, die über unterschiedliche Zeitspannen liefen, berechnet.
 - 2) Schwankungsbreite bei fünf Steinkohlenflugaschen
 - 3) Schwankungsbreite bei zwei Steinkohlenflugaschen
- n. b.: nicht bestimmt

Die gemessenen Werte zeigen, dass die Verwendung von Hüttensand einen positiven Einfluss auf die Auslaugung hat. Sowohl beim Mörtel ohne als auch mit FA ist dieser Effekt zu erkennen.

Durch Verwendung von Hüttensand wird auch die Auslaugung von Alkalien vermindert. In /15/ ist der Gehalt der Alkalihydroxide im Eluat eines Spritzbetons mit alkalihaltigem Beschleuniger bei Verwendung eines Hochofenzements mit 72% Hüttensand anstelle des entsprechenden Portlandzements um rd. 75% vermindert worden.

4.1.2.2 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Hüttensand

Die Gesamtgehalte und die eluierbaren Anteile der betrachteten Schwermetalle sind im Hüttensand ähnlich oder deutlich niedriger als im Zement. Durch Einsatz von Hüttensand, bzw. Hochofenzement, werden die Auslaugraten aus Beton verringert. Einer Verwendung im Beton steht daher vom Standpunkt der Umweltverträglichkeit nichts entgegen.

4.1.3 Natürliche Puzzolane

Nach DIN EN 197-1 /85/ sind natürliche Puzzolane Stoffe mit kiesel-säurereicher und / oder alumo-silikatischer Zusammensetzung. Natürliche Puzzolane sind im Allgemeinen Stoffe vulkanischen Ursprungs oder metamorphe Gesteine mit geeigneter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung. Puzzolane bestehen im Wesentlichen aus reaktionsfähigem Siliziumdioxid (SiO_2) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) und zu geringeren Anteilen aus Calciumoxid (CaO), Eisenoxid (Fe_2O_3) und weiteren Oxiden. Puzzolane erhärten nach dem Anmachen mit Wasser nicht selbständig, sondern reagieren mit dem bei der Hydratation des Klinkeranteils gebildeten Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Dabei entstehen Calciumsilikat- und Calciumaluminatverbindungen. Diese Verbindungen sind denen ähnlich, die bei der Erhärtung hydraulischer Stoffe entstehen. Puzzolane für Zemente nach DIN EN 197-1 müssen im Wesentlichen aus reaktionsfähigem SiO_2 und Al_2O_3 bestehen, wobei der Massenanteil an reaktionsfähigem SiO_2 mindestens 25% betragen muss.

In Deutschland ist der wichtigste Vertreter der natürlichen Puzzolane der Trass. Er wird in Abschnitt 4.3.4 behandelt.

4.1.4 Gebrannter Ölschiefer

Zur Herstellung von gebranntem Schiefer wird in Deutschland ausschließlich der am Fuße der Schwäbischen Alb vorkommende sog. Ölschiefer verwendet. Es handelt sich bei diesem Gestein um einen Tonmergel, der rund 10% organische Bestandteile (Kerogene) enthält. Diese brennbaren Bestandteile liegen fein verteilt in dem Gestein vor /7/.

Der Ölschiefer wird bei ca. 800 °C gebrannt. Zum Brennen dient ausschließlich der natürlich vorhandene Gehalt an brennbaren Bestandteilen im Gestein. Das Brennen des Ölschiefers erfolgt in einer Wirbelschichtfeuerung. Durch dieses Verfahren wird sichergestellt, dass die im Gestein enthaltenen brennbaren Anteile vollständig verbrennen. Eine Gefährdung durch organische Schadstoffe ist daher nicht zu befürchten.

Aufgrund der Zusammensetzung der natürlichen Ausgangsmaterialien und des Herstellverfahrens enthält gebrannter Ölschiefer Klinkerphasen, vor allem Dicalciumsilicat und Monocalciumaluminat sowie neben geringen Mengen an freiem Calciumoxid und Calciumsulfat größere Anteile an puzzolanisch reagierenden Oxiden, besonders Siliciumdioxid. Er weist ausgeprägte hydraulische und puzzolanische Eigenschaften auf (in DIN EN 197-1 /85/ wird eine Mindestdruckfestigkeit von 25 MPa nach 28 Tagen für Mörtel mit Ölschiefer anstelle von Zement verlangt).

Auslaugversuche zu Spurenelementen an ölschieferhaltigen Zementen oder Betonen liegen nicht vor. Die vorhandenen Daten zu den Gesamtgehalten (s. Tabelle A1 im Anhang) liegen jedoch unter den Werten für Portlandzement und lassen den Schluss zu, dass eine Umweltgefährdung durch die Verwendung von gebranntem Ölschiefer nicht zu erwarten ist.

4.1.5 Kalkstein

Kalksteine sind Gesteine, die zum überwiegenden Teil aus Calciumcarbonat (CaCO_3) bestehen. Es sind natürliche Ablagerungsgesteine überwiegend organischen Ursprungs, d. h. sie bestehen zum größten Teil aus Schalen und Gerüstteilchen abgestorbener Organismen wie Korallen, Muscheln und Schwämmen. Je nach Entstehungsbedingungen besitzen Kalksteine eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung und mineralogische Struktur. Wird Kalkstein als Zementbestandteil eingesetzt so ist nach DIN 197-1 der Gesamtanteil an organischem Kohlenstoff (TOC) auf 0,2 % (LL) bzw. 0,5 % (L) begrenzt. Der Calciumcarbonatgehalt muss mindestens 75% betragen.

Weitere Angaben zur Umweltverträglichkeit von Kalkstein werden im Abschnitt 4.2.1.1 und 4.3.5 aufgeführt.

4.1.6 Calciumsulfat

Wird feingemahlener PZ-Klinker mit Wasser gemischt, so reagiert das Tricalciumaluminat sehr schnell mit dem Wasser und bewirkt dadurch eine unerwünschte, zu frühe Verfestigung des Gemisches. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Zeit für die sachgerechte Herstellung, den Transport und die Verarbeitung des Betons, muss daher dem Klinker beim Mahlen Calciumsulfat zugegeben werden.

Calciumsulfat wird den anderen Bestandteilen des Zements bei seiner Herstellung in geringen Mengen zugegeben. Calciumsulfat als Sulfatträger für Zemente nach DIN EN 197-1 kann Gips (Calciumsulfatdihydrat $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), Anhydrit (kristallwasserfreies Calciumsulfat CaSO_4) oder eine Mischung davon sein. Nach ihrer Herkunft unterscheidet man natürliche Calciumsulfate und solche, die als Nebenprodukte bei industriellen Prozessen (z. B. bei der Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken) anfallen.

Bei der Rauchgasentschwefelung wird das Rauchgas mit einer wässrigen Suspension in Kontakt gebracht, die als basische Komponente Kalksteinmehl oder gelöschten Branntkalk enthält. Das Schwefeldioxid (SO_2) wird vom Wasser ausgewaschen, in wässriger Lösung durch Sauerstoff zum Sulfat SO_4^{2-} oxidiert und mit Calcium aus dem Kalkstein bzw. Branntkalk zu Calciumsulfatdihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Gips, gefällt /10/. Dieses Produkt wird als REA-Gips bezeichnet.

Aufgrund ihres unterschiedlichen Vorkommens können sich die Sulfatträger in ihrem Reinheitsgrad, in ihrer Farbe und auch in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung unterscheiden. Die Anteile an Verunreinigungen durch andere Bestandteile wie Kalkstein, Dolomit, Mergel, Ton, Bitumen und Kalisalze müssen zur Erzielung der betontechnischen Anforderungen wie z. B. der Raumbeständigkeit klein sein.

Bewertung der Inhaltsstoffe von Calciumsulfat:

Die Gesamtschwermetallgehalte von Gips und REA-Gips sind in Tabelle A1 im Anhang enthalten. Die Gehalte liegen deutlich unter den Werten von Zement und sind als unbedenklich anzusehen.

In /10/ wurde auch der Gehalt an organischen Schadstoffen untersucht. Dioxine und Furane konnten nicht nachgewiesen werden, die enthaltenen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Gehalte an PAK in Gips und REA-Gips /10/

Gipsart	Einheit	PAK ¹⁾
1	2	3
Naturgips	µg/kg	0,6 - 6
REA-Gips aus Steinkohlekraftwerken		0,1 - 1,3
REA-Gips aus Braunkohlekraftwerken		0,3

1) Summenparameter, in erster Linie ist Fluoranthren enthalten

Bei einer Gipszugabe von 5% (Maximalwert) hat ein daraus hergestellter Zementleim mit $w/z = 0,4$ einen Gehalt von maximal $0,17 \mu\text{g/kg}$ PAK. Selbst bei vollständiger Auslaugung im DEV-S4-Verfahren kann das Eluat maximal $0,017 \mu\text{g/l}$ enthalten. Unter realistischen Auslaugbedingungen an Beton oder Mörtel wird der Wert deutlich geringer ausfallen.

Die Geringfügigkeitsschwelle für PAK liegt im DIBt-Merkblatt /11/ bei $0,2 \mu\text{g/l}$. Der Gehalt an PAK in Gips kann daher als unproblematisch angesehen werden. Eine Bewertung nach Stufe 2 kann entfallen.

4.1.7 Zementzusatzmittel

Zementzusatzmittel sind in der Regel organische Bestandteile, die zur Verbesserung der Herstellung oder der Eigenschaften von Zement verwendet werden und bei Zementen nach DIN EN 197-1 /85/ einen Masseanteil von 1%, bezogen auf den Zement, nicht überschreiten dürfen. Bei den in Deutschland hergestellten Zementen kommen als Zementzusatzmittel fast ausschließlich Mahlhilfen zum Einsatz.

Als Mahlhilfen bei der Zementherstellung werden beispielsweise Glykole, Polyamine und Triethanolamin verwendet. Amine sind organische Stickstoffverbindungen, die als Substitutionsprodukte des Ammoniaks aufgefasst werden können. Die Dosiermengen solcher Mahlhilfsmittel liegen unter 0,2% bezogen auf den Zement.

Die Mahlhilfen werden beim Mahlen zunächst chemisorptiv an den Zementklinker gebunden, die Bindung geht jedoch schnell in eine chemische Bindung über. Der nicht gebundene Teil (2 – 13%) geht schon während des Mahlprozesses in die Gasphase über /9/. Wie in Abschnitt 4.1.1.3 ausgeführt wurde, konnte eine Ausgasung der Mahlhilfen weder beim fertigen Zement noch bei Zementleim nachgewiesen werden.

Eine Umweltbelastung durch diese Stoffe ist nicht zu befürchten.

4.2 Gesteinskörnungen

Gesteinkörnungen für Beton und Mörtel sind in DIN 4226 /88/ geregelt. Nach der Überarbeitung teilt sich diese Norm jetzt in die Teile 1 - Normale und schwere Gesteinskörnungen, 2 - Leichte Gesteinskörnungen und 100 - Rezyklierte Gesteinskörnungen. Bisher ist nur der Teil 1 bauaufsichtlich eingeführt.

4.2.1 Normale Gesteinskörnungen

Bei der Herstellung von Normalbeton nach DIN EN 206-1 /86/ ist in Deutschland Betonzuschlag nach DIN 4226 Teil 1 zu verwenden, dessen Herstellung der Güteüberwachung, bestehend aus Eigen- und Fremdüberwachung, unterliegt. Weitere Angaben zu den einsetzbaren Stoffen werden nicht gemacht, es werden lediglich Forderungen an die mechanisch / physikalischen Eigenschaften und den Gehalt an beton- /stahlangreifenden Stoffen, wie Sulfat oder Chlorid, gestellt. Demnach sind sowohl dichte Zuschläge aus natürlichem Gestein, das gebrochen oder ungebrochen aus Gruben, Flüssen, Seen und Steinbrüchen stammt, als auch künstlich hergestellter Zuschlag mit dichtem Gefüge wie kristalline Hochofenstückschlacke und ungemahlener Hüttensand nach DIN 4301 /95 bzw. 96/ sowie Schmelzkammergranulat und andere Schlacken prinzipiell einsetzbar.

4.2.1.1 Natürliche Gesteinskörnungen für Normalbeton

Für Beton im Hoch- und Tiefbau wird überwiegend Zuschlag aus natürlichem Gestein verwendet. Dies sind im Wesentlichen:

- quarzitisches Gestein,
- Kalkstein,
- Granit,
- Gabbro,
- Diabas,
- Basalt,
- Grauwacke (es sind möglichst alkaliresistente Grauwacken zu wählen, die „Alkali-Richtlinie“ des DAfStb ist zu beachten).

Tabelle A6 im Anhang enthält Angaben zur chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine.

Einige Angaben zu Gesamtgehalten von Spurenelementen natürlicher Zuschläge sind in Tabelle A1 im Anhang enthalten. Alle natürlichen Gesteine enthalten geringe Mengen von Spurenelementen, wie z. B. Kobalt, Barium, Blei oder Vanadium. Langjährige Erfahrungen belegen jedoch, dass die Gesteine im alkalischen Milieu des Betons nicht angegriffen werden und daher keine erhöhten Mengen von Schwermetallen aus den Zuschlägen freigesetzt werden können. Eine Gefahr für die Umwelt geht von diesen Stoffen nicht aus.

4.2.1.2 Normale Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen

Wie in Abschnitt 4.2.1 erläutert, können Schlacken als Gesteinskörnung eingesetzt werden. Für Beton sind nur die Eisenhüttenschlacken und die Kraftwerksnebenprodukte von Bedeutung.

Eisenhüttenschlacken

Bei der Verhüttung von Eisen für die Stahlerzeugung fallen Eisenhüttenschlacken an. Die Bezeichnung dieser Schlacken richtet sich nach dem Herstellungsverfahren; so gibt es neben der Hochofenschlacke auch Stahlwerksschlacken, wie die Elektroofenschlacke (EOS), die im Elektroofenverfahren erzeugt wird, und die LD-Schlacke, die beim Linz-Donawitz-Verfahren entsteht. Beim EO-Verfahren werden Schrott und andere Materialien mit hohen Konzentrationen an metallischem Eisen eingesetzt. Die oxidierbaren Begleitminerale bilden zusammen mit dem eingesetzten Kalk bzw. Dolomit die Elektroofenschlacke. Das LD-Verfahren ist ein Blasstahl- oder Konverterverfahren mit einem Einsatz von bis zu 25% Schrott. Beide Schlacken sind überwiegend kristallin /24a, b, c/.

Die Schlacken werden fast vollständig der Wiederverwertung zugeführt. Von der Zementindustrie werden 50% aller anfallenden Hochofenschlacken als Hüttensand genutzt. Hier sind in erster Linie die Hochofenschlacken von Bedeutung. Sie fallen bei der Stahlerzeugung aus Erzen an. Wird die Schlacke schnell abgekühlt (durch Einleiten in Wasser), so entsteht Hüttensand. Langsam abgekühlte Schlacke dagegen kristallisiert. Die gebrochene Schlacke wird im Straßenbau und als Betonzuschlag verwendet /13/.

Kraftwerksnebenprodukte

Bei der Verbrennung von Steinkohle in Schmelzkammerfeuerungsanlagen fällt Schmelzkammergranulat an. Dabei handelt es sich um die Verbrennungsrückstände der Kohle, die

durch Einleiten in Wasser schockartig abgekühlt werden und dadurch glasig als Granulat erstarrten. Es gibt heute nur noch wenige solche Anlagen.

In Trockenfeuerungsanlagen entsteht Kesselsand. Er besteht aus agglomerierten Flugaschepartikeln und wird aufgrund seines höheren Gewichtes nicht im Rauchgasstrom transportiert, sondern am Kesselboden gesammelt /23/. Wegen seiner geringen Rohdichte wird er als Leichtzuschlag eingesetzt.

Die Schlacken aus Braunkohlefeuerungsanlagen werden nicht als Zuschlag eingesetzt.

4.2.1.2.1 Toxikologische Daten

Verschiedene Eisenhüttenschlacken wurden am Hygiene Institut des Ruhrgebiets auf ihre toxikologischen Eigenschaften hin untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Ergebnisse toxikologischer Tests mit Hochofenschlacke (HOS), Elektroofenschlacke (EOS) und LD-Schlacke (LDS), /24a, 24b, 24c/

Test	Organismen	Kennzahl	Bewertung			
			HOS	EOS	LDS	
1	2	3	4	5	6	
Säugetiertoxizität nach OECD 401	Ratten	LC ₅₀	> 2000 mg/kg	> 2000 mg/kg	> 2000 mg/kg	
Fischttest nach OECD 203	am Eluat (1+10)	Goldorfen	LC ₅₀	> 1000 ml/l	> 1000 ml/l	
Algenzellvermehrungshemmtest nach OECD 201		Grünalgen	EC ₁₀	320 ml/l	150 ml/l	190 ml/l
			EC ₅₀	940 ml/l	420 ml/l	860 ml/l
Daphnientest nach OECD 202	Wasserflöhe	EC ₅₀	> 1000 ml/l	450 ml/l	520 ml/l	
Wassergefährdungsklasse			0	0	0	

Die untersuchten Schlacken sind als toxikologisch unbedenklich zu bewerten.

4.2.1.2.2 Auslaugverhalten von normalen Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen

4.2.1.2.2.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen

Die Schwermetallgehalte einiger Schlacken sind in Tabelle A1 im Anhang aufgelistet. Abhängig von den Rohstoffen der Schlacken können z. B. die Chrom- und Vanadiumgehalte gegenüber den sonstigen Ausgangsstoffen erhöht sein. Da es sich bei den Schlacken um mineralische Abfälle handelt, gelten die LAGA-Regeln „Anforderung an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln“ /73/, Kapitel 4 (Kraftwerksschlacken aus der Steinkohlefeuerung). Für die Eisenhüttenschlacken existieren keine Werte der LAGA. Die Zuordnungswerte der Klasse Z2 stellen nach DIBt-Merkblatt die Obergrenze für die Verwendung dar. Sie sind in der Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: Z2-Zuordnungswerte im Eluat von Eisenhüttenschlacken und Kraftwerksschlacken (Steinkohlefeuerung) /73/

Prüfgröße	Einheit	Kraftwerksschlacken (Steinkohlefeuerung) ¹⁾	Geringfügigkeitsschwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4
pH	–	10 - 12	-
Leitfähigkeit	mS/m	100	800 ²⁾
Chlorid, Cl ⁻	mg/l	50	-
Sulfat, SO ₄ ²⁻		200	-
Arsen, As		0,1	0,01
Quecksilber, Hg		0,002	0,001

1) gilt für Grobaschen/Kesselasche, bei Rostaschen ist der Zuordnungswert geringer, für Schmelzkammergranulat existieren keine Z2-Werte

2) angegeben für Eluate aus dem Standtest im Kapitel Beton des Teils II des Merkblatts (Entwurf) /11a/

Damit ist bei den Spurenelementen das DIBt-Merkblatt massgebend. Für die Leitfähigkeit gilt der Wert aus /11a/. Feststoffgrenzwerte gibt es für die Einbauklasse Z2 nicht.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden Ergebnisse von DEV-S4-Schütteltests an Schmelzkammergranulaten, vier Hochofenschlacken und fünf Stahlwerksschlacken aus vier verschiedenen Herstellungsverfahren gefunden. Die Gesamtgehalte dieser Schlacken liegen im Bereich der in Tabelle A1 angegebenen Werte. Die Daten sind in Tabelle 11 gegeben.

Tabelle 11: Eluatanalysen an Schmelzkammergranulat, Hochofenschlacke und Stahlwerksschlacke nach DEV-S4-Verfahren¹⁾ im Vergleich zum maßgeblichen Schwellenwert nach DIBt-Merkblatt bzw. LAGA-Regeln

Prüfgröße	Einheit	Schmelz- kammer- granulate /7/	Hochofen- schlacken /13, 75, 76, 77/	Stahlwerks- schlacken /76, 77/	Schwellenwert nach DIBt- Merkblatt bzw. LAGA-Regeln
1	2	3	4	5	6
pH	–	6,35 - 9,0	10,9 - 11	11,5 - 12,4	5 - 12
Leitfähigkeit	mS/m	1,3 – 9,3	56	271	800
Chlorid, Cl ⁻	mg/l	< 10	n. b.	n. b.	-
Sulfat, SO ₄ ²⁻		< 5 - 19	16 - 150	< 10 - 25	-
Nitrat, NO ₃ ⁻		< 0,5 - 6	n. b.	n. b.	-
Nitrit, NO ₂ ⁻		< 0,005 - 0,03			-
Fluorid, F ⁻		0,12			0,75
Arsen, As		< 0,0001-0,005	< 0,001 – 0,001	< 0,001 - < 0,01	0,01
Barium, Ba		0,03	n. b.	n. b.	-
Blei, Pb		< 0,0001 - 0,003	< 0,001	< 0,001 - 0,005	0,025
Cadmium, Cd		< 0,0001 - < 0,01	< 0,0001 - < 0,0005	< 0,0001 - < 0,0005	0,005
Chrom, Cr		0,002 - 0,04	< 0,001 - 0,001	0,003 - < 0,05	0,05
Chromat, Cr ^{VI}		< 0,01	n. b.	n. b.	0,008
Kobalt, Co		n. b.	< 0,002	< 0,002	0,05
Kupfer, Cu		0,005 - < 0,01	< 0,001 - 0,001	0,001 - < 0,002	0,05
Mangan, Mn		< 0,05 - 0,05	n. b.	n. b.	-
Nickel, Ni		< 0,005 - 0,011	< 0,002 - 0,004	< 0,002 - 0,005	0,05
Quecksilber, Hg		< 0,0001 - 0,0006	< 0,0005	< 0,0005 - < 0,001	0,001
Selen, Se		< 0,0001- 0,002	0,005	< 0,0005	0,01
Thallium, Tl		< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	-
Vanadium, V		< 0,01	n. b.	n. b.	-
Zink, Zn		0,002 - 0,03	< 0,002 - < 0,01	< 0,01	0,5
Ammonium, NH ₄ ⁺	0,13	n.b.	n. b.	-	
PAK	ng/l			20 - 76	200 ²⁾
CSB	mg/l			< 5,0	-

- 1) die angegebenen Spannweiten sind Minimal- und Maximalwerte vorliegender Untersuchungen. Mittelwerte, charakteristische oder repräsentative Quantilwerte sind hieraus nicht ableitbar.
- 2) gilt für PAK gesamt ohne Naphthalin

Die Eluatwerte liegen in der gleichen Größenordnung wie die von Zement (s. Abschnitt 4.1.1.2.1). Die Geringfügigkeitsschwellen werden im Allgemeinen eingehalten, allerdings sind bei Chromat und Cadmium teilweise die Nachweisgrenzen etwas zu hoch, so dass keine Aussage getroffen werden kann, ggf. ist ein Nachweis nach Stufe 2 erforderlich. Bemerkenswert ist, dass bei der Stahlwerksschlacke trotz sehr hohem Chromgehalt von 0,255 M.-% die Geringfügigkeitsschwelle im Eluat eingehalten wird. Offenbar findet hier eine Einbindung in die kristalline Matrix der Schlacken statt.

Bei der Bewertung von Gesteinskörnungen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit ist auch ein Vergleich mit den Grenzwerten für rezyklierten Zuschlag (s. Abschnitt 4.2.4) sinnvoll. Diese Grenzwerte werden deutlich unterschritten.

4.2.1.2.2 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

Über das Auslaugverhalten der Schlacken bei Einbindung in Zement liegen keine Ergebnisse vor, Hüttensand wurde jedoch, wie in Abschnitt 4.1.2.1.1 beschrieben, in einigen Quellen untersucht und zeigte einen positiven Einfluss auf die Auslaugraten. Hochofenschlacke erscheint daher unproblematisch. Für die übrigen Schlacken gilt, dass auf die Durchführung eines Standtests verzichtet werden kann, wenn die Eluatwerte die Grenzwerte für rezyklierten Zuschlag (s. Abschnitt 4.2.4) einhalten. Allerdings existieren nicht für alle Stoffe Grenzwerte in der DAfStb-Richtlinie, so kann z. B. die Auslaugung von Kobalt auf dieser Grundlage nicht bewertet werden. Werden die Geringfügigkeitsschwellen aus /11/ hier überschritten, muss ein Standtest durchgeführt werden.

4.2.1.2.3 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Gesteinskörnungen aus industriellen Prozessen

Bei den Kraftwerksschlacken hängt die Schwermetallbelastung wie bei den Flugaschen (s. Abschnitt 4.3.2) von dem eingesetzten Brennstoff ab. Vor einer Verwendung sollten die Schlacken auf ihre Gesamtgehalte an umweltrelevanten Stoffen hin untersucht werden. Gehen die Werte über die üblichen Gesamtgehalte (Tabelle A1 im Anhang) hinaus, sollte ein Schütteltest und ggf. ein Standtest durchgeführt werden.

4.2.2 Schwere Gesteinskörnungen

Das Hauptanwendungsgebiet für Schwerzuschläge ist der Strahlenschutzbeton. Aber auch für Ballastbetone werden sie eingesetzt. Die im Anwendungsbereich Strahlenschutz verwendeten Schwerzuschläge müssen den Anforderungen zum Schutz gegen Gamma- und Neutronenstrahlen genügen. Das DBV-Merkblatt Strahlenschutzbeton /50/ teilt die im Strahlenschutz verwendbaren Zuschläge in 4 Gruppen (s. Tabelle 6)

Tabelle 12: Zuschläge für Strahlenschutzbeton, /50, 51/

Einteilung	Vertreter	Rohdichte	abzuschirmende Strahlung
-	-	kg/dm ³	-
1	2	3	4
Zuschläge mit hoher Dichte	Baryt	4,0 - 4,3	Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, Elektronenstrahlung
	Illmenit	4,55 - 4,65	
	Magnetit	4,65 - 4,8	
	Hämatit	4,7 - 4,9	
	Schwermetallschlacken	3,5 - 3,8	
	Ferrosilizium	6,0 - 6,2	
	Ferrophosphor	5,8 - 6,2	
	Eisengranulat	6,8 - 7,5	
Zuschläge mit hoher Ordnungszahl	Baryt	4,0 - 4,3	Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, Elektronenstrahlung
	Schwermetallschlacken	3,5 - 3,8	
Zuschläge mit Kristallwasser	Limonit	3,5 - 3,65	Neutronenstrahlung
	Serpentin	ca. 2,6	
Zuschläge mit hohem Adsorptionsquerschnitt ¹⁾	Colemanit	2,3 - 2,4	
	Borfritte	2,4 - 2,5	
	Borcalcit	2,3 - 2,4	
	Borcarbid	ca. 2,5	

1) werden vorwiegend als Zusatzstoffe eingesetzt

Serpentin, Colemanit und die Borverbindungen sind keine Schwerzuschläge (Dichte kleiner 3,0 kg/dm³). Sie werden hier nur der Vollständigkeit halber mit angegeben.

Wie in der Tabelle angegeben, werden die schweren Zuschläge für das Abfangen von hochenergetischer Strahlung benötigt. Blei und bleihaltige Gesteine sind nicht geeignet, da Blei mit dem Zement reagiert und die Erhärtung beeinträchtigt. Zum Bremsen bzw. Einfangen der Neutronen sind leichte Elemente wie Wasserstoff oder Bor erforderlich. Man verwendet deshalb wasserhaltige Gesteine wie Serpentin und Limonit oder Bormineralien. Die Schwerzuschläge sind in Tabelle A6 im Anhang enthalten und mit „S“ gekennzeichnet.

Schwerzuschläge unterliegen im Allgemeinen keiner Güteüberwachung nach DIN 4226, da ein Einsatz im Beton nur in Sonderfällen erforderlich ist. Der Hersteller muss deshalb im Falle einer Verwendung der Zuschläge in Beton über die Zusammensetzung und Gleichmäßigkeit der Stoffe verbindliche Angaben machen und gegebenenfalls Analysen fachkundiger Laboratorien vorlegen /50/.

Zu Schwermetallgehalten von Schwerzuschlägen existieren nur sehr wenig Daten (s. Tabelle A1 im Anhang). Die vorhandenen Werte sind im Vergleich zu normalen und leichten Gesteinskörnungen sehr hoch. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Schwermetalle z. T. in oxidischer Form gebunden oder, im Fall von Baryt, als schwerlösliches Sulfat vorliegen. Ergebnisse von Auslaugversuchen sind im Rahmen dieser Literaturrecherche nicht gefunden worden. Eine nähere Betrachtung der Umweltverträglichkeit erscheint hier sinnvoll.

4.2.3 Leichte Gesteinskörnungen

Die leichten Gesteinskörnungen lassen sich in natürliche und künstlich hergestellte Materialien unterteilen. Dabei ist zu beachten, dass viele künstliche Leichtzuschläge aus natürlichen Mineralien oder Ton großteils ohne Einsatz von Additiven hergestellt werden. Die Tabelle 13 enthält eine Übersicht der gängigen Leichtzuschläge. Neben diesen Stoffen können auch verschiedene Holzprodukte (Holzwolle, -späne etc.) verwendet werden. Diese werden hier jedoch nicht weiter betrachtet, da sie, sofern keine chemische Behandlung vorgenommen wird, vom Standpunkt der Umweltverträglichkeit unproblematisch sind.

Tabelle 13: Leichte Gesteinskörnungen /23, 26, 27, 28, 29, 30, 31/

Leicht- zuschlag	Rohstoff	Entstehung / Herstellung		Eigenschaften
1	2	3		4
natürlich				
Natur- bims	poröses Vul- kangestein (Basalt, An- desit, Dazite, und Rhyo- lit) ¹⁾	entsteht bei explosiven Eruptionen als Ergussgestein		frost-, feuer-, wite- rungsbeständig, frei von wasser- löslichen Salzen
Tuff	poröses Ge- stein z. B. Rhyolit	abgelagerte, unter dem Einfluss von Wasser verkittete Aschen vulkanischen Ursprungs		-
Lava- schlacke	Lava	entsteht bei explosiven Eruptionen, die Porosität ist sehr unterschiedlich		chemisch entspricht Lavaschlacke in etwa Basalt.
künstlich				
Sinter- bims	Hochofen- schlacke oder Trüm- merfein- schutt, mit Abfallkoks vermischt	Sinterung in Verbindung mit schneller künstlich erzeugter Abkühlung des Materials (Saugzugsinterband)		-
Kessel- sand	-	Schlacke aus der Trockenfeuerung, be- steht aus agglomerierten Flugascheparti- keln.		glasige Struktur, durch einge- schlossene Luft- poren niedrige Kornrohichte
Ziegel- splitt	Ziegelsteine	Zerkleinerung von unbenutzten Ziegelsteinen		-
Blähton	Ton	Ton gra- nulieren und Brennen	Gasentwicklung entsteht durch Verbrennen organischer Bestandteile (teilweise werden Öle oder Ligninsulfonat zugesetzt), Sauerstoffabspaltung von Eisenoxid, Verdampfen von Kristallwasser	offenporiges Gefüge
Bläh- schiefer	Tonschiefer	Schiefer brechen und Brennen		-

Tabelle 13: Fortsetzung

Leichtzuschlag	Rohstoff	Entstehung / Herstellung	Eigenschaften
1	2	3	4
Blähglas / Schaumglas	Glas, meist Altglas	Glas wird gemahlen, mit Wasser, Bläh- und Bindemitteln vermischt auf ca. 900°C erhitzt und dadurch aufgebläht.	feinporige Struktur
Blähperlit	Perlit-Gestein ¹⁾ (vulkanischen Ursprungs)	kurzzeitig auf über 1000 °C erhitzt, dadurch entweicht chemisch gebundenes Wasser und Rohmaterial wird auf das 15 bis 20fache seines Volumens aufgebläht	-
Blähglimmer / Vermiculit	Glimmerschiefer	Zwischen den Schichten der Blättchenstruktur ist Kristallwasser chemisch gebunden. Durch kurzes Verweilen in spezieller Öfen wird das chemisch gebundene Wasser schockartig ausgetrieben, wobei der Glimmer auf das 10- bis 35fache seines Volumens aufgebläht wird	-

1) Zusammensetzung der Mineralien s. Tabelle A6 im Anhang

4.2.3.1 Auslaugverhalten von leichten Gesteinskörnungen

4.2.3.1.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von leichten Gesteinskörnungen

Hinsichtlich der Inhaltsstoffe sind die Leichtzuschläge mit den normalen Gesteinskörnungen vergleichbar, da sie in der Mehrzahl aus natürlichen Gesteinen und Ton bestehen, die ggf. künstlich aufgebläht werden. Neben diesen Stoffen wird Hochofenschlacke (s. Abschnitt 4.2.1.2) eingesetzt. Die natürlichen Gesteine sind i. d. R. chemisch-mineralogisch nur gering modifiziert verglichen mit denen, die als Normalzuschläge verwandt werden, sie unterscheiden sich hauptsächlich im Porengehalt. Auch die Hochofenschlacke kann als Normalzuschlag eingesetzt werden. Leichtzuschlag aus Ton ist chemisch-mineralogisch verändert.

Die künstlich hergestellten Leichtzuschläge werden meist bei hohen Temperaturen hergestellt. Mit einer Gefährdung durch organische Verbindungen ist daher nicht zu rechnen.

In /70/ sind vier Ziegelstein-Proben mit dem DEV-S4-Verfahren untersucht worden (ein HZ, zwei MZ und ein FZ). /13/ enthält einige Angaben zum Auslaugverhalten von Blähton.

Weitere Daten zu den übrigen Leichtzuschlägen sind im Rahmen der Literaturrecherche nicht gefunden worden.

Tabelle 14: Elutionsuntersuchung an Blähton und Mauerziegel im DEV-S4-Verfahren (Gehalt im Eluat) /13, 70/ im Vergleich zur jeweiligen Geringfügigkeitsschwelle und den Grenzwerten für rezyklierten Zuschlag

Element	Einheit	Blähton /13/	Mauerziegel /70/	Geringfügigkeits- schwelle nach DIBt-Merkblatt	Grenzwerte für rezyklierten Zu- schlag ¹⁾
1	2	3	4	6	5
Arsen	mg/l	n. n.	0,01 - 0,26	0,01	0,05
Barium		n. b.	0,05 - 0,11	-	-
Blei		n. n.	< 0,01 - 0,04	0,025	0,1
Cadmium		n. n.	< 0,01	0,005	0,005
Chrom		0,01	0,01 - 0,02	0,05 / 0,008 ²⁾	0,1
Kobalt		n. n.	0,01 - 3,1 ³⁾	0,05	-
Kupfer		0,01	0,01 - 0,02	0,05	0,2
Nickel		0,01	< 0,01	0,05	0,1
Quecksilber		n. b.	< 0,01	0,001	0,002
Thallium		n. b.	< 0,01	-	-
Zink		0,01	0,03 - 0,14	0,5	0,4

n. n.: nicht nachweisbar, n. b.: nicht bestimmt

1) s. Abschnitt 4.2.4.

2) der erste Wert gilt für Chrom gesamt, der zweite für Chromat

3) der Wert von 3,1 wurde nur für FZ gemessen, die übrigen Ziegel liegen bei 0,1. Es handelt sich wahrscheinlich um einen Ausreißer.

Eine Reihe von Schwermetallen ist nicht nachweisbar, leider sind die Nachweisgrenzen in der Quelle /13/ nicht angegeben, so dass diese Ergebnisse nicht bewertet werden können. Beim Mauerziegel liegen die Werte für Arsen, Blei, Chrom, Kobalt und Zink z. T. über den Werten, die bei der Auslaugung von Portlandzement im DEV-S4-Verfahren erreicht werden. Die Grenzwerte des DIBt-Merkblatts liegen bei der Hälfte der untersuchten Spurenelemente unter den Messwerten im Eluat der Ziegel bzw. unter den angegebenen Nachweisgrenzen. Der Nachweis der Unbedenklichkeit der Inhaltsstoffe ist damit hier nicht erbracht, eine Bewertung nach Stufe 2 des Bewertungskonzepts des DIBt-Merkblatts ist erforderlich.

4.2.3.1.2 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

Das Elutionsverhalten bei Einbindung der diversen Leichtzuschläge in Zementstein ist in der vorliegenden Literatur nicht untersucht worden, nach /13/ ist jedoch für gefügedichten Leichtbeton das gleiche Auslaugverhalten wie für Normalbeton zu erwarten. In Abschnitt 4.2.4 wird erläutert, dass beim Einhalten der Grenzwerte für rezyklierte Gesteinskörnungen /25/ davon ausgegangen werden kann, dass die Geringfügigkeitsschwellen bei einer Bewertung nach Stufe 2 eingehalten werden. Das gilt auch für die Leichtzuschläge. Die Grenzwerte der DAfStb-Richtlinie /25/ werden in der Regel eingehalten, lediglich bei Arsen wird der Grenzwert teilweise überschritten.

Soll der Mauerziegel dennoch als Zuschlag eingesetzt werden, so ist für Arsen eine Untersuchung im Standtest durchzuführen, um die Umweltverträglichkeit zu belegen. Dazu existieren jedoch keine Daten.

In /82/ werden ebenfalls Proben von Mauersteinen (MZ, KD, Pb, LB) im Schütteltest eluiert. Die Gesamtgehalte liegen in der gleichen Größenordnung wie bei /70/, die Arsengehalte im Eluat liegen jedoch unter 0,001 mg/e, obwohl das Material auf < 125 µm aufgemahlen wurde. Hier werden die Geringfügigkeitsschwellen somit eingehalten.

4.2.3.2 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von leichten Gesteinskörnungen

Die vorhandenen Daten aus dem DEV-S4-Verfahren deuten darauf hin, dass die Umweltverträglichkeit von Leichtzuschlägen aus Ton nicht von vornherein angenommen werden kann. Eine Untersuchung mit dem Schütteltest ist sinnvoll. Bei einer Überschreitung der Grenzwerte der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Zuschläge sollte auf eine Anwendung verzichtet werden.

Prinzipiell steht die Umweltverträglichkeit vieler Leichtzuschläge jedoch außer Frage, so werden Naturbims, Tuff, Lavaschlacke, Ziegelsplitt, Blähton, Blähschiefer, Blähglas und Schaumglas bei der Dachbegrünung mit Erfolg eingesetzt. In /12/ wurden die vegetationsstechnischen Eigenschaften dieser Stoffe durchgehend positiv bewertet. Eine Gefahr für Pflanzen und Bodenlebewesen geht von diesen Stoffen demnach nicht aus. Neben diesen Stoffen wurde auch Schmelzkammergranulat und Rostasche betrachtet. Die untersuchten Proben verhielten sich inert, es wird allerdings darauf hingewiesen, dass dies nicht unbedingt für alle Schlacken gilt.

4.2.4 Rezyklierte Gesteinskörnung

Da der Teil 100 der DIN 4226 noch nicht bauaufsichtlich eingeführt ist, gilt zur Zeit hier die DAfStb-Richtlinie für Beton mit rezykliertem Zuschlag /25/. Die Richtlinie gibt an, wie viel rezyklierter Zuschlag in Abhängigkeit vom Typ des Bauteils eingesetzt werden darf, und welche Voraussetzung der Zuschlag erfüllen muss. Es werden auch Höchstwerte an Schadstoffgehalten angegeben, die am Eluat in Anlehnung an das DEV-S4-Verfahren aus dem Material im Anlieferungszustand bestimmt werden. In Tabelle 15 sind diese Höchstwerte den Geringfügigkeitsschwellen aus dem DIBt-Merkblatt gegenübergestellt.

Tabelle 15: Vergleich der Grenzwerte für den Gehalt von Spurenelementen nach DAfStb-Richtlinie mit den Geringfügigkeitsschwellen nach DIBt-Merkblatt /11, 25/

Parameter	Einheit	Grenzwert nach DAfStb-Richtlinie	Geringfügigkeitsschwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4
Chlorid	mg/l	150	-
Sulfat		600	-
Antimon	µg/l	-	10
Arsen		50	10
Blei		100	25
Cadmium		5	5
Chrom ges.		100	50
Chromat		-	8
Kobalt		-	50
Kupfer		200	50
Molybdän		-	50
Nickel		100	50
Quecksilber		2	1
Selen		-	10
Zink		400	500
Zinn		-	40

Zunächst ist festzustellen, dass im DIBt-Merkblatt mehr Schadstoffe Berücksichtigung finden als in der Richtlinie. Neben den oben aufgeführten anorganischen Parametern werden auch Cyanid, Fluorid und eine Reihe organischer Parameter begrenzt. Die für die Auslaugung aus Beton wesentlichen Elemente sind jedoch in der Richtlinie enthalten. Die Geringfügigkeitsschwellen des DIBt-Merkblatts beziehen sich auf praxisrelevante Auslaugbedin-

gungen. Die sind beim DEV-S4-Verfahren nicht gegeben. Die Relationen sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden: In /5/ wird für einen CEM I 32,5 R im DEV-S4-Verfahren eine eluierbare Chrommenge von 0,78 mg/kg bestimmt, das heißt, im Eluat hat sich ein Gehalt von 0,078 mg/l eingestellt. Im Standtest an einem Beton ohne Zusatzstoffe (B1 in /5/) werden $1,5 \text{ mg/m}^2$, also 0,018 mg/l, eluiert. In der Simulationsberechnung ergibt sich in 30 cm Entfernung vom Bauteil für diesen Beton ein Wert von ca. 0,0045 mg/l. Dieser Wert ist mit der Geringfügigkeitsschwelle zu vergleichen.

Unter diesen Voraussetzungen erscheinen die Grenzwerte der DafStb-Richtlinie ausreichend. Recyclingzuschlag, der der Richtlinie entspricht, ist als umweltverträglich zu bewerten. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Gehalt an organischen Stoffen vernachlässigbar ist bzw. dem DIBt-Merkblatt /11/ entspricht.

4.3 Betonzusatzstoffe

4.3.1 Allgemeines

Der Einsatz von Betonzusatzstoffen ist in DIN EN 206-1 /86/ Abschnitt 5.1.6 geregelt. Dort werden die einzusetzenden Stoffe festgelegt. Zusatzstoffe nach Typ I (nahezu inaktive Zusatzstoffe) sind Gesteinsmehle nach DIN 4226-1 /88/ und Pigmente nach DIN EN 12 878 /93/. Der Typ II (puzzolanische oder latenthydraulische Zusatzstoffe) umfasst neben Flugasche nach DIN EN 450 /89/ auch Silikastaub nach DIN EN 13 263. Hier existiert derzeit nur eine Vornorm (prEN 13 263-1 /91/). Nach DIN 1045-2 /87/ ist auch Trass nach DIN 51 043 /92/ als Zusatzstoff vom Typ II geeignet. Des weiteren dürfen auch Betonzusatzstoffe verwendet werden, die eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) besitzen und einer Güteüberwachung nach DIN 18 200 /97/, bestehend aus Eigen- und Fremdüberwachung, unterworfen sind.

Es gibt auch für Braunkohlenflugaschen und Hartbraunkohlenflugaschen bauaufsichtliche Zulassungen, die jedoch von untergeordneter Bedeutung sind und hier nicht betrachtet werden. Behandelt werden Steinkohlenflugasche, Silikastaub bzw. Mikrosilika, Trass, Gesteinsmehle, Pigmente und organische Zusatzstoffe betrachtet.

4.3.2 Steinkohlenflugasche

Steinkohlenflugasche (SFA) entsteht bei der Verbrennung fein gemahlener Kohle und wird durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung aus Abgasen von Feuerungsanlagen gewonnen. Es handelt sich um einen feinkörnigen Staub, der hauptsächlich aus kugelförmi-

gen, glasigen Partikeln besteht, puzzolanische Eigenschaften hat und Im Wesentlichen aus SiO_2 und Al_2O_3 besteht. Der Gehalt an reaktionsfähigem SiO_2 muss mindestens 25 M.-% betragen /90/.

(Anmerkung: Wird Steinkohlenflugasche als Zementbestandteil verwendet, so wird nach DIN EN 197-1 zwischen kieselsäurereicher Flugasche (V) mit einem Gehalt an reaktionsfähigem Calciumoxid (CaO) unter 10 M.-% und kalkreicher Flugasche (W) mit mindestens 10 M.-% CaO unterschieden. Die kalkreiche Flugasche hat neben den puzzolanischen auch hydraulische Eigenschaften. Ansonsten sind die Anforderungen identisch.)

Durch den Herstellungsprozess der Flugasche werden Elemente und Verbindungen mit niedrigen Siedepunkten, die aus der Kohle freigesetzt werden, in der Flugasche angereichert. Kritische Elemente sind Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Nickel, Kupfer, Selen, ggf. Vanadium und Zink. Durch Rauchgasbehandlung kann zudem Ammoniak angereichert werden (s. Abschnitt 4.3.2.3). Aus der Tabelle A1 im Anhang ist ersichtlich, dass die Gehalte der oben genannten Spurenelemente z. T. deutlich erhöht sind. Die Verbrennungsbedingungen haben einen Einfluss auf die Gehalte in der jeweiligen Flugasche /5/, der Haupteinfluss liegt jedoch beim verwendeten Brennstoff (Regelbrennstoff und Sekundärbrennstoff).

4.3.2.1 Toxikologische Daten

In /3/ ist die aquatische Toxizität von fünf verschiedenen SFA mit großen Schwankungsbreiten in den Spurenelementgehalten (gesamt) untersucht worden. Die Ergebnisse können als repräsentativ für SFA angesehen werden, sofern keine erheblich veränderten Schwermetallgehalte auftreten.

Für die Bestimmung der Fisch-, Bakterien-, Algen- und Daphientoxizität wurde ein Eluat verwendet, das im Verhältnis Steinkohlenflugasche zu Wasser von 1 : 1 hergestellt wurde. Bei der Prüfung der Säugetiertoxizität wurde Steinkohlenflugasche im Originalzustand den Ratten verabreicht.

Tabelle 16: Ergebnisse toxikologischer Tests mit SFA /3/

Test	Organismen	ermittelter Parameter	Wert
1	2	3	4
Säugetiertoxizität	Ratten	14-Tage LC ₅₀	> 2000 mg/kg Körpergewicht
Fischttest nach DIN 38 412 Teil 31- L 15	Goldorfen	LC ₅₀	BWZ _F = 0
Algenzellvermehrungshemmttest nach DIN 38 412 Teil 9	Grünalgen (Scenedesmus subspicatus)	EC ₁₀ (72 h)	700 bis > 1000 ml/l
Daphnientest nach DIN 38 412 Teil 11	Wasserflöhe (Daphnia magna)	24 h EC ₅₀	70 bis > 1000 ml/l
Bakterientoxizität nach DIN 38 412 Teil 15	polivalente Mikroorganismen einer kommunalen Kläranlage	EC ₅₀	BWZ _B = 0 bis 0,2

Aufgrund dieser Ergebnisse kann SFA in die Wassergefährdungsklasse 0 eingestuft werden.

4.3.2.2 Auslaugverhalten von Flugasche

4.3.2.2.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Flugasche

Wie unter Abschnitt 4.3.2 beschrieben, liegen die Gesamtgehalte der Spurenelemente z. T. deutlich höher als bei Zement. Diese Gehalte an umweltrelevanten Stoffen sind für die Umweltverträglichkeit jedoch nicht ausschlaggebend. Ein Großteil der Spurenelemente ist in Oxiden gebunden, oder in die glasige bzw. kristalline Matrix eingeschlossen. Verfügbar sind lediglich die Oberflächenverbindungen, die in leicht löslicher Form vorliegen, oder die bei der Reaktion im alkalischen Milieu des Zementsteins mobilisiert werden können. Im Rahmen der Stufe 1 wird der Schütteltest an der Originalsubstanz betrachtet (s. Tabelle 17).

Tabelle 17: Ergebnisse von Elutionsversuchen an Steinkohlenflugaschen nach dem DEV-S4-Verfahren¹⁾

Prüfgröße	Einheit	SFA ²⁾	SFA ³⁾	Geringfügigkeitsschwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4	5
pH	–	7 - 12,6	10,1 – 11,9	-
Leitfähigkeit	mS/m	27 – 700	92 - 211	800
Chlorid, Cl ⁻	mg/l	0,4 - 23	< 10 - 50	-
Sulfat, SO ₄ ²⁻		94 - 1700	326 - 1080	-
Phosphat, PO ₄ ³⁻		< 0,2	< 0,5 - 1,35	-
Nitrat, NO ₃ ⁻		< 0,1 - 4,2	< 2	-
Nitrit, NO ₂ ⁻		< 0,04 - 1,5	0,016 - 0,13	-
Fluorid, F ⁻		0,1 - 11	0,42 - 2,3	0,75
Sulfid, S ²⁻		<0,03	n. b.	-
Sulfit, SO ₃ ²⁻		< 1	n. b.	-
Cyanid ges., CN ⁻		< 0,01	< 0,01	-
Antimon, Sb		0,003 - 0,07	0,017 - 0,077	0,01
Arsen, As		0,002 - 0,26	0,005 - 0,64	0,01
Barium, Ba		0,07 - 0,5	0,05 - 0,66	-
Beryllium, Be		< 0,002	< 0,002	-
Blei, Pb		< 0,05	< 0,05	0,025
Bor, B		0,14 - 1,04	2,76 - 12,16	-
Cadmium, Cd		< 0,01	<0,005-0,008	0,005
Chrom, Cr		< 0,01 - 0,47	0,15 - 2,25	0,05
Chromat, Cr(VI)		< 0,01 - 0,29	0,07 - 1,1	0,008
Kobalt, Co		< 0,01	< 0,01	0,05
Kupfer, Cu		< 0,02	< 0,01	0,05
Mangan, Mn		< 0,05	<0,01 - 0,02	-
Nickel, Ni		< 0,01 - 0,05	< 0,05	0,05
Quecksilber, Hg		< 0,0005	<0,0002	0,001
Selen, Se	<0,1	0,015 - 0,238	0,01	
Thallium, Tl	<0,01	< 0,01 - 0,02	-	
Vanadium, V	0,05 - 0,53	0,2 - 0,62	-	
Zink, Zn	< 0,15	< 0,01	0,5	
Zinn, Sn	< 0,10	< 0,005	0,04	
Ammonium, NH ₄ ⁺	0,09 - 1,9	0,14 - 3	-	
CSB (chemischer Sauerstoffbedarf)	mg/l	< 57	< 15	-

Tabelle 17: Fortsetzung

Prüfgröße	Einheit	SFA ²⁾	SFA ³⁾	Geringfügigkeitsschwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4	5
TOC (Total Organic Carbon)	mg/l	n. b.	0,05 - 1	20
PAK	ng/l	0,00001 - 0,00164	n. b.	200 ⁴⁾
Phenole	mg/l	0,04	< 0,01	0,02
Kohlenwasserstoffe		< 0,10	< 0,10	-
EOX (Extrahierbares, organisch gebundenes Halogen)		< 0,02	n. b.	-
AOX (Absorbierbares organisch gebundenes Halogen)		n. b.	< 0,01 - 0,075	-

- 1) Die angegebenen Spannweiten sind Minimal- und Maximalwerte vorliegender Untersuchungen. Mittelwerte, charakteristische oder repräsentative Quantilwerte sind hieraus nicht ableitbar.
- 2) Angaben aus Quelle /7/
- 3) Werte aus Quelle /3/ für die 5 Flugaschen an denen die toxikologischen Untersuchungen durchgeführt wurden.
- 4) für PAK gesamt ohne Naphthalin, für Naphthalin liegt die Grenze bei 2000 ng/l

Die Geringfügigkeitsschwellen werden für eine Reihe von anorganischen Stoffen z. T. deutlich überschritten (F⁻, Sb, As, Pb, Cd, Cr, Cr^{VI}, Se). Hier ist eine Bewertung nach Stufe 2 erforderlich.

Über die Auslaugung von organischen Stoffen liegen insgesamt nur wenig Daten vor. Die Ergebnisse des DEV-S4-Verfahrens (Tabelle 17) zeigen, dass die ausgelaugten Stoffmengen organischer Schadstoffen sehr gering sind; die Geringfügigkeitsschwellen des DIBt-Merkblatts /11/, werden selbst bei diesem scharfen Test, der noch keinerlei Einbindung im Zementstein berücksichtigt, nur im Einzelfall für Phenole überschritten. Es ist nicht zu erwarten, dass aus Flugaschebetonen nennenswerte Mengen an organischen Substanzen ausgelaugt werden.

Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf die anorganischen Inhaltsstoffe.

4.3.2.2.2 Bewertung der mobilen Inhaltsstoffe

Versuche zur Bestimmung der auslaugbaren Anteile bei Einbindung in Zement sind in einer Reihe von Quellen durchgeführt worden (z. B. /5, 7, 14, 38/). Neben Daten zum Langzeitstandtest liegen einige Ergebnisse von Schütteltests an Mörteln mit Flugasche vor, die hier mit aufgenommen worden sind.

4.3.2.2.2.1 Schütteltests

In /14/ wurden Versuche an flugaschehaltigem Mörtel mit dem DEV-S4-Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 zusammengestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse von Elutionsversuchen und an Mörtelproben aus CEM I 32,5 R mit und ohne Steinkohlenflugasche¹⁾ ($w/(z+0,5 \cdot f) = 0,5$) nach dem DEV-S4-Verfahren /14/ (umgerechnet auf Eluatkonzentrationen)

Prüfgröße	Einheit	Mörtel ohne SFA	Mörtel mit SFA	Geringfügigkeitsschwelle nach DIBt-Merkblatt
1	2	3	4	5
Arsen, As	mg/l	< 0,01	< 0,01	0,01
Barium, Ba		1,6	1,6	-
Blei, Pb		0,04	0,1	0,025
Cadmium, Cd		< 0,01	< 0,01	0,005
Chrom, Cr		n. b.	n. b.	0,05
Chromat, Cr(VI)		0,7	0,5	0,008
Kobalt, Co		0,02	0,06	0,05
Kupfer, Cu		0,06	0,1	0,05
Nickel, Ni		0,02	0,02	0,05
Quecksilber, Hg		< 0,01	< 0,01	0,001
Thallium, Tl		< 0,01	< 0,01	-
Vanadium, V		n. b.	n. b.	-
Zink, Zn		0,05	0,3	0,5

1) Flugasche mit mittleren bis hohen Schwermetallgehalten

Wie aus der Tabelle ersichtlich, werden mit dem DEV-S4-Verfahren aus Mörtel mit Steinkohlenflugasche kaum mehr Schwermetalle als aus dem entsprechenden Nullmörtel gelöst, für wasserlösliches Chromat ist der Wert sogar geringer. Die Geringfügigkeitsschwellen werden bei diesem Test von beiden Mörteln für Blei, Chromat und Kupfer nicht einge-

halten, bei Cadmium und Quecksilber liegen die Nachweisgrenzen zu hoch. Dieser Test ist für die Bewertung der Umweltverträglichkeit zu scharf.

In /38/ wurde ein dem DEV-S4-Verfahren ähnlicher Schütteltest eingesetzt: Karbonatisierte Proben, zerkleinert auf 1 bis 5 mm, wurden im Verhältnis L/S = 10 in Wasser über 6 Stunden geschüttelt (Startwert: pH 6,2). Als Variante wurde CO₂ in das Eluat eingeblasen um den Anstieg des pH-Werts während der Elution zu verringern. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 19 zusammengefasst, die Zusammensetzung der Proben ist in Tabelle 19 gegeben.

Tabelle 19: Ergebnisse des Schütteltests nach /38/ (Probenalter 28 Tage)

Probe	Testvariante	pH	Zn	Cr	Cu	Mn	Cd	Pb
-	-	-	mg/l					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	ohne CO ₂ - Begasung	12,7	0,009	0,064	0,005	b. d.	0,003	0,036
B		12,7	0,008	0,059	0,004	b. d.	0,004	0,038
C		12,7	0,006	0,078	0,015	b. d.	0,003	0,036
D		12,8	0,006	0,086	0,010	b. d.	0,003	0,036
E		12,6	0,006	0,092	0,020	b. d.	0,003	0,033
F		12,6	0,007	0,099	0,014	b. d.	0,003	0,033
A	mit CO ₂ - Begasung	6,6	0,085	0,117	0,008	0,026	0,004	0,061
B		6,3	0,124	0,150	0,035	0,101	0,005	0,070
C		7,0	0,036	0,071	0,022	0,028	0,002	0,036
D		6,4	0,121	0,140	0,047	0,094	0,003	0,066
E		6,7	0,109	0,130	0,049	0,139	0,003	0,061
F		6,5	0,142	0,171	0,038	0,205	0,003	0,055

b. d.: kleiner als Nachweisgrenze der ICP AES

Tabelle 20: Zusammensetzung der Proben /38/

Probe	w/b	Verhältnis Sand / Bindemittel	SFA- Gehalt	
			M.-% Zement (z) durch Flugasche ersetzt	M.-% von z
1	2	3	4	5
A	0,5	1,6	0	0
B	0,6	2,0	0	0
C	0,5	1,6	25	33
D	0,6	2,0	25	33
E	0,5	1,6	40	67
F	0,6	2,0	40	67

Die Geringfügigkeitsschellen werden für Chrom und Blei überschritten, was in dem Testverfahren begründet ist. Hier sollen der Einfluss der CO₂-Begasung und der Unterschied in der Auslaugung, der sich bei Verwendung von Flugasche im Vergleich zum Nullmörtel ergibt, betrachtet werden.

Durch den niedrigeren pH-Wert bei der CO₂-Begasung steigen die ausgelaugten Schwermetallmengen z. T. stark an. Am stärksten ist der Anstieg für Mangan und Zink (ca. Faktor 10), Chrom-, Kupfer- und Bleifreisetzen werden etwa verdoppelt, bei Cadmium ist der Effekt gering.

Bei Verwendung von Flugasche steigt die Auslaugung von Kupfer. Die Freisetzung von Zink, Chrom und Mangan erhöht sich erst bei den Proben E und F. Das Verhältnis Flugasche zu Zement beträgt hier $f/z = 2/3$. Der anrechenbare Maximalgehalt der Flugasche liegt nach DIN EN 206-1 /86/ bei $f/z = 0,33$, d. h. solche Flugaschemengen werden höchstens in Ausnahmefällen eingesetzt. Bei Blei und Cadmium ist keine starke Änderung festzustellen, tendenziell nehmen die ausgelaugten Mengen ab.

Insgesamt ist festzustellen, dass die bei der Elution mit Wasser freigesetzten Stoffmengen auch bei Zerkleinerung nur Bruchteile der Gesamtgehalte sind (vgl. Tabelle A1 im Anhang). Auch die bei konstantem pH-Wert durchgeführten Tests (z. B. pH 4 oder pH 12, /5/) liefern deutlich geringere Mengen an ausgelaugten Schadstoffen, als in den Ausgangsstoffen, insbesondere in der Flugasche, enthalten sind. Die hohen Gesamtgehalte der Flugasche liefern keinen Anhaltspunkt für die Auslaugung aus Beton.

4.3.2.2.2 Standtest

Maßgeblich für die Bewertung nach Stufe 2 des DIBt-Merkblatts ist der Standtest. Die Stoffmengen, die mit diesem Verfahren eluiert werden sind generell deutlich niedriger als in den verschiedenen Schütteltests. Der Einfluss von SFA auf die Gehalte im Eluat wird z. B. in /5/ und /38/ untersucht. In /5/ wird z. B. für Kupfer und Zink eine Reduktion der Schadstoffauslaugung festgestellt, die auf die gefügevverdichtenden Eigenschaften der Flugasche zurückgeführt wird (s. Tabelle 21).

Tabelle 21: Ergebnisse von Standtests an Mörtel- und Betonproben aus CEM I 32,5 R mit und ohne Steinkohlenflugasche für eine Elutionszeit von 56 Tagen¹⁾ ($w/(z+0,5 \cdot f) = 0,5$)

Prüfgröße	Einheit	Mörtel		Beton	
		ohne SFA	mit SFA ²⁾	ohne SFA	mit SFA ³⁾
1	2	3	4	5	6
Arsen, As	mg/m ²	< 0,34	< 0,32 - < 0,52	< 0,38	< 0,39
Blei, Pb		1,38	< 0,32 - 0,52	< 0,38	< 0,39
Cadmium, Cd		< 0,34	< 0,32 - < 0,52	< 0,38	< 0,39
Chrom, Cr		1,75	0,41 - 2,91	1,49	1,8 - 3,15
Kupfer, Cu		0,89	0,35 - 0,71	0,44	0,57 - 0,81
Nickel, Ni		< 0,68	< 0,65 - < 1,03	n. b.	n. b.
Zink, Zn		3,68	0,61 - 3,41	2,85	1,23 - 2,84

- 1) Die Freisetzung nach 56 Tagen wurde zum besseren Vergleich aus den Werten der Standtests in /5/, die über unterschiedliche Zeitspannen liefen, berechnet.
- 2) Spannweiten der Flugaschen SFA1 bis SFA5, Tabelle 22
- 3) Spannweiten der Flugaschen SFA1 und SFA2, Tabelle 22

In /38/ werden dagegen tendenziell höhere Werte für flugaschehaltige Mörtel gemessen. Chrom nimmt in beiden Quellen eine Sonderstellung ein, da hier keine klare Tendenz zu ersichtlich ist. Die Zusammensetzung der einzelnen Mörtel ist für /38/ in Tabelle 20 und für /5/ in Tabelle 22 gegeben.

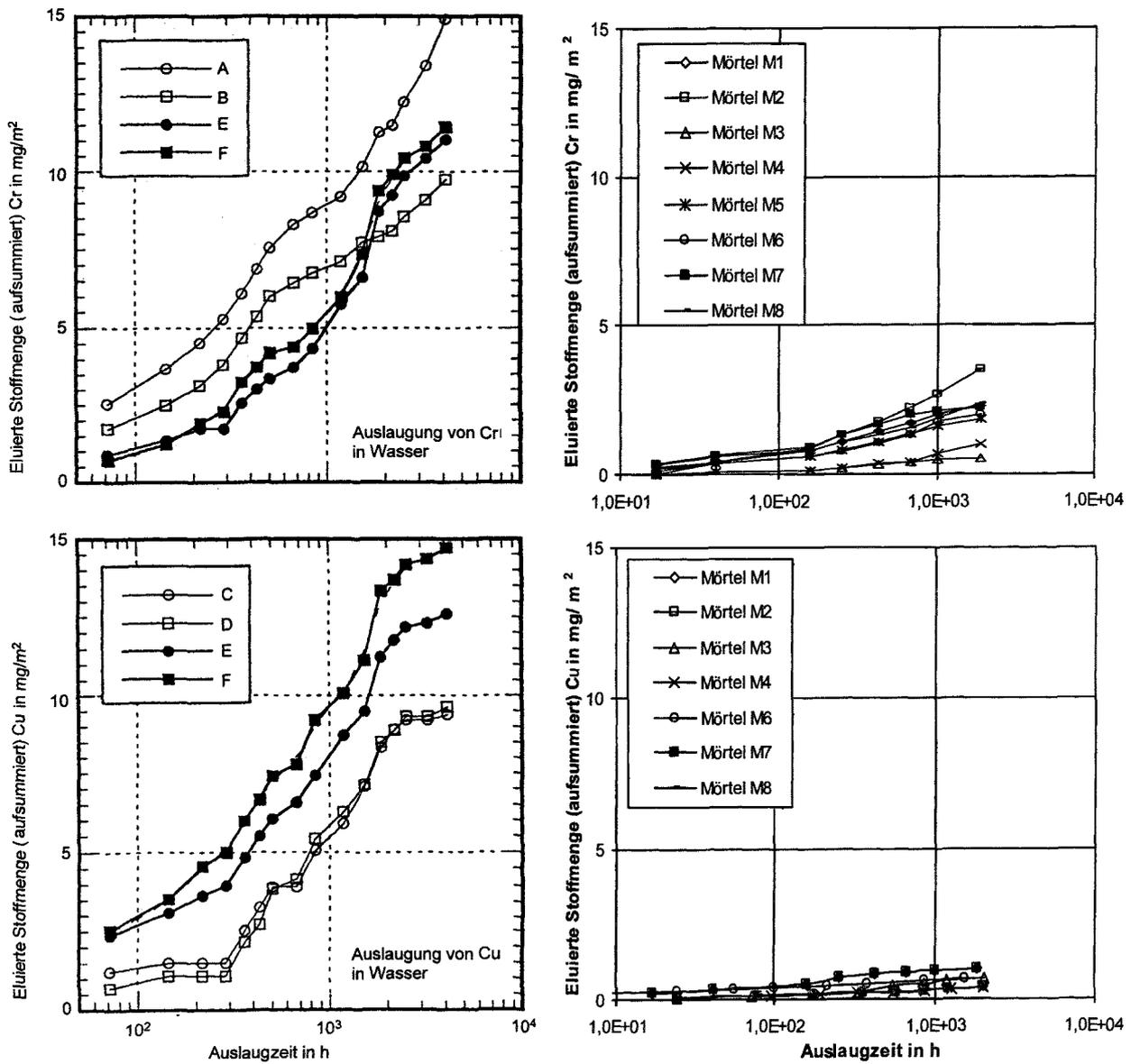


Bild 1: Eluierte Stoffmenge aus Mörteln nach /38/ (links) und /5/ (rechts)

Tabelle 22: Zusammensetzung der Proben /5/

Probe	Zementart	w/b	verwendete SFA	SFA- Gehalt
-	-	-	-	M.-% von z
1	2	3	4	5
M1	CEM I 32,5R	0,5	-	0
M2			SFA 1 (Schmelzkammerasche): hohe Feinheit, relativ hohe Schwermetallgehalte	25
M3			SFA 2 (Schmelzkammerasche): etwas geringere Feinheit als SFA 1, mittlere Schwermetallgehalte	25
M4			SFA 3 (Trockenfeuerungsasche): niedrige Feinheit, mittlere Schwermetallgehalte	25
M5			SFA 4 (Trockenfeuerungsasche): mittlere Feinheit, geringe Schwermetallgehalte	25
M6			SFA 5 (Trockenfeuerungsasche): mittlere Feinheit, mittlere Schwermetallgehalte	25
M7	CEM III/A		-	0
M8	32,5		SFA 1	25

In /38/ wurden insbesondere für Kupfer deutlich höhere Auslaugraten bestimmt. Der Kupfergehalt des verwendeten Zements liegt etwa 1,5 mal höher als beim CEM I aus /5/. Das allein erklärt jedoch nicht den Unterschied in der Auslaugung. Die Versuchsbedingungen sind ähnlich, in /38/ wurde im Verhältnis $V_L/V_S = 3$ eluiert. Das entspricht bei den gewählten Prismen einem V_L/O -Verhältnis von $26,7 \text{ l/m}^2$ (bei /5/ 80 l/m^2). Der Wechsel des Eluats erfolgte bei /38/ in abgestuften Intervallen (zunächst alle 3 Tage, dann alle 7 Tage, alle 14 Tage und nach einem Elutionszeitraum von über 100 Tagen alle 28 Tage). Der Eluentenwechsel in /5/ folgt der Gleichung $t_n = t_1 \cdot n^2$. Dadurch werden die Eluate in /38/ zu Anfang seltener, später öfter als in /5/ gewechselt. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass die Freisetzung dadurch derart stark beeinflusst wird.

Die Kurven zeigen in jedem Fall, dass trotz der höheren Gesamtgehalte bei Verwendung von Flugasche keine wesentlichen Änderungen der eluierten Stoffmengen auftreten. Bei den übrigen in /5/ untersuchten Elementen wurde ein ähnliches Verhalten festgestellt (messbare Konzentrationen wurden für Ba, Cr, Cu, und Zn, teilweise für Pb festgestellt).

Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen bzw. die Freisetzungen können nicht direkt mit den Geringfügigkeitsschwellen nach /11/ verglichen werden. Um die Konzentration am Ort der Beurteilung im Kontaktgrund zu ermitteln, ist eine Modellsimulation mit einem Transportprogramm notwendig. In /11a/ sind Werte für die Freisetzung nach 56 Tagen angegeben, die den Geringfügigkeitsschwellen entsprechen. Die Kurven aus Quelle /38/ erreichen bei 56 Tagen eine Freisetzung von 6,5 bis 10,5 mg/m² für Chrom, das vermutlich als Chromat vorliegt, und 7 bis 11,5 mg/m² für Kupfer. Die zulässigen Freisetzungen liegen bei 4 mg/m² für Chromat und 24 mg/m² für Kupfer. Die Auslaugung von Kupfer liegt also trotz der deutlich erhöhten Werte noch im zulässigen Bereich, während die Werte für Chrom bei diesem Versuch überschritten sind, dies gilt unabhängig vom Einsatz von Flugasche und scheint daher eher in der Versuchsdurchführung begründet zu sein.

Für die Versuche nach /5/ ist für Chrom eine Modellrechnung durchgeführt worden, bei der die Freisetzungsraten und die mobilisierbaren Stoffmengen der eingesetzten Versuchsbetone berücksichtigt wurden. Das Verfahren entspricht den Vorgaben aus /11a/, bezüglich der Versuchsdurchführung und der Rahmenbedingungen zur Modellierung (Ort der Beurteilung, zeitliche Mittelung, Modellgröße, Bodenbeschaffenheit und Grundwassergefälle) und ist damit exakter als die Ergebnisse nach /38/. Es zeigte sich, dass für die maßgebliche Kontaktgrundwasserschicht von 30 cm für keinen der verwendeten Betone – mit oder ohne Flugasche – die Geringfügigkeitsschwelle überschritten wurde.

4.3.2.3 Freisetzung flüchtiger Substanzen

Zur Erstickung der Rauchgase wird in Steinkohlekraftwerken oft Ammoniak in den Rauchgasstrom eingedüst (Verfahren der Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR)). Mit Hilfe von Katalysatoren werden die Stickstoffoxide zu Stickstoff und Wasserstoff reduziert. Nicht verbrauchtes Ammoniak kondensiert zu 80% als Ammoniumhydrogensulfat an der Flugasche. Im alkalischen Milieu des Zementsteins wird Ammoniak aus seinen Salzen verdrängt und kann gasförmig freigesetzt werden.

In Versuchen an Zementestrich mit ammoniumsalzhaltigen Flugaschen in Konzentrationen bis 314 mg Ammoniumsalz pro kg Flugasche und Flugaschegehalten von 123 kg/m³ erreichte die Raumluftkonzentration nur den Geruchsschwellenwert. Dieser liegt bei 3,8 mg/m³ Raumluft, während der MAK-Wert bei 31 mg/m³ liegt. Die Freisetzung war nach einem Tag nicht mehr messbar, bei belüfteten Arbeitsstellen ist die Geruchsbelästigung kaum wahrnehmbar. In einer ordnungsgemäß funktionierenden Verbrennungsanlage kann ein Ammoniumsalzgehalt über 200 mg/kg in Flugaschen nicht auftreten /9/.

In weiteren Untersuchungen an 10 handelsüblichen Steinkohlenflugaschen wurden im Fluss säureverfahren Gehalte an freisetzbarem Ammoniak von 8 bis 128 mg/kg bestimmt. Dabei ist davon auszugehen, dass mit diesem Aufschlussverfahren der gesamte enthaltene Stickstoff erfasst wird. Bei der Anwendung im Beton wird jedoch nicht das gesamte Ammoniak freigesetzt, da die Flugasche im Verlauf der Hydratation nur langsam angelöst wird.

Die Flugasche mit dem höchsten Ammoniakgehalt der Versuchsreihe, die auch bei weniger scharfen Analyseverfahren hohe Werte lieferte, wurde bei Raumtemperatur nach der Exikatormethode /98/ untersucht.

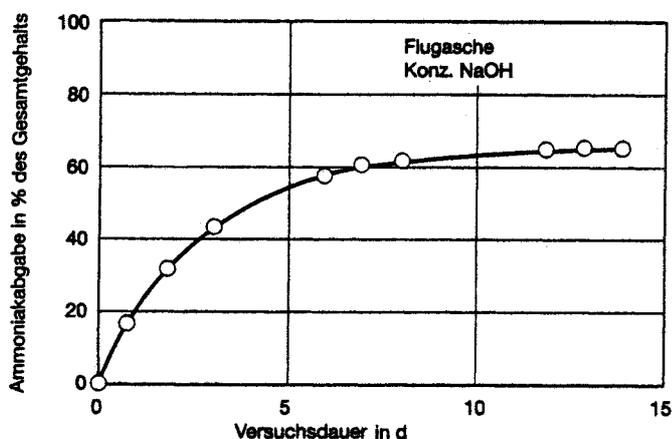


Bild 2: Ammoniakabgabe aus SFA bei Lagerung in Natronlauge /9/

Bild 2 zeigt die Freisetzung bei Lagerung in Natronlauge. Die Freisetzungsrates sinkt relativ schnell ab, ist aber nach 14 Tagen noch nicht ganz auf Null gefallen. Bei dieser Flugasche werden unter den gewählten Versuchsbedingungen 65% des gesamten Ammoniums ausgelaugt. Anhand der Kurve wurde die Freisetzung von Ammoniak und die dadurch erreichbare Konzentration in einen 2,5 m hohen Raum innerhalb von 3 Tagen berechnet. Bei einem Luftwechsel pro Stunde wird eine Konzentration von 4 mg/m³ erreicht und damit die Geruchsschwelle leicht überschritten. Durch die sinkende Freisetzungsrates fällt die Konzentration schnell wieder ab.

Wird der Versuch mit Zement-Flugasche-Leimen durchgeführt, so ergeben sich geringere Freisetzungen; nach 7 Tagen werden bei unterschiedlichen w/z-Werten nur etwa 30% des enthaltenen Ammoniums freigesetzt. Eine Beeinträchtigung der späteren Nutzer ist auszuschließen /9/.

4.3.2.4 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Steinkohlenflugasche

Die zahlreichen Untersuchungen zum Auslaugverhalten belegen, dass aus Flugaschebetonen trotz höherer Gesamtgehalte keine deutlich höheren Mengen von Schwermetallen eluiert werden; z. T. sind die Gehalte im Eluat sogar geringer als bei Referenzbeton aus Portlandzement.

Der Gehalt an organischen Stoffen ist sehr gering, eine Gefährdung durch ausgelaugte organische Stoffe aus flugaschehaltigen Betonen ist nicht zu befürchten.

Flugaschebetone können Ammoniak an die umgebende Raumluft abgeben. Die Werte können während der Herstellung die Geruchsschwelle erreichen, eine Gefahr für die Gesundheit der Verarbeiter besteht jedoch nicht. Durch den natürlichen Luftwechsel wird der Ammoniakgehalt der Raumluft innerhalb weniger Tage abgebaut. Während der Nutzungsphase tritt keine Beeinträchtigung auf.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist Flugasche als unbedenklich im Sinne der Umweltverträglichkeit anzusehen. Allerdings wird die chemische Zusammensetzung, wie in Abschnitt 4.3.2 erläutert, in erster Linie durch den verwendeten Brennstoff bestimmt. Nach der derzeit gültigen DIN EN 450 /89/ wird feingemahlene Kohle als Brennstoff eingesetzt, der Entwurf prEN 450-1 /90/ erlaubt jedoch eine Mitverbrennung verschiedener Abfallprodukte. Im Rahmen von Zulassungen ist dies bereits jetzt möglich. Wenn die Abfallstoffe große Schadstoffmengen enthalten, können die leicht verdampfenden Elemente in der Flugasche angereichert werden. Hier ist eine Untersuchung und Bewertung nach dem DIBt-Merkblatt vorzunehmen.

4.3.3 Silikastaub / Mikrosilika

Seit Anfang der 70er Jahre wird Silicastaub in den skandinavischen Ländern im Beton eingesetzt. Besonders durch die Erteilung des ersten Prüfzeichens /45/ im Jahr 1985 ist Silicastaub auch in Deutschland bekannt geworden. Seitdem wurde er in zunehmendem Maße im Beton verwendet. Technologisch ist Silicastaub beispielsweise im Spritzbeton und bei der Herstellung von hochfesten Betonen Stand der Technik.

Silicastaub fällt als Nebenprodukt des Schmelzvorgangs bei der Silicium- und Ferrosiliziumherstellung an und besteht zu sehr hohen Anteilen aus amorphem Siliciumdioxid; der Gehalt von Nebenbestandteilen kann variieren (s. Tabelle A5). Es handelt sich um ein künstliches Puzzolan. Aufgrund der sehr hohen Feinheit besitzen Silicastäube extrem hohe Oberflächen, die mit ca. 20 m²/g in der Größenordnung von Tabakrauch liegen /7/. Es gibt

auch Mikrosilika aus anderen Verbindungen, z. B. Ca-Si-Legierungen, die aber in Deutschland nicht zugelassen sind.

4.3.3.1 Ökotoxikologische Daten

Mikrosilika fällt unter die Wassergefährdungskategorie (WGK) 0 (im Allgemeinen nicht wassergefährdend). Langjährige Erfahrungen im Umgang mit Mikrosilika zeigen keine gesundheitsschädlichen Wirkungen, lediglich mechanische Irritationen von Haut und Augen können durch den feinen Staub verursacht werden /32/.

Tabelle 23: Ergebnisse ökotoxikologischer Tests mit Mikrosilika

Test	Organismen	ermittelter Parameter	Wert
1	2	3	4
OSPAR 1995, Teil A	Kleinkrebse (Corophium volutator)	10-Tage LC ₅₀	> 50.000 mg/kg Trockensubstanz
ISO10253 1995 (E)	Kieselalgen (Skeletonema costatum)	EC ₅₀ (72 h)	4.200 mg/l
		EC ₁₀ (72 h)	1.200 mg/l
		Highest NOEC	323 mg/l
OECD guidelines 202 1984	Wasserflöhe (Daphnia magna)	24 h EC ₅₀	> 1000 mg/l
Microtox-Test	Leuchtbakterien (Photobacterium phosphoreum)	EC ₅₀	-

(Testbeschreibung s. Abschnitt 2.1)

Die Ergebnisse zeigen, dass Mikrosilika im Rohzustand ökotoxikologisch unbedenklich ist.

4.3.3.2 Auslaugverhalten von Mikrosilika

4.3.3.2.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Mikrosilika

In Tabelle A1 im Anhang sind die säurelöslichen Anteile nach NS 4770 angegeben. Sie liegen innerhalb der Spannweiten der Gesamtgehalte von quarzitischem Gestein (bei einigen

Elementen ist die Nachweisgrenze zu hoch um sie mit den Werten von Quarz zu vergleichen).

Zum Nachweis der Umweltverträglichkeit sind in /32/ eine Reihe von Versuchen an der Originalsubstanz durchgeführt worden, die im Folgenden beschrieben sind.

4.3.3.2.1.1 Schütteltests

Als Schütteltest in neutralem Medium wird der „Shake Bottle“-Test (TC 292) in /32/ eingesetzt. Ähnlich dem DEV-S4-Verfahren wird das Material im Verhältnis L/S = 10 mit destilliertem Wasser gemischt und 24 Stunden geschüttelt. Nur für B, Ca, Mg, Na und Si wurden Konzentrationen über 1 mg/l gefunden. Diese Stoffe sind in den auftretenden Konzentrationen nicht umweltrelevant. Konzentrationen umweltrelevanter Stoffe im Eluat unter 1 mg/l werden in der Quelle nicht angegeben.

An organischen Stoffen wurden 0,2 µg/l PAK gefunden, das entspricht der Geringfügigkeitsschwelle /11/. Bezüglich dieser Stoffgruppe ist Mikrosilika unbedenklich.

Als weiteres Verfahren wurde der TCLP-Test angewendet. In diesem Verfahren wird das Material in einer Essigsäurelösung (pH 4,93 für neutral und sauer reagierende Abfälle und pH 2,88 für alkalisch reagierende Abfallstoffe) mit einem Verhältnis von L/S = 20 18 Stunden lang geschüttelt.

Das Eluat wurde auf einige anorganische Parameter (As, Ba, Cd, Cr, Pb, Se, Ag und Hg) und eine Reihe von anorganischen Stoffen untersucht (verschiedenen Phenole, Chlorverbindungen u.a.). Keiner der Stoffe wurde im Eluat von Mikrosilika nachgewiesen /32/. Die Nachweisgrenzen sind in der Tabelle 24 aufgeführt. Sie liegen für einen Vergleich mit den Geringfügigkeitsschwellen zu hoch.

Tabelle 24: Nachweisgrenzen beim TCLP-Test

Parameter		Nachweisgrenze
		mg/l
1		2
Arsen,	As	0,5
Barium,	Ba	1,0
Blei,	Pb	2,0
Cadmium,	Cd	0,2
Chrom,	Cr	0,2
Quecksilber,	Hg	0,1
Selen,	Se	0,5
Silber,	Ag	0,5

4.3.3.2.1.2 Analyse von Drainagewasser

Vor der Verwertung von Mikrosilika im Beton wurde das Material in Norwegen großräumig deponiert. In /32/ wurde der Gehalt an organischen Schadstoffen in dem abgeführten Wasser einer reinen Mikrosilikadeponie bestimmt. Der Gesamtgehalt an PAK lag bei 1,3 $\mu\text{g/l}$, wobei die Einzelstoffe Fenantrene (0,9 $\mu\text{g/l}$) und Fluoranthene (0,2 $\mu\text{g/l}$) nachgewiesen werden konnten. Die Konzentrationen liegen unterhalb derer von gängigen Nahrungsmitteln. PCB und BTX konnten nicht nachgewiesen werden. Die Geringfügigkeitsschwelle für PAK liegt bei 0,2 $\mu\text{g/l}$ und wird hier deutlich überschritten, es ist jedoch fraglich, ob die Konzentration bei diesen Versuchsbedingungen ausschließlich aus der Mikrosilika stammt, zumal die Geringfügigkeitsschwelle beim Schütteltest eingehalten wird.

4.3.3.2 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

Auf Grund der gewählten Versuchsbedingungen belegen die oben beschriebenen Versuche an der Originalsubstanz die Umweltverträglichkeit nicht. Theoretisch müsste also ein Nachweis der Umweltverträglichkeit nach Stufe 2 geführt werden. Allerdings ist bei der Betrachtung der aus Beton mit Mikrosilika mobilisierbaren Anteile zu berücksichtigen, dass Mikrosilika bei der puzzolanische Reaktion i. d. R. vollständig zu CSH-Phasen reagiert. Je nach Art der Spurenelemente werden diese dabei fest in die Reaktionsprodukte eingebaut, oder verbleiben teilweise in der Porenlösung. Da die Gehalte durchschnittlich geringer sind als im Zement, wird beim Ersatz von Zement durch Mikrosilika der Eintrag von Schwermetallen in den Beton reduziert.

4.3.3.3 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von Mikrosilika

Auf Grund der Gesamtgehalte an umweltrelevanten Stoffen und den toxikologischen Eigenschaften ist nicht mit einer Gefährdung der Umwelt durch den Einsatz von Mikrosilika zu rechnen. Auch im Normentwurf prEN 13 263-1 /91/ wird vermerkt: „Mit der Verwendung von Silikastaub ist keine Freisetzung von radioaktiver Strahlung oder gefährlichen Substanzen verbunden.“

4.3.4 Trass (natürliches Puzzolan)

Trass nach DIN 51 043 /92/ ist ein aufbereiteter Tuffstein. Beim sog. "Rheinischen Trass" handelt es sich um ein vulkanisches Tuffgestein. Der "Bayerische Trass" (Suevit) dagegen ist ein durch Meteoriteneinschlag verändertes, ursprünglich sedimentäres Gestein. Durch hohen Druck und Temperatur ist das Gestein angeschmolzen und aufgebläht worden. Die puzzolanischen Eigenschaften sind auf die glasige, amorphe Matrix zurückzuführen, SiO_2 und Al_2O_3 liegen als reaktive Komponenten vor.

Zur Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Trass liegen keine Daten vor, allerdings sind einige Werte für Gesamtgehalte von Spurenelementen in Tabelle A1 im Anhang zusammengestellt worden. Diese Gehalte liegen jedoch in der Größenordnung von Quarz und Granit und damit deutlich unter den Werten für Zement. Eine Umweltgefährdung durch den Einsatz von Trass ist nicht zu erwarten.

4.3.5 Gesteinsmehle

In Deutschland werden als Gesteinsmehle im Wesentlichen Kalksteinmehle und Quarzmehle nach DIN 4226-1 /88/ eingesetzt. Die in diesen beiden Gesteinsmehlen enthaltenen Schwermetallgehalte sind mit den Angaben in Tabelle A1 im Anhang für Kalkstein bzw. Kies und Sand vergleichbar. Durch die große Oberfläche wird aus den Gesteinsmehlen aller Wahrscheinlichkeit nach ein höherer Prozentsatz der umweltrelevanten Stoffe mobilisierbar sein als bei kompaktem Zuschlag. Die Gesamtgehalte sind jedoch so gering, dass keine Gefahr für die Umwelt besteht. In Einzelfällen wurden in Kalkstein hohe Vanadium- und Zinkgehalte gemessen /40/; es können auch hohe Gehalte an Blei, Zink, Cadmium auftreten, wenn Erze in den Kalkstein eingelagert sind. Hier sollten ggf. Auslaugversuche durchgeführt werden.

Bei der Verwendung von Kalkstein als Zementbestandteil und bei der Herstellung von selbstverdichtendem Beton wird der Gehalt an organischen Substanzen begrenzt, da diese Stoffe die Erhärtung stören können. Unter Umständen können diese organischen Stoffe auch eluiert werden. Hier liegen keine Erkenntnisse vor.

4.3.6 Farbpigmente

Nach DIN EN 12 878 /93/ (Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen) können folgende Stoffe eingesetzt werden:

Tabelle 25: Pigmente nach DIN EN 12 878, Beschreibung nach /34, 35/

Stoff	chem. Formel	Farbe
1	2	3
Eisenoxide und -hydroxide	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	rot
	$\alpha\text{-FeOOH}$	gelb
	$\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$	schwarz
Chromoxid	$\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$	grün
Titanoxid	TiO_2	weiß
Manganoxid	$(\text{Ti}, \text{Sb}, \text{Mn})\text{O}_2$	braun
komplexe anorganische Oxide und Hydroxide ¹⁾	$\text{Co}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$	blau
	$(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn})_2(\text{Ti}, \text{Al})\text{O}_4$	grün
	$\text{Cu}(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{O}_4$	schwarz
Ultramarine	$\text{Na}_4[\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}][\text{S}_x]$	blau
Phthalocyaninblau und –grün	organische Verbindung mit Kupfer, Nickel oder Kobalt als Zentralatom	grün / blau
Kohlenstoff (anorganisch)	C	schwarz

1) bei den angegebenen chemischen Verbindungen handelt es sich um Beispiele

Zusätzlich zu den Farbstoffen können maximal 5% Dispergier- oder Bindemittel und Mahlhilfe in den Endprodukten enthalten sein. In der Norm wird der wasserlösliche Anteil auf 5 bzw. 0,5% bei Stahlbewehrung begrenzt; weiterhin müssen die Pigmente alkaliunempfindlich, wetter- und hitzebeständig sein. Nach /34/ sind für Beton nur die anorganischen Pigmente geeignet.

Die komplexen Oxide kristallisieren in Spinell- (z. B. $\text{Co}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$ und $\text{Cu}(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{O}_4$) oder Rutilstruktur (z. B. $(\text{Ti}, \text{Sb}, \text{Mn})\text{O}_2$).

4.3.6.1 Toxikologische Daten

Für die Säugetiertoxizität werden für Chromoxid und allgemein für Rutil- und Spinellpigmente Werte von $\text{LD}_{50} > 5000$ mg/kg angegeben /35, 36, 37/. Die Produkte sind nicht haut- und schleimhautreizend. Bei der Bestimmung der aquatischen Toxizität wurde z. B. in /37/ LC_0 bzw. EC_0 -Werte (max. geprüfte Konzentration, bei der 0 Testorganismen sterben) von 10 000 mg/l im Fischtest, 100 mg/l im Daphnientest und 10 000 mg/l im Bakterientest be-

stimmt. Die Wassergefährdungszahl liegt für alle oben genannten Produkte bei 0 (freiwillige Selbsteinstufung).

Die Stoffe sind vielfach als Lebensmittelfarben oder für Verpackungsmaterial zugelassen. Sie sind nicht als gesundheitsgefährdend anzusehen.

Die Eisenoxide und -hydroxide und auch Titanoxid liegen in gleicher Form in natürlichen Böden und Gesteinen vor und sind nicht umweltrelevant.

4.3.6.2 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von Pigmenten

Die Farbwirkung wird bei vielen Pigmenten durch Schwermetalle erzielt, daher sind die Gehalte an diesen umweltrelevanten Stoffen sehr hoch. Die Verbindungen sind jedoch sehr stabil, so dass keine Mobilisierung der Schadstoffe auftreten kann. (Diesen Effekt nutzt man z. B. beim Chromatreduzierer, der lösliches CrVI in die unlösliche Form CrIII überführt.). Neben den in oxidischer Form gebundenen, farbgebenden Metallen können produktionsbedingt Verunreinigungen auftreten. Sie liegen durchschnittlich bei den folgenden Werten (Gesamtgehalte):

Tabelle 26: Verunreinigungen in Pigmenten /37/

Stoff	Einheit	Gehalt
1	2	3
Arsen, As	mg/kg	30
Cadmium, Cd		<10
Kobalt, Co		<10 ¹⁾
Chromat, Cr ^{VI}		<1
Kupfer, Cu		<10 ¹⁾
Quecksilber, Hg		<1
Blei, Pb		60
Selen, Se		<1
Zink, Zn		<100

1) falls nicht Bestandteil der farbgebenden Verbindung

4.3.6.3 Bewertung der Umweltverträglichkeit von Pigmenten

Ergebnisse von Auslaugversuchen an Pigmenten oder pigmenthaltigen Betonen liegen nicht vor, erscheinen aber aufgrund der Eigenschaften der Stoffe auch nicht erforderlich, da die Stabilität der Pigmente im alkalischen Milieu bereits bei der Eignungsprüfung gewährleistet sein muss und die Toxizität der Produkte sehr gering ist. Nach den vorliegenden Daten sind die anorganischen Farbpigmente als unbedenklich einzustufen.

4.3.7 Organische Betonzusatzstoffe

Derzeit besitzen zwei organische Betonzusatzstoffe nach DIN 1045-2 /87/ eine Zulassung des DIBt. Hierbei handelt es sich um eine wässrige Styrol-Acrylat-Dispersion, die aus Styrol und Acrylsäure bzw. Acrylsäureester durch Polymerisation gewonnen wird, und eine wässrige Dispersion von Styrol-Butadien, das durch radikalische Emulsionspolymerisation hergestellt wird. Die erste Dispersion wird im Folgenden mit S-A und die zweite mit S-B abgekürzt. S-A-Dispersion ist in Wasser unlöslich, aber wasserverdünnbar. Sie darf nicht ungereinigt in Gewässer gelangen und kann aus dem Abwasser durch chemische Flockung eliminiert werden. Die S-B-Dispersion ist mit Wasser mischbar und der Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdend) zuzuordnen. Sie kann physikchemisch aus dem Abwasser entfernt werden. Beide Betonzusatzstoffe sind unter toxikologischen Gesichtspunkten nach bisherigen Erfahrungen nicht schädlich und nach der Gefahrstoffverordnung /42/ nicht kennzeichnungspflichtig /52, 53/. Die Zusatzmengen sind auf 20 bzw. 17 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, begrenzt. Für die Anwendung der Kunststoffdispersionen gelten die Bestimmungen der DIN 1045.

4.3.7.1 Auslaugung von organischen Zusatzstoffen

4.3.7.1.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe von organischen Zusatzstoffen

Als relevante Inhaltsstoffe sind hier die Styrol-Verbindungen und Verunreinigungen durch die Ausgangsstoffe zu betrachten. Gehalte an anorganischen Stoffen sind vernachlässigbar. Die Styrol-Verbindungen sind nach den Sicherheitsdatenblättern nicht kennzeichnungspflichtig und erfüllen keines der Ausschlusskriterien der Stufe 1 des DIBt-Merkblatts. Der Nachweis der Unbedenklichkeit der Inhaltsstoffe an der Originalsubstanz kann jedoch nicht erbracht werden, da die Schwelle von 20 mg/l TOC hier nicht eingehalten werden kann. Der Nachweis der Umweltverträglichkeit erfolgt nach Stufe 2 nach der Einbindung in Beton.

4.3.7.1.2 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

In /54/ sind eine Reihe von Versuchen zur Umweltverträglichkeit der oben genannten Kunststoffdispersionen durchgeführt worden. Dazu wurden Mörtel aus CEM I 32,5 R und CEM III/A 32,5 R hergestellt, bei denen die organischen Betonzusatzstoffe jeweils in ihrer Maximaldosierung eingesetzt wurden. Bei S-A führt dies zu einem Gehalt von 10,2 M.-% bezogen auf den Zement, bei S-B liegt der Gehalt bei 7,8 M.-%. Als w/z-Wert wurde 0,5 gewählt.

Das Auslaugverhalten wurde auf Grundlage des ermittelten TOC (Total Organic Carbon) bewertet. Das DIBt-Merkblatt /11/ gibt hier einen TOC von 20 mg/l vor. Einzelstoffe sind nicht bestimmt worden. Maßgeblich ist der Standtest, es sind jedoch auch Versuchsergebnisse von Schütteltests mit aufgenommen worden.

Neben dem ausgehärteten Beton wurde auch ansatzweise die Frischbetonelution untersucht, die hier jedoch nicht betrachtet wird.

4.3.7.1.2.1 Schütteltests

Es wurden Schütteltests bei konstantem pH-Wert (pH 4, 7, 12) bei Korngröße < 0,125 mm und < 4 mm durchgeführt und Versuche nach dem DEV-S4-Verfahren mit Korngröße < 4 mm. Aus S-A-haltigem Mörtel wurden dabei etwas höhere Werte eluiert. Tabelle 27 stellt die Ergebnisse bei Korngröße < 4 mm vergleichend gegenüber.

Tabelle 27: Eluatanalysen von Schütteltests, Bestimmung des TOC, Werte aus /54/

Probe	Einheit	TOC bei pH 4	TOC bei pH 7	TOC bei pH 12	TOC nach DEV-S4
1	2	3	4	5	6
Nüllprobe mit CEM I	mg/l	< 0,5	0,5	0,6	1,4
Mörtel mit CEM I und S-A		16,7	11,4	5,8	12,5
Mörtel mit CEM I und S-B		3,6	2,8	4,6	3,1
Nüllprobe mit CEM III/A		< 0,5	0,7	1,9	2,3
Mörtel mit CEM III/A und S-A		8,6	13,6	3,9	9,8

Aus Mörtel mit der Kunststoffdispersion S-A werden höhere TOC-Gehalte eluiert, wobei der Mörtel wie oben beschrieben auch mehr Kunststoff enthält. Ein klarer Einfluss des

w/z-Werts ist nicht festzustellen. Auch der Vergleich zwischen Hochofen- und Portlandzement liefert keine eindeutige Tendenz.

Alle gemessenen TOC-Werte liegen bei dieser Korngröße unter 20 mg/l.

4.3.7.1.2.2 Standtest

Abweichend vom Normentwurf /8/ betrug das Probenalter hier 40 Tage mit einem Verhältnis Volumen des Eluenten zu Oberfläche der Probekörper $V/O = 5$. Die Elutionsdauer betrug 16 Tage bei einer Temperatur von 23 °C.

Auch hier wurde aus Mörtel mit S-A mehr TOC eluiert aus Mörtel mit S-B. Die Werte lagen alle unter den Werten, die im Schütteltest bestimmt wurden. Die gemessenen Werte sprechen dafür, dass es sich hier um einen löslichkeitsgesteuerten Auslaugmechanismus handelt (vgl. /5/ und /54/).

4.3.7.2 Freisetzung flüchtiger Substanzen

Auch für den Gehalt organischer Substanzen in der Luft gibt es einen Summenparameter, den TVOC (Total Volatile Organic Compounds). Der TVOC ist jedoch kritisch zu betrachten, da die Auswirkungen von komplexen Gemischen nicht bekannt sind und kein vorgeschriebenes Verfahren zur Bestimmung des Summenparameters existiert. Daher wurden eine Reihe von Stoffen einzeln im Gasraum identifiziert.

Untersucht wurden die gleichen Mörtel wie in Abschnitt 4.3.7.1 und zusätzlich Beton der Sieblinie A/B 8 mit CEM I 32,5 R und S-A bzw. ohne Zusatzstoff. Die Untersuchung der Betone und Mörtel erfolgte in der Aachener Prüfkammer, einer 1 m³ großen Zelle, in der eine Betonoberfläche von 0,25 m² untersucht wird. Der Beton wird mit der Schalung im frischen Zustand in der Zelle aufgestellt. Die erste Messung erfolgte unmittelbar nach der Herstellung, die zweite nach 1 Tag, dann nach 2, 3, 14, 28 und 42 Tagen. Während der ersten 24 Stunden erfolgte keine Lüftung, nach der 2. Messung wurde dann jeweils zwischen den Messungen gelüftet, eine Stunde vor Messbeginn wurde die Lüftung eingestellt. Die Messdauer betrug jeweils 60 min.

Beispiele der gemessenen Konzentrationen sind in Bild 3 und 4 gegeben. Die dargestellten Ausgasungen sind die höchsten, die in der Versuchsreihe gemessen wurden.

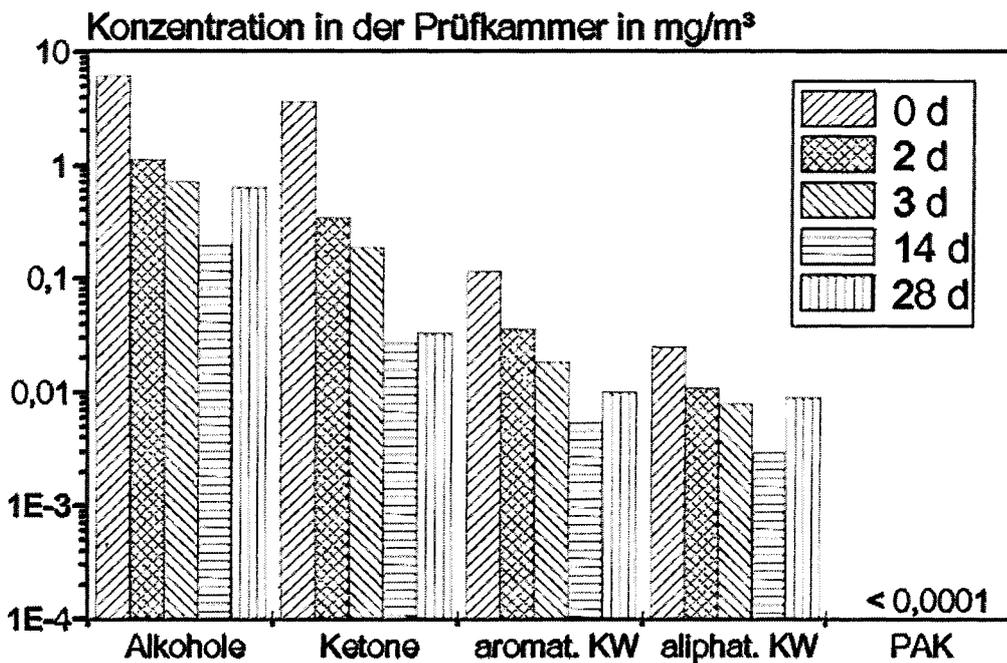


Bild 3: Konzentration der in die Prüfkammer emittierten Verbindungsklassen; Mörtel mit CEM I und S-A-Dispersion

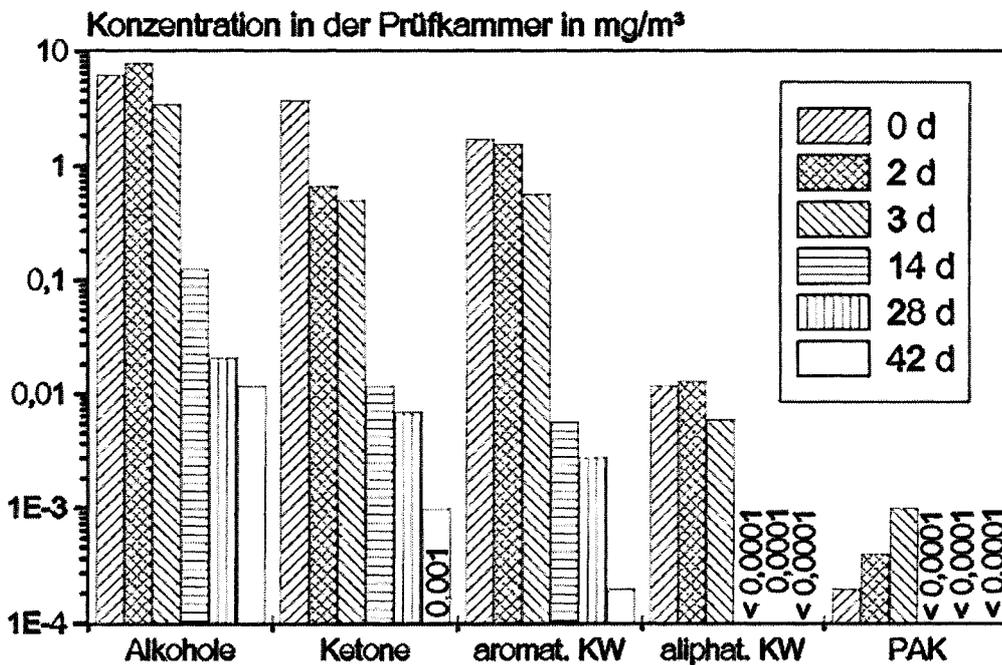


Bild 4: Konzentration der in die Prüfkammer emittierten Verbindungsklassen; Mörtel mit CEM III/A und S-A-Dispersion

Die nachgewiesenen Stoffe der Verbindungsklassen sind in Tabelle 28 zusammengestellt.

Tabelle 28: Einzelstoffe der Verbindungsklassen aus Bild 3 und 4, Bestimmung des TOC, Werte aus /54/

Verbindungs-klasse	nachgewiesene Einzelstoffe
1	2
Alkohol	2-Propanol, 1-Butanol
Keton	Keton
aromatische Kohlenwasserstoffe,	Benzol, Toluol, Ethylbenzol,
speziell PAK ¹⁾	o, m, p-Xylol, Styrol
Aliphatische Kohlenwasserstoffe (Alkane)	Naphthalin
	n-Hexan

1) PAK: polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe

Bei S-A-haltigen Mörteln wurde unter den Aromaten in erster Linie das Ethylbenzol emittiert. Das gilt auch für den Zusatzstoff im Originalzustand. Im Gegensatz dazu wird aus S-B verstärkt Styrol freigesetzt, das offenbar nicht vollständig polymerisiert ist. Aus Mörtel / Beton mit S-B wird Styrol nur in geringen Konzentrationen ausgegast, d. h. es wird im Beton eingebunden.

Zusätzlich zu den identifizierten Substanzen werden in gleicher Größenordnung nicht näher spezifizierte Verbindungen freigesetzt, so dass der TVOC direkt nach Herstellung maximal 20,75 mg/m³ beträgt. Nach 28 Tagen ist der höchste Messwert auf 1,21 mg/m³ gefallen, im Alter von 42 Tagen sind noch 0,7 mg/m³ messbar. Die höchsten Werte werden von S-B-haltigen Mörteln freigesetzt.

4.3.7.3 Gesamtbewertung der Umweltverträglichkeit von organischen Zusatzstoffen

Nach /54/ wird Beton mit organischen Zusatzstoffen in erster Linie im Abwasser- und Rohrleitungsbau, für Fabrikationsanlagen, Werkstätten- und Lagergebäude, für Tankstellen und Waschanlagen, für Gleistassen und für besonders korrosionsgefährdete Bauteile, wie Kaminköpfe, Kühltürme u. ä., verwendet.

Auslaugung tritt beim Einsatz von Beton im Trink- und Abwasserbereich, z. B. für Rohrleitungen, Sammelbecken etc., auf. Die oben zitierten Messwerte lassen darauf schließen, dass organische Stoffe nicht in kritischen Konzentrationen ausgelaugt werden. Mit einer

Umweltgefährdung durch ausgelaugte Bestandteile der organischen Betonzusatzstoffe ist nicht zu rechnen.

Wenn Bauteile in Innenräumen liegen, ist die Ausgasung von Interesse. Für die oben genannten Anwendungen sind die MAK-Werte entscheidend, da es sich um Arbeitsbereiche handelt. Die MAK-Werte (s. Tabelle A8 im Anhang) werden durchgehend unterschritten. Wenn eine Anwendung im Wohnungsbau oder bei sozialen Einrichtungen geplant ist, gelten dagegen andere Kriterien, da die Aufenthaltsdauer über 40 Stunden pro Woche beträgt und auch ein anderer Personenkreis betroffen ist. Ein klares Bewertungskonzept fehlt hier. Nach der in /55/ beschriebenen vorläufigen „Konzentrations-Wirkungs-Beziehung“ für Beeinträchtigungen durch Exposition gegenüber VOC tritt bei einem TVOC-Gehalt $< 0,2 \text{ mg/m}^3$ keine Reizung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens auf. Bei höheren Gehalten kann es bei Wechselwirkung mit anderen Expositionsparametern zu Reizungen kommen. Der Wert von $< 0,2 \text{ mg/m}^3$ wird auch 42 Tage nach der Herstellung bei S-A-haltigem Beton oder Mörtel überschritten. Gemessen wurden bis zu $0,7 \text{ mg/m}^3$. In einem solchen Anwendungsfall müsste überprüft werden, ob es für die geplante Dosierung des Zusatzstoffs zu einer Überschreitung kommt, bzw. wie lange der Baustoff ausgasen muss, bevor eine entsprechende Nutzung möglich ist.

4.4 Betonzusatzmittel

Betonzusatzmittel im Sinne der DIN EN 206-1 /86/ sind Betonzusätze, die durch chemische und / oder physikalische Wirkung die Eigenschaften von Beton und Mörtel beeinflussen. So können beim Frischbeton beispielsweise Verarbeitbarkeit, Erhärten oder Erstarren, beim Festbeton Festigkeit, Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Frost-/ Taumittelbeständigkeit günstig beeinflusst werden. Es werden nur Betonzusatzmittel betrachtet, die bislang eine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt hatten. Der Einsatz muss unter dort angegebenen Bedingungen erfolgen. Die DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 enthält zusätzlich allgemeine Angaben zur Maximaldosierung. Bei Verwendung eines Zusatzmittels beträgt die maximale Zugabe 50 g/kg Zement (bei Überschreitung muss ein Nachweis der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit erbracht werden). Für hochfeste Betone liegt diese Grenze bei 70 g/kg. Werden mehrere Zusatzmittel eingesetzt, liegt die Grenze bei insgesamt 60 g/kg bzw. 80 g/kg bei hochfestem Beton.

Nach Schätzungen werden in Deutschland 80 bis 90% der Betone mit Zusatzmitteln hergestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Betonverflüssigern und Fließmitteln /9/.

Für alle im folgenden beschriebenen Betonzusatzmittel gilt, dass sie ohne Einsatz von Schwermetallverbindungen hergestellt werden /41/. Die Gehalte dieser Spurenelemente sind daher sehr gering. Die Zusatzmittel spielen für die Auslaugung dieser Stoffe aus Beton keine Rolle.

In diesem Kapitel werden organische Stoffe betrachtet, die in die Gasphase oder in anstehendes Wasser freigesetzt werden können. Da die Wirkstoffe in aller Regel schwerflüchtig sind, ist eine Ausgasung in messbaren Konzentrationen kaum zu erwarten. Von Bedeutung sind hier die Additive und Hilfsstoffe (Abschnitt 4.4.10), die leichte organische Verbindungen enthalten, insbesondere Formaldehyd; auch Abbauprodukte der Wirkstoffe können flüchtig sein. Die Additive sind, falls nicht anders angegeben, in allen Betonzusatzmitteln enthalten. Die Fließmittel Melamin- und Naphthalinsulfonat enthalten zusätzlich herstellungsbedingt Formaldehyd (s. Abschnitt 4.4.1.2 und 4.4.1.3). Die Ausgasung der leichtflüchtigen Stoffe wird in Abschnitt 4.4.11 betrachtet.

Die Informationen der folgenden Abschnitte zu den in Deutschland verwendeten Betonzusatzmitteln wurden, soweit keine anderen Angaben gemacht werden, dem Sachstandsbericht "Betonzusatzmittel und Umwelt" der Deutschen Bauchemie /41/ entnommen.

Bei der Beurteilung der Wassergefährdung sind für alle Betonzusatzmittel Selbsteinstufungen vorgenommen worden.

4.4.1 Betonverflüssiger und Fließmittel (BV und FM)

Als Rohstoffe zur Herstellung der in Deutschland verwendeten Betonverflüssiger und Fließmittel werden im Wesentlichen

- Ligninsulfonate,
- Melaminsulfonate,
- Naphthalinsulfonate sowie
- Polyacrylate

verwendet. Alle Rohstoffe sind wässrige Lösungen und frei von organischen Lösemitteln. Im fertigen Produkt liegen die Wirkstoffe in Konzentration von 10 bis 40 M.-% vor.

4.4.1.1 Ligninsulfonat

Ligninsulfonat ist ein modifiziertes Naturprodukt, das aus Lignin, einem Hauptbestandteil des Holzes, durch Hydrolyse und Sulfonierung gewonnen wird.

Toxikologische Bewertung:

Ergebnisse aus unterschiedlichen Testreihen (subakute Toxizitätsstudien an verschiedenen Spezies mit oraler Applikation, ökotoxikologische Untersuchungen an Fischen und Wasserorganismen, AMES-Test (Kurzzeittest zur Feststellung von erbgutverändernden Eigenschaften), Test der Reizwirkung an Haut und Augen (von Kaninchen) belegen, dass Ligninsulfonat toxikologisch unbedenklich ist. Durch die gute Wasserlöslichkeit kann eine Bioakkumulation ausgeschlossen werden. Der Stoff ist jedoch nur potentiell biologisch abbaubar, er wird in Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdend) eingestuft und ist gemäß der deutschen Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) /42/ nicht kennzeichnungspflichtig.

4.4.1.2 Melaminsulfonat

Melaminsulfonat entsteht aus der Umsetzung von Melamin mit Schwefelsäure und Formaldehyd. Es ist ein Kondensationsprodukt mit einer molaren Masse von ca. 20.000 g/mol /43/.

Toxikologische Bewertung:

Wie Ligninsulfonat wird Melaminsulfonat in die Wassergefährdungsklasse 1 eingestuft. Es liegen Ergebnisse zur akuten Toxizität, zur aquatischen Toxizität, zum AMES-Test und zur Reizwirkung für Haut und Augen vor, die die Unbedenklichkeit des Stoffes belegen. Auch hier ist eine Bioakkumulation ausgeschlossen. Die Kriterien für die leichte Abbaubarkeit werden nicht erfüllt.

Melaminsulfonat enthält Spuren von freiem Formaldehyd. Die Konzentrationen, die beim Umgang mit dem Stoff gemessen wurden, lagen aber unter dem MAK-Wert für Formaldehyd. Der Grenzwert für die Kennzeichnungspflicht wird ebenfalls nicht erreicht.

4.4.1.3 Naphthalinsulfonat

Zur Herstellung von Naphthalinsulfonat wird Naphthalin zu 2-Naphthalinsulphonsäure sulfoniert und anschließend durch Kondensation mit Formaldehyd zu den entsprechenden Kondensationsprodukten mit einer Molmasse von ca. 2000 g/mol umgesetzt /43/. Die Un-

tersuchung von zwei handelsüblichen Produkten in /39/ zeigte, dass neben den Oligomeren auch Monomere mit ein oder zwei SO_3 - Gruppen enthalten sind. Dabei macht der Gehalt an monosulfonylierten Monomeren etwa 10 M.-% und der an disulfonylierten Monomeren ca. 25 M.-% aus. Die übrigen 65% entfallen auf die Oligomere mit Kettenlängen von bis zu 15 Einheiten. Bei Kontakt mit Wasser werden die H^+ -Ionen abgespalten. Dadurch erhalten die Moleküle ihren ionischen Charakter, der die sehr hohe Wasserlöslichkeit bewirkt.

Toxikologische Bewertung:

Die Wassergefährdungsklasse von Naphthalinsulfonat ist ebenfalls 1. Die toxikologischen Eigenschaften entsprechen im Wesentlichen denen von Melaminsulfonat, d. h. auch Naphthalinsulfonat ist toxikologisch unbedenklich, enthält jedoch Spuren von Formaldehyd.

Nach /39/ ist trotz der geringen Toxizität eine Umweltgefährdung durch Naphthalinsulfonate nicht auszuschließen, da die ausgelaugten Stoffe teilweise sehr stabil sind (s. u.) und auch in Kläranlagen nicht entfernt werden können. Durch ihren amphiphilen Charakter können Naphthalinsulfonate unpolare organische Schadstoffe in Lösung bringen und dadurch mobilisieren.

4.4.1.4 Polycarboxylate

Polycarboxylate werden i. d. R. in Form ihrer Natriumsalze eingesetzt. Sie leiten sich von organischen Carbonsäuren ab. Die Stoffgruppe umfasst z. B. Acrylate, Maleinate und abgeleitete Derivate mit Polyglycoethern oder Polymerisationsprodukten mit Styrol.

Toxikologische Bewertung:

Auch für die Polycarboxylate liegen Untersuchungsergebnisse vor, die eine Einteilung in die Wassergefährdungsklasse 1 rechtfertigen. Einige der Verbindungen wirken jedoch reizend.

4.4.1.5 Auslaugverhalten von Fließmitteln

4.4.1.5.1 Bewertung der relevanten Inhaltsstoffe

Die Dosierung der verflüssigenden Zusatzmittel liegt bei 0,2 bis 2 M.-% vom Zement /41/. Bei einer Wirkstoffkonzentration von 40% ergeben sich damit für Beton mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 eine Wirkstoffkonzentration von rund 0,12%. Inwieweit diese geringen Mengen zu einer Beeinträchtigung der Umwelt führen können, wird im Folgenden betrachtet.

4.4.1.5.1.1 Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe

Für die organischen Stoffe, die hier betrachtet werden, liegen noch keine Ergebnisse aus Langzeitstandtests vor, es gibt jedoch einige Untersuchungen, die sich mit der Sorption der Fließmittel an den Zementpartikeln befassen. So wurde für Naphthalinsulfonat in /49/ eine 80%ige Sorption nach nur zwei Stunden festgestellt. Ligninsulfonat wurde in der gleichen Zeit zu 60% sorbiert. In dieser Versuchsreihe wurde eine Zusatzmitteldosierung von 0,75% des Zements bei einem w/z-Wert von 5 gewählt.

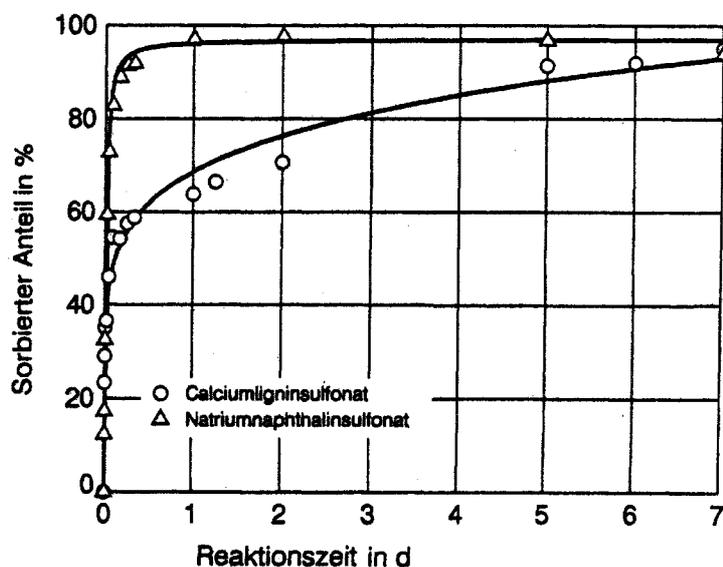


Bild 5: Auslaugung von Ligninsulfonat und Naphthalinsulfonat aus Zementstein bei Wasserüberschuss (w/z = 5) /49/

Wie in dem Bild 5 zu sehen ist, sind die Fließmittel nach 7 Tagen zu 90% sorbiert. Das heißt, es können maximal 10% der enthaltenen Wirkstoffe eluiert werden.

Die Analyse des Porenwassers lässt ebenfalls Rückschlüsse auf die eluierbaren Stoffmengen zu. In /49/ wurde Zementsteinproben mit einem w/z-Wert von 0,4 und 1,5% Calciumligninsulfonat bzw. 1,2% Naphthalinsulfonat (bezogen auf den Zement) hergestellt. Im Alter von 28 Tagen wurde jeweils der Gehalt der Wirkstoffe im der Porenwasser ermittelt; die Konzentration war auf ca. 10% des Ausgangswerts gesunken.

Parallel wurden Auslaugversuche nach dem Trogverfahren und dem DEV-S4-Verfahren (jeweils über 24 Stunden) durchgeführt. Die ausgelaugten Stoffmengen im DEV-S4-Verfahren lagen unter 50 mg/l. Im Trogversuch waren die Konzentrationen um Faktor 10 geringer. Bild 6 zeigt die Auslaugraten, die sich bei wiederholten Trogversuchen ergeben.

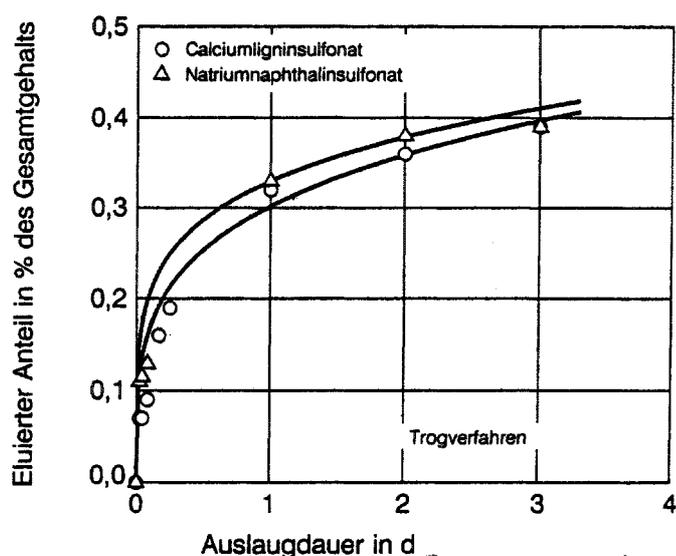


Bild 6: Auslaugung aus Zementstein im Trogversuch (wiederholt durchgeführt) /49/

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass nur extrem geringe Anteile der zugeetzten Mengen – bei realen Verhältnissen weniger als 1% – eluiert werden /49/.

Da die Fließmittel toxikologisch unbedenklich sind, ist eine Freisetzung in dieser Größenordnung nicht als umweltgefährdend anzusehen. Abbauprodukte der Fließmittel wurden in dieser Quelle nicht betrachtet.

Bezüglich der Abbauprodukte enthält /43/ einige wenige Angaben: Die Abbauege von Ligninsulfonat und Melaminsulfonat sind nicht bekannt, Naphthalinsulfonat wird chemisch zu Naphthalinsulfonsäure abgebaut, diese ist aus toxikologischer Sicht unbedenklich. Bei biologischen Abbauprozessen entsteht Naphthol, das eine relevante Toxizität ($EC_{50} = 4,5 \text{ mg/l}$ für Leuchtbakterien) hat, jedoch leicht biologisch abbaubar ist /43/. Daher ist ein Auftreten in relevanten Konzentrationen unwahrscheinlich, zumal die freigesetzten Mengen wie oben beschrieben sehr klein sind.

Der Quelle /43/ zufolge wird aus Beton mit Fließmitteln auf Naphthalinsulfonat-Basis ausschließlich das Abbauprodukt Naphthalinsulfonsäure ausgelaugt. Dieses Auslaugverhalten wird auf die höhere Mobilität der Monomere und die geringe Stabilität des Kondensats in alkalischem Milieu zurückgeführt. Es wird geschätzt, dass 10% des eingesetzten Fließmittels als Monomere ausgelaugt werden.

Genauere Angaben enthält /39/. In dieser Quelle wurde der Einfluss von Naphthalinsulfonat auf die Grundwasserqualität an zwei Tunnelbaustellen mit stehendem bzw. strömendem Grundwasser und in einer Reihe von Laborversuchen untersucht. In beiden Bauvorhaben wurden naphthalinsulfonathaltige Zementsuspensionen unter dem Grundwasserspiegel ein-

gesetzt und der Einfluss auf die Grundwasserqualität über einen Zeitraum von bis zu zwei Jahren verfolgt. Bei den zitierten Baustellen wurden 4 bzw. 8 kg Fließmittel pro m³ eingesetzt.

In den Grundwasserproben wurden nur monomere Sulfonate und Oligomere mit maximal 4 Einheiten gefunden. Längere Moleküle werden innerhalb weniger Stunden zu mehr als 90% an den Zementpartikeln adsorbiert und konnten daher im Eluat nicht nachgewiesen werden. Bei stehendem Grundwasser und einer Entfernung von 5 bis 10 m wurden maximal 0,23 mg/l Naphthalinsulfonat 14 Tage nach Beginn der Injektionen gemessen (Summenparameter für alle Monomere und Oligomere). Dieser Zeitpunkt fällt noch in die Herstellungsphase. Nach dem Ende der Injektionen nehmen die Konzentrationen einiger Monomeren schnell ab, vor allem die einfach sulfonierten Verbindungen werden leicht biologisch abgebaut. Auch die Konzentrationen der Disulfonate mit Ausnahme des Naphthalin-1,5-disulfonats sinken innerhalb von höchstens 200 Tagen auf Werte unter der Nachweisgrenze von 0,2 µg/l.

Bei strömendem Grundwasser (Abstandsgeschwindigkeit $v_a = 1$ m/d) sind nach 55 m noch maximal 0,058 mg/l enthalten. Da das Wasser bei dieser Tunnelbaustelle bis zum 55 m-Pegel ca. 3 Monate braucht, konnten hier nur noch zwei Disulfonate und die Oligomere nachgewiesen werden. Vier Monate nach der Injektion sind nur noch Naphthalin-1,5-disulfonat und die Oligomere nachweisbar. Diese Verbindungen sind sowohl im Feldversuch als auch im Laborversuch nicht biologisch abbaubar. Der Anteil dieser nicht abbaubaren Bestandteile im Eluat liegt bei 20%. Die Konzentration im Grundwasser fällt hier nur auf Grund der Dispersion ab.

Bei der Tunnelbaustelle in strömendem Grundwasser wurde innerhalb von 1,5 Jahren Zementsuspension mit insgesamt 16,7 Tonnen Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis eingesetzt. Davon wurden 5% ausgelaugt. Dieser Wert wurde anhand der gemessenen Konzentrationen von Naphthalin-1,5-disulfonat und einem Dimer (beides persistente Stoffe) ermittelt und gilt nicht allgemein; so wurde bei stehendem Grundwasser nur ca. 1% der eingesetzten Menge eluiert /39/.

Im Vergleich zu kompakten Bauweisen tritt beim Injizieren ein wesentlich größerer Anteil des Baustoffs direkt mit dem Grundwasser in Kontakt. Insofern kann die Injektion als ungünstigster Fall betrachtet werden. Die gemessenen Konzentrationen liegen deutlich unter der Geringfügigkeitsschwelle für den TOC von 20 mg/l, allerdings handelt es sich hier um Naphthalinverbindungen, die beim biologischen Abbau zunächst desulfoniert, d. h. in Naphthalin umgewandelt werden. Für Naphthalin liegt die Geringfügigkeitsschwelle bei 2 µg/l /11/. Dieser Wert wird deutlich überschritten.

In Deutschland werden Naphthalinsulfonate schon aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht in solchem Umfang in Zementsuspensionen eingesetzt. Wenn im Ausnahmefall ein massiver Einsatz des Zusatzstoffs vorgesehen ist, sollte die Umweltverträglichkeit überprüft werden.

Untersuchungen an Betonen, die unter Zugabe von Melaminsulfonat (FM) hergestellt wurden /46, 47, 48/ deuten darauf hin, dass dieser Wirkstoff fest in die Zementsteinmatrix eingebunden wird. Weitere Untersuchungen im Hinblick auf eine Verwendung von mit Melaminsulfonat hergestellten Betonen im Trinkwasserbereich zeigten, dass die Zugabe einer 20%igen Melaminsulfonatlösung (von 4,5 M.-% bezogen auf den Zement) bei Verwendung für Auskleidungen von Behältern für die Langzeitaufnahme von Trinkwasser unbedenklich ist /7/.

Zu Polycarboxylaten sind keine Angaben gefunden worden.

4.4.2 Verzögerer (VZ)

Für die Herstellung von Verzögerern werden vor allem

- Saccharose,
- Gluconate,
- Phosphate und
- Ligninsulfonate

eingesetzt. Die Stoffe werden als wässrige Lösungen oder als Pulver eingesetzt, sind also frei von organischen Lösemitteln.

Die Wirkstoffkonzentration im Endprodukt liegt bei 10 bis 30 M.-%.

Toxikologische Bewertung:

Saccharosen sowie das chemisch verwandte Gluconat sind Lebensmittel und deshalb nicht als gefährliche Inhaltsstoffe anzusehen.

Die Produkte, die Saccharosen bzw. Gluconate enthalten, sind in die Wassergefährdungsklasse 1 eingestuft (Selbsteinstufung). Sie sind biologisch abbaubar. Von den in Verzögerern eingesetzten Phosphaten (hauptsächlich Tetrakaliumpyrophosphat, Natriumtripolyphosphat und Natriumhexametaphosphat) ist bekannt, dass sie nicht akut toxisch und als typisch anorganische Stoffe praktisch nicht abbaubar sind /41/.

4.4.2.1 Auslaugverhalten

Nach /41/ werden die Stoffe fest in die Zementsteinmatrix eingebunden und sind dadurch für die Auslaugung aus Beton nicht relevant. Versuchsergebnisse, die für eine Bewertung nach DIBt-Merkblatt herangezogen werden könnten, existieren nicht.

4.4.3 Beschleuniger (BE)

Die in Deutschland überwiegend verwendeten Rohstoffe für Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleuniger (BE) sind:

- Silikate,
- Aluminate,
- Karbonate,
- Formiate,
- Amorphe Aluminiumhydroxide und,
- Aluminiumsulfat.

Auch in Beschleunigern werden keine organischen Lösemittel oder Schwermetallverbindungen eingesetzt.

Je nach dem, ob Dispersionen oder Pulver verwendet werden, liegt der Wirkstoffgehalt von Beschleunigern bei 10 bis 100%.

4.4.3.1 Silikate

Üblicherweise wird Natrium- oder Kaliumwasserglas eingesetzt, Wasserglas ist wasserlöslich und reagiert alkalisch. Je niedriger das Verhältnis aus Kieselsäurenanteil zu Alkalienanteil desto alkalischer reagiert der Stoff, daher erfolgt die Einstufung nach Gefahrstoffverordnung /42/ als reizend bis ätzend. Die Wassergefährdungsklasse ist 1 (geringe akute Fisch-, Daphnien-, Bakterientoxizität, nicht mutagen, kanzerogen oder teratogen).

4.4.3.2 Aluminate

Auch Aluminate reagieren in wässriger Lösung alkalisch. Ihre Einstufung in die Wassergefährdungsklasse 1 beruht in erster Linie auf der Verschiebung des pH-Wertes; konzentrierte Lösungen sind für aquatische Lebewesen toxisch. In erster Linie werden Natrium- oder Kaliumaluminate eingesetzt. Sie sind nach GefStoffV mit Gefahrensymbol C (ätzend) zu kennzeichnen.

4.4.3.3 Carbonate

Carbonate werden in Form von Soda (Natriumcarbonat) oder Pottasche (Kaliumcarbonat) eingesetzt. Sie reagieren in wässriger Lösung alkalisch und sind nach GefStoffV mit dem Gefahrensymbol Xi (reizend) zu kennzeichnen.

Die orale Toxizität ist gering, aber Soda hat bei Inhalation eine ausgeprägt toxische Wirkung. Die Wassergefährdungsklasse ist 1.

4.4.3.4 Formiate

Üblicherweise wird Calciumformiat eingesetzt. Es ist leicht hautreizend, eine Kennzeichnung gemäß GefStoffV ist jedoch nicht erforderlich. Es gibt keine Hinweise auf mutagene, chronische, teratogene oder kanzerogene Effekte (Wassergefährdungsklasse 1).

4.4.3.5 Amorphe Aluminiumhydroxide

Amorphe Aluminiumhydroxide sind nicht wasserlöslich, sie werden pulverförmig oder als Dispersion eingesetzt. Sie sind toxikologisch unbedenklich (Wassergefährdungsklasse 0 - im Allgemeinen nicht wassergefährdend), eine Kennzeichnung gemäß GefStoffV ist nicht erforderlich.

4.4.3.6 Aluminiumsulfat

Die Wasserlöslichkeit von Aluminiumsulfat wird durch den Kristallwassergehalt bedingt und kann daher für verschiedene Produkte unterschiedlich sein. Die Substanz ist nicht akut toxisch und zeigt keine Reizwirkung auf Haut und Schleimhäute. Eine Kennzeichnung gemäß GefStoffV ist nicht erforderlich, die Wassergefährdungsklasse ist 1.

4.4.3.7 Auslaugverhalten

Silikate, Carbonate und Aluminate bilden im Beton Calciumsalze, die schwer wasserlöslich sind und in der Zementsteinmatrix eingebunden werden. Die Alkalien werden, wie Elutionsversuche gezeigt haben, teilweise ausgelaugt /41/.

Bei Spritzbetonen ist bekannt geworden, dass bei Verwendung von Erstarrungsbeschleunigern die Eluierbarkeit von Calcium- und Natriumionen zunimmt. Dort, wo Bergwasser ansteht, kommt es zu einer permanenten Auslaugung des Spritzbetons. Durch gelöste Stoffe, die in den Drainagen ausfallen, kann es zu einer Verstopfung der Drainagen kommen. Unter ökologischen Gesichtspunkten stellt die starke pH-Wert-Erhöhung des in den Vorfluter gelangenden Wassers eine Belastung dar. Während das gelöste Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) als Calciumlieferant primär zu Kalkaussinterungen in den Drainagen führt, sind die leicht löslichen Natrium- und Kaliumhydroxide (NaOH und KOH) für den hohen pH-Wert des abfließenden Wassers verantwortlich /15/.

Bei den untersuchten Spritzbetonen in /15/ wurde nach Zugabe eines Beschleunigers in einer Dosierung von 3 M.-% bezogen auf den Zement im Vergleich zu Spritzbeton ohne Beschleuniger eine Erhöhung der Alkaligehalte im Eluat um das 10 bis 15fache festgestellt. Hierbei machte sich die Zusammensetzung der verwendeten Beschleuniger bemerkbar. Bei Verwendung eines Beschleunigers auf Basis von Kaliumverbindungen wurde eine deutliche Erhöhung der Kaliumauslaugung festgestellt, während sich bei einem Beschleuniger auf der Basis von Kalium- und Natriumverbindungen Gehalte auf einem niedrigeren Niveau einstellen.

Die Freisetzungsrates kann durch Verwendung von Hochofenzement, Silicastaub und / oder Flugasche vermindert werden (bis zu 75%), da durch diese Stoffe ein dichteres Zementsteingefüge entsteht. Silicastaub kann zusätzlich Natrium- und Kaliumionen an der sehr großen Oberfläche binden /15/. Bei der Verwendung alkalihaltiger Beschleuniger im Spritzbeton muss die Frage der auslaugbaren Alkalien im Einzelfall betrachtet werden, eine allgemeine Aussage zu Umweltverträglichkeit ist hier nicht zu treffen.

Dagegen sind amorphe Aluminiumhydroxide und Aluminiumsulfat alkalifrei, sie bilden Calciumaluminatphasen im Beton und sind damit im Zementstein fixiert. Da keine zusätzliche Belastung durch Alkalien entsteht, sind diese Aluminiumverbindungen besonders geeignet für kritische Grundwassersituationen /41/.

4.4.4 Luftporenbildner (LP)

Als Rohstoffe für Luftporenbildner zur Erzeugung gleichmäßig verteilter kleiner Luftporen im Beton dienen:

- Seifen aus natürlichen Harzen und
- Synthetische nichtionische und ionische Tenside.

Alle Rohstoffe bestehen aus einem hydrophoben und einem hydrophilen Teil und setzen die Grenzflächenspannung zwischen zwei nicht mischbaren Phasen herab.

Für die Herstellung von Harzseifen werden Tallharze, Balsamharze, Wurzelharze und deren Derivate mit Kali- bzw. Natronlauge oder Soda in entsprechende Harzseife überführt. Als Synthetische Tenside werden in erster Linie Alkylpolyglykolether, Alkylsulfate und- sulfonate eingesetzt.

Im fertigen Produkt liegt die Wirkstoffkonzentration bei 2 bis 20 M.-%. In Luftporenbildnern werden üblicherweise keine weiteren Additive oder Hilfsmittel eingesetzt.

Toxikologische Bewertung:

Die akute Toxizität ist als unbedenklich anzusehen, die Stoffe wirken jedoch je nach Alkalität reizend oder ätzend laut GefStoffV. Sie sind biologisch abbaubar. Während die unverseiften Harze wasserunlöslich sind und der Wassergefährdungsklasse 1 entsprechen sind die Harzseifen und die synthetischen Tenside löslich und wirken längerfristig schädigend auf Wasserorganismen (Wassergefährdungsklasse 2).

4.4.4.1 Auslaugverhalten

Aufgrund des Tensidcharakters der Wirkstoffe reichern sich die Luftporenbildner am Rand der Luftpore an, wobei der hydrophile Teil in der Zementsteinmatrix verankert wird /41/. Ergebnisse von Auslaugversuchen liegen nicht vor.

4.4.5 Dichtungsmittel (DM)

Dichtungsmittel dienen der Verminderung der kapillaren Wasseraufnahme. Als Rohstoff für Dichtungsmittel wird Im Allgemeinen Calciumstearat eingesetzt.

Calciumstearat ist physiologisch unbedenklich (weder giftig, gesundheitsschädlich, reizend, noch ätzend), gut biologisch abbaubar und wird in die Wassergefährdungsklasse 0 eingestuft.

Die Wirkstoffkonzentration im fertigen Produkt liegt bei 20 bis 50 M.-%.

4.4.5.1 Auslaugverhalten

Calciumstearat ist schwerlöslich und wasserabweisend, die Auslauggefahr ist deshalb sehr gering. Daten zur Auslaugung wurden nicht gefunden.

4.4.6 Einpresshilfen (EH)

Die bei Verwendung von Einpresshilfen (EH) gewünschte Quellwirkung wird durch metallisches Aluminium hervorgerufen, das sich im alkalischen Milieu unter Wasserstoffbildung auflöst. Aluminiumpulver genügt den Reinheitskriterien von Farben, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen; es hat keine toxischen Eigenschaften und ist in die Wassergefährdungsklasse 0 eingestuft.

Neben dem Aluminiumpulver enthalten Einpresshilfen Verflüssiger, Fließmittel und / oder Verzögerer. Die Wirkstoffkonzentration liegt bei 0,1 bis 1 M.-%.

4.4.6.1 Auslaugverhalten

Aluminium geht in Hydratationsprodukte über und wird eingebunden /41/.

4.4.7 Stabilisierer (ST)

Als Rohstoffe für Stabilisierer (ST) werden:

- Polysaccharide (in erster Linie Celluloseether und Stärkeether),
- Nanosilika und kolloidale Kieselsäure (für die Auslaugung und Ausgasung organischer Stoffe unmaßgeblich),
- natürliche Gummimodifikationen,
- Polyacrylat (s. Abschnitt 4.4.1.4) und,
- Polyethylenoxid

eingesetzt. In /41/ werden nur die Polysaccharide behandelt. Celluloseether werden durch Aufschluss und Modifikation von Baumwolle und / oder Holz gewonnen. Stärkeether sind Modifikationen der natürlichen Stärke. Die Stoffe sind gut biologisch abbaubar, allerdings unter hohem Sauerstoffbedarf. Eine Gefährdung aquatischer Organismen geht von diesen Stoffen nicht aus, sie sind in die Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdend) eingestuft.

Stabilisierer werden flüssig oder pulverförmig eingesetzt, es gibt keine einheitliche Wirkstoffkonzentration. Im Beton liegt die Dosierung unter 1 M.-%.

4.4.7.1 Auslaugverhalten

Cellulose- und Stärkeether werden in den Zementstein eingebunden /41/.

4.4.8 Recyclinghilfen

Recyclinghilfen werden für Washwasser und Restbeton eingesetzt und gelangen auf diesem Weg in den Beton. Die Rohstoffe sind

- Phosphonsäuren und
- Fruchtsäuren

in wässriger Zubereitung. Sie haben eine verzögernde Wirkung.

Die Stoffe werden in einer Wirkstoffkonzentration von 10 bis 20 M.-% eingesetzt.

Wegen sauren Eigenschaften dürfen Recyclinghilfen nicht direkt ins Abwasser gelangen, sondern müssen vorher neutralisiert werden.

4.4.8.1 Phosphonsäuren

Für Recyclinghilfen eingesetzte Phosphonsäuren sind organische Derivate der Phosphorsäure mit P - C - Bindung, bevorzugt wird 2-Phosphanobutan-1,2,4-tricarbonsäure (PBTS) verwendet.

Toxikologische Bewertung:

50%ige wässrige Lösung von PBTS sind toxikologisch unbedenklich; auch bei hohen Konzentrationen tritt keine Schädigung aquatischer Organismen (Fische und Bakterien) auf. Es gibt keine Hinweise auf teratogene oder mutagene Wirkung, daher ist der Stoff gemäß GefStoffV nicht kennzeichnungspflichtig und in die Wassergefährdungsklasse 1 eingestuft.

4.4.8.2 Fruchtsäuren (Hydroxycarbonsäuren)

Fruchtsäuren sind z. B. Zitronensäure, Weinsäure, Gluconsäure oder Milchsäure. Bevorzugt wird Zitronensäure verwendet.

Toxikologische Bewertung:

Zitronensäure ist in konzentrierter Form hautreizend und daher gemäß GefStoffV mit Xi zu kennzeichnen. Sie ist leicht biologisch abbaubar, zeigt keine Bioakkumulation und ist sowohl von der akuten als auch von der chronischen Toxizität her unbedenklich. Daher fällt sie in die Wassergefährdungsklasse 0.

4.4.8.3 Auslaugverhalten

Höchstwahrscheinlich werden die Recyclinghilfen an der Oberfläche der Hydratationsprodukte adsorbiert und damit in den Zementstein eingebunden (ähnlich wie z. B. Betonverflüssiger und Verzögerer), es liegen jedoch noch keine Ergebnisse von Elutionsversuchen vor /41/.

4.4.9 Chromatreduzierer

Chromatreduzierer dienen dazu das wasserlösliche Chromat im Zementleim zu Cr (III) zu reduzieren und damit unlöslich zu machen. Der wesentliche Rohstoff ist Eisen(II)-sulfat, ein Nebenprodukt bei der Herstellung von Titandioxid. Es wird in Kläranlagen als Flockungsmittel eingesetzt.

Chromatreduzierer wird pulverförmig oder als Granulat eingesetzt.

Toxikologische Bewertung:

Eisen(II)-sulfat ist leicht reizend und gesundheitsschädlich bei oraler Aufnahme, daher ist es kennzeichnungspflichtig gemäß GefStoffV (Xn - gesundheitsschädlich). Die Wassergefährdungsklasse ist 1.

4.4.9.1 Auslaugverhalten

Im alkalischen Milieu des Beton erfolgt eine Umsetzung des Eisen(II)-sulfats in schwerlösliche Eisen(III)-oxidhydrate (Oxidation durch Chromat und Luftsauerstoff), daher ist nach /41/ eine Gefährdung der Umwelt durch Eluation nicht zu erwarten.

4.4.10 Additive und Hilfsstoffe für Betonzusatzmittel

Als Hilfsstoffe und Additive werden Konservierungsmittel und Entschäumer zugesetzt (in einer Größenordnung von 0,5%). Als Entschäumer eingesetzte Stoffe sind z. B. Tributylphosphat (Gefahrensymbol Xn (gesundheitsschädlich), WGK 2) und Siliziumorganische Verbindungen (toxikologisch unbedenklich, WGK 1). Konservierungsmittel sind z. B. Formaldehyd und Formaldehyd-abspaltende Verbindungen (0,1% von Zusatzmittel), phenolische Verbindungen (0,2 bis 0,5% von Zusatzmittel) und Isothiazolinon-Zubereitungen (0,02 bis 0,2% von Zusatzmittel).

Nach /41/ sind die Endprodukte aufgrund der hohen Verdünnung dieser Stoffe nicht als Gefahrstoffe anzusehen und daher auch nicht kennzeichnungspflichtig gemäß Gefahrstoffverordnung /42/. Die Wassergefährdungsklasse der Zubereitung wird in aller Regel durch den Rohstoff bestimmt.

Diese Frage wird in den Quellen /2/ und /44/ etwas kritischer betrachtet. Im folgenden Abschnitt sollen die Ausgasungen aus den Zusatzstoffen und den daraus hergestellten Betonen näher beleuchtet werden.

4.4.11 Freisetzung flüchtiger Substanzen bei Verwendung von Betonzusatzmitteln

In /9/ wurden 40 verschiedene Betonzusatzmittel (Vertreter der Wirkgruppen aus Abschnitt 4.4.1 bis 4.4.7) bezüglich der Hauptkomponenten und der flüchtigen Stoffe untersucht.

Die Gehalte organischer Substanzen im geschlossenen Gasraum über Betonzusatzmitteln sind mit der Head-Space-Gaschromatographie bei 80 °C bestimmt worden.

Die abgegebene Menge flüchtiger Substanzen war insgesamt gering. Neben Formaldehyd (CH₂O) waren z. B. Methanol, Aceton, und Ethylacetat im Gasraum enthalten, die Konzentrationen dieser Stoffe werden in /9/ als unschädlich bewertet. Die Freisetzung von Formaldehyd ist jedoch auf Grund des sehr geringen MAK-Werts kritisch (s. Abschnitt 4.4.11.1).

Versuche mit dem gleichen Messverfahren /44/ ergaben, dass im Gasraum über verschiedenen Zusatzmitteln neben den oben genannten z. B. auch die Verbindungen Acetaldehyd, Ethanol, 2-Propanol, 2-Methyl, 2-Propanol, 1-Propanol, 1-Butanol und weitere Alkohole, Naphthalin und verschiedene Kohlenwasserstoffe nachgewiesen werden können. Einige dieser Stoffe können auch aus Beton freigesetzt werden (s. Abschnitt 4.4.11.2).

Bei der Beurteilung der emittierten Konzentrationen muss berücksichtigt werden, dass die Werte sehr stark vom verwendeten Prüfverfahren, insbesondere von der Geometrie und der Lüftungsrate abhängen. Vergleiche sind dadurch nur eingeschränkt möglich /44/.

4.4.11.1 Freisetzung von Formaldehyd

In /9/ wird festgestellt, dass theoretisch eine Überschreitung der vom Bundesgesundheitsamt (BGA) empfohlenen zulässigen Innenraumkonzentration für Formaldehyd von 0,1 ppm auftreten kann, wenn das Formaldehyd vollständig an die Innenraumluft abgegeben wird. Bei einer sehr schnellen Abgabe schon während der Verarbeitung könnte eine Überschreitung auftreten, die anhand des zulässigen MAK-Werts von 0,5 ppm zu bewerten wäre. Auf die späteren Nutzer hätte diese Freisetzung dann keine Auswirkung mehr. Um eine eventuelle Gefährdung durch Formaldehyd festzustellen ist es erforderlich den Verlauf der Freisetzung zu ermitteln. Dafür wurde zunächst der Gehalt an freiem Formaldehyd in den 40 verschiedenen Zusatzmitteln nach der Acetylaceton-Methode ermittelt.

Tabelle 29: Gehalt an freiem Formaldehyd der Betonzusatzmittel (Acetylaceton-Methode) /9/

Betonzusatzmittel	Probenanzahl	freies CH ₂ O
1	2	3
Betonverflüssiger (BV)	5	0,007 – 0,025
Fließmittel (FM)	10	0,003 – 0,564
Verzögerer (VZ)	5	n. n. – 0,036
Beschleuniger (BE)	4	n. n. – 0,044
Luftporenbildner (LP)	4	n. n.
Dichtungsmittel (DM)	3	n. n.
Einpresshilfen (EH)	5	n. n. – 0,152
Stabilisierer (ST)	3	n. n.

Die höchsten freien Formaldehydhalte wurden für Fließmittel gemessen (s. Tabelle 29), daher ist der Verlauf der Freisetzung für Zementleime mit fünf verschiedenen Fließmitteln (0,179 bis 0,564% freies Formaldehyd) mit der Exikatormethode bestimmt worden. Die Dosierung lag bei 1% vom Zementgehalt (CEM I 32,5 R). Bild 7a zeigt die Freisetzung der unterschiedlichen Fließmittel bei einem Wasserzementwert $w/z = 0,5$ und Bild 7b den Einfluss des w/z -Werts auf die Abgabe.

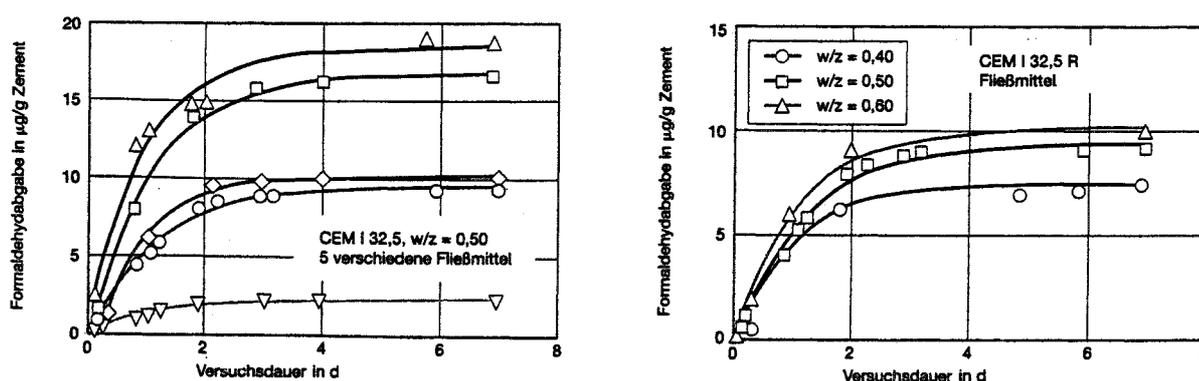


Bild 7: Formaldehydabgabe von Zementleimen

- mit fünf unterschiedlichen FM (1% vom Zementgehalt) (links) und
- für Zementleim mit unterschiedlichen w/z -Werten (1% FM mit mittlerem freiem Formaldehyd) (rechts)

Es wurde festgestellt, dass eine Abhängigkeit der Ausgasung vom Gesamtgehalt besteht. Es werden im Schnitt etwa 30% des Formaldehyds freigesetzt. Die Bilder zeigen einen raschen Anstieg der Formaldehydabgabe, der nach rund 2 Tagen deutlich abflacht. Nach 7 Tagen ist kein Anstieg mehr messbar. Ein höherer w/z-Wert erleichtert offenbar die Freisetzung und führt zu etwas höheren Abgaben.

Die Ergebnisse zeigen, dass während der Nutzungsphase keine Gefährdung durch Formaldehyd besteht. Nur unter ungünstigsten Bedingungen könnten sich kurzfristige Überschreitungen des MAK-Werts bei der Herstellung ergeben, die aber in der Praxis noch nie festzustellen waren, da der Formaldehydgehalt in der Regel geringer ist als bei den gewählten Fließmitteln und der Luftwechsel in einem Rohbau öfter als einmal pro Stunde stattfindet /9/. Hinzu kommt der Einfluss der Schichtdicke auf die Ausgasung. Hier wurde eine 2 cm dicke Zementleimschicht betrachtet. Bei einer 20 cm dicken Betonplatte wird der Austritt entsprechend länger dauern. Teilweise reagiert das Formaldehyd auf diesem Weg mit den OH^- -Ionen des Zementleims. Dabei werden Methanol und Formiat (CHO_2^-) gebildet (Cannizzaro-Reaktion). Diese Reaktion ist in /9/ mit methanolfreien Zusatzmitteln nachgewiesen worden. Höhere pH-Werte und höhere Temperaturen führen dabei zu einer gesteigerten Methanolentwicklung.

Formaldehyd kann auch zu Zuckerderivaten umgewandelt werden, was aber noch nicht nachgewiesen werden konnte /9/.

Aus den obigen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die Ausgasung aus Beton, die durch die Zugabe von Betonzusatzmitteln entsteht, als unproblematisch betrachtet werden kann.

4.4.11.2 Freisetzung sonstiger organischer Stoffe

In /44/ wurden zwei Betonverflüssiger, drei Fließmittel, ein Luftporenbildner, ein Beschleuniger und ein Stabilisierer untersucht. Die Tabelle 30 zeigt eine Übersicht der Zusatzmittel.

Tabelle 30: Untersuchte Betonzusatzmittel und deren Zusammensetzung /44/

Betonzu- satzmittel	Erscheinungs- form	Dichte bei 20°C	Wirkstoffe / Rohstoffe
1	2	3	4
BV 1	flüssig	1,14	Ligninsulfonat, Hilfsstoffe
BV 2	Pulver	1,1	Melaminformaldehydkondensat
FM 1	flüssig	1,15	Ligninsulfonat, Naphthalinsulfonat
FM 2	flüssig	1,0	Naphthalinsulfonat
FM 3	flüssig	1,1	Polycarboxylatether
LP	flüssig	1,1	Alkylethersulfat
BE	Pulver	1,05	Calciumdiformiat
ST	Pulver	1,03	Polyethylenoxid, Kalksteinmehl

Die Bestimmung der ausgegasteten Stoffe erfolgte mit der „Aachener Prüfkammer“, einer 1 m³ großen Zelle, in der eine Betonoberfläche von 0,25 m² untersucht wird. Der Beton wird dabei mit der Schalung im frischen Zustand in der Zelle aufgestellt. Die erste Messung erfolgte unmittelbar nach der Herstellung, die zweite nach 1 Tag, dann nach 2, 7, 14 und 28 Tagen. Zwischen den Messungen wurde die Kammer gelüftet. Die Messdauer betrug jeweils 60 min.

Im Gasraum über den untersuchten Betonen wurden 2-Propanol, Aceton, n-Hexan, Benzol, Ethylbenzol, 1-Butanol, Toluol, o,m,p-Xylol, Styrol, Naphthalin, Formaldehyd und nicht weiter differenzierte Kohlenwasserstoffe gemessen. Die toxikologischen Daten und Eigenschaften dieser Stoffe sind im Anhang in den Tabellen A8 und A9 im Anhang zu finden. Die Abgabe ist für die meisten Stoffe nach 14 Tagen sehr stark zurückgegangen (s. Bild 8), so dass eine Gefährdung für die Nutzer nicht zu befürchten ist.

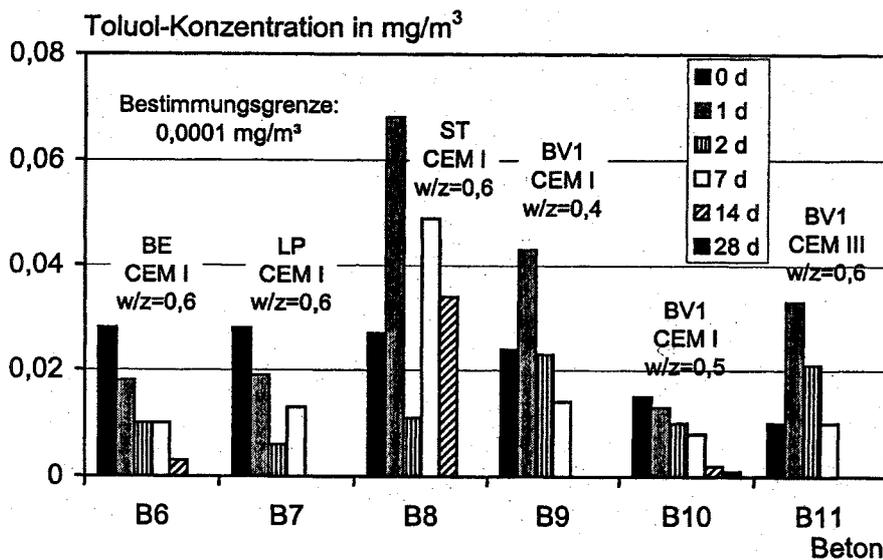


Bild 8: Toluol-Emissionen aus Betonen mit Betonzusatzmitteln (Prüfkammermethode) /44/

Die Tabelle enthält eine Aufstellung der höchsten gemessenen Konzentrationen der oben genannten umweltrelevanten Stoffe (Formaldehyd wird hier nicht betrachtet). Für diesen Zeitraum (Herstellung) gelten die MAK-Werte.

Tabelle 31: Maximal aufgetretene Konzentration der aus Beton ausgegasten organischen Schadstoffe und zulässige MAK-Werte /44/

Schadstoff	Einheit	höchster Messwert	verwendetes Zusatzmittel	weitere Angaben zum verwendeten Beton	MAK-Wert
1	2	3	4	5	5
2-Propanol	mg/m ³	0,2	BV 1	CEM I 32,5 R, w/z = 0,4	500
Aceton		0,008	FM 2	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	1200
n-Hexan		0,015	BV 1	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	180
Benzol		0,014	ST	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	3,2
Ethylbenzol		0,012	ST	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	440
1-Butanol		0,232	LP	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	300
Toluol		0,068	ST	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	190
m,p-Xylol		0,031	ST	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	440
o-Xylol		0,008	ST	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6	
Styrol		0,001	BV 1	CEM I 32,5 R, w/z = 0,5	85
Naphthalin		0,001	ST / BV 1	CEM I 32,5 R, w/z = 0,6 / CEM I 32,5 R, w/z = 0,5	50
Kohlenwasserstoffe		2,33	BV 1	CEM I 32,5 R, w/z = 0,5	-

Es ist zu erkennen, dass die umweltrelevanten Stoffe in sehr kleinen Konzentrationen freigesetzt werden, die nicht zu einer Gefährdung führen.

Für den Nutzungszeitraum werden andere Grenzwerte wirksam; in /44/ ist eine Zusammenstellung vorgeschlagener Bewertungskriterien gegeben. Die schärfsten Richtwerte sind die Zielwerte nach Seifert /45/. Hier werden für verschiedene Stoffgruppen (Alkane, aromatische Kohlenwasserstoffe, Terpene, halogenierte Kohlenwasserstoffe, Ester, Aldehyde und Ketone und sonstige Stoffe) Raumluftkonzentrationen vorgeschlagen. Einzelstoffe dürfen höchstens 50% des Gesamtwerts für die jeweilige Gruppe erreichen.

Die meisten der oben genannten Stoffe sind Aromate, 2-Propanol und Butanol sind Alkohole (zugehörig zu Gruppe der sonstige Stoffe nach Seifert), Aceton ist ein Keton, n-Hexan und die sonstigen Kohlenwasserstoffe können den Alkanen zugerechnet werden. Unter den geprüften Betonen wiesen die Mischungen B10 (CEM I 32,5 R, w/z = 0,5 mit BV 1 als Zusatzmittel) und B 8 (CEM I 32,5 R, w/z = 0,6 mit ST als Zusatzmittel) die höchsten Werte auf. Die Ergebnisse für die einzelnen Gruppen sind in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Vergleich der gemessenen Konzentrationen mit den Grenzwerten nach Seifert, Werte aus /44/

chem. Substanzgruppe	Einheit	höchster Messwert nach 28 d	Betonmischung	Bemerkungen	Grenzwert nach Seifert	
1	2	3	4	5	6	
Alkane	mg/m ³	0,283	B 10	Grenzwert überschritten	0,1	
Aromatische Kohlenwasserstoffe		0,0034	B 10	-	0,05	
		0,0375 ¹⁾	B 8	Ausreißer für Toluol: 0,034 mg/m ³ , daher Grenzwert überschritten		
Terpene					0,03	
Halogenierte Kohlenwasserstoffe			-	-	0,03	
Ester					0,02	
Aldehyde und Ketone			0,003	B 10		0,02
Sonstige			0,022 ¹⁾	B 8		0,05

1) höchster Messwert nach 14 d, für B8 wurden keine 28 d - Werte ermittelt

Der Grenzwert wird für Alkane und in einem Ausnahmefall für die Aromaten überschritten. Die Überschreitung bei den Aromaten gilt nur für Toluol; den vorhandenen Messdaten zufolge nehmen die Konzentrationen mit der Zeit weiter ab, so dass man erwarten kann, dass der Wert vor Beginn des Nutzungszeitraums unter $0,025 \text{ mg/m}^3$, was zulässig wäre, fällt. Gleiches kann für die Alkane erwartet werden. Unter diesen Umständen sind die Emissionen als unkritisch zu betrachten.

4.4.12 Bewertung der Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln

Für viele der in Zusatzmitteln verwendeten Wirkstoffe existieren nur sehr wenige Daten; umfassende Untersuchungen des Auslaugverhaltens liegen nur für die Wirkstoffe von Betonverflüssigern und Fließmitteln vor. Abbauprodukte wurden kaum betrachtet. Für die Ausgasung fehlen Richtwerte, die einem festgelegten Prüfverfahren zuzuordnen sind.

Die vorhandenen Daten und die Eigenschaften der verwendeten Stoffe sprechen für eine geringe Umweltrelevanz der Betonzusatzmittel, zumal die eingesetzten Mengen sehr klein sind.

4.5 Zugabewasser

Als Zugabewasser zur Herstellung von Beton nach DIN EN 1045-2 /87/ ist das in der Natur vorkommende Wasser geeignet, soweit es nicht Bestandteile enthält, die das Erhärten oder andere Eigenschaften des Betons ungünstig beeinflussen oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen. Es gelten folgende technische Regelungen bezüglich der Eignung des Zugabewassers /17, 19/:

- Trinkwasser ist stets geeignet;
- Restwasser aus Recyclinganlagen der Betonherstellung ist i. d. R. geeignet, muss jedoch den Anforderungen der entsprechenden DafStb-Richtlinie /17/ genügen;
- natürliches Grund- und Oberflächenwasser (Frischwasser) kann geeignet sein, ist jedoch vor und während seiner Verwendung zu prüfen;
- Meer- oder Brackwasser können nach entsprechender Eignungsprüfung für unbewehrten Beton verwendet werden. Sie dürfen für bewehrten Beton, insbesondere Spannbeton, wegen ihres Chloridgehalts nicht verwendet werden;
- Abwasser darf grundsätzlich nicht als Zugabewasser für Beton verwendet werden.

Im Zweifelsfall ist eine Untersuchung über die Eignung des Wassers zur Betonherstellung nötig. Die physikalischen Untersuchungen für die Verwendung als Zugabewasser schließen auch Prüfungen auf ölige Bestandteile, Detergenzien, Geruch- und Schwebstoffe ein. Sobald geringfügige Mengen überschritten werden, sind qualifizierte Beurteilungen durch den Prüfer erforderlich /19/.

Gegen die kontrollierte Zugabe von Restwasser aus Frischbetonrecyclinganlagen bestehen keine Bedenken, da Restwasser nur solche Stoffe enthält, die ohnehin als Betonausgangsstoffe verwendet werden. Sind Zusatzmittel im Restwasser enthalten, so muss eine elektrochemische Prüfung entsprechend der Richtlinie für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmitteln /18/ erfolgen.

Für den Trinkwasserbereich müssen neben den technischen Anforderungen zusätzliche Anforderungen an die Reinheit des Zugabewassers erfüllt werden, es muss für Trinkwasserbehälter aus Beton nach /21/ Trinkwasserqualität aufweisen. Grund-, Oberflächen- und Regenwasser kann nur verwendet werden, wenn die Eignung nachgewiesen ist. Bei der Auskleidung von Trinkwasserleitungen mit Zementmörtel wird für das Zugabewasser der Nachweis einer spezifischen Leitfähigkeit $< 200 \text{ mS/m}$ und eines KMnO_4 -Verbrauchs $< 10 \text{ mg/l}$ verlangt /94/.

Aufgrund dieser Regelungen kann der Eintrag von umweltrelevanten Stoffen aus dem Zugabewasser Im Allgemeinen vernachlässigt werden.

5 ABSCHLIESSENDE BEWERTUNG

5.1 Allgemeines

In diesem Bericht sollte die Umweltverträglichkeit der Ausgangsmaterialien von Beton beurteilt werden. Eine schädigende Einwirkung auf die Schutzgüter Wasser, Boden oder Luft kann durch die Freisetzung umweltrelevanter Bestandteile durch Auswaschung bzw. Auslaugung, durch die Emission flüchtiger Bestandteile sowie durch die Emission von Radioaktivität erfolgen.

Hier wurden die Belastungspfade Auslaugung (bei zementgebundenen Baustoffen vorwiegend anorganischer Stoffe) durch Kontakt mit einer Auslaugflüssigkeit, z. B. Wasser in Form von Regen oder Grundwasser, und Emission flüchtiger Stoffe (vor allem organischen Ursprungs) in die Raumluft betrachtet.

Entscheidend für die Freisetzung sind nicht die Mengen der in den Betonausgangsstoffen natürlich vorhandenen oder durch den Herstellungsprozess künstlich eingetragenen umweltrelevanten Bestandteile, sondern die Anteile, die während der Verarbeitung, Nutzung

und Entsorgung / Verwertung von Frisch- und Festbeton pro Zeiteinheit freigesetzt werden können. Der Bericht beschränkt sich hier auf die Nutzungsphase.

Die Bewertung erfolgt auf Grundlage des DIBt-Merkblatts /11/.

5.2 Auslaugung

Bei der Beurteilung des Auslaugverhaltens wurden die Gesamtgehalte, die mobilisierbaren Anteile (bestimmt im Schütteltest) und die bei Einbindung in Beton freigesetzten Anteile (bestimmt im Standtest) umweltrelevanter Stoffe betrachtet. Zur Einschätzung der Umweltrelevanz der verwendeten Stoffe werden die Ergebnisse ökotoxikologischer Untersuchungen und die nach dem alten WGK-Konzept bestimmten Wassergefährdungsklassen in den einzelnen Kapiteln angegeben.

Prinzipiell ist die Bewertung auf Grundlage des Standtests z. B. entsprechend /8/ vorzuziehen, da hier praxisrelevante, zeitabhängige Abgaben bestimmt werden können. Mit der ermittelten Freisetzungsrate kann eine Modellierung der Schadstoffausbreitung im Grundwasser vorgenommen werden und so relativ wahrscheinliche Vorhersagen getroffen werden. Dieses Vorgehen wird auch in /11a/ beschrieben. Das gesamte Verfahren ist jedoch aufwendig und viele Stoffe sind noch nicht untersucht worden.

Die Untersuchung mit dem Standtest kann entfallen, wenn für alle relevanten Inhaltsstoffe ein Nachweis der Unbedenklichkeit erbracht werden kann /11/. Hier kann der Schütteltest (nach DIN 38 414 S-4 /99/) an der Originalsubstanz eingesetzt werden. In einigen Quellen wurden auch Mörtel / Betone mit den zu untersuchenden Ausgangsstoffen hergestellt, zerkleinert und in Schütteltests untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche können einen Anhaltspunkt für die Umweltverträglichkeit der Ausgangsstoffe liefern, es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Schütteltests durch die Zerkleinerung erhöhte Werte liefern. Ein Stoff, der im Eluat die Geringfügigkeitsschwelle des Merkblatts /11/ überschreitet, kann dennoch im Beton umweltverträglich sein. Bei den Schütteltests muss auch der pH-Wert beachtet werden. Elutionen im sauren Bereich sind für die Anwendung im Beton nicht praxisrelevant. Einige Stoffe sind im alkalischen Milieu stärker löslich als im neutralen Bereich. Auch das sollte berücksichtigt werden.

Der Vorteil der Schütteltests ist, dass sie schnell und einfach durchzuführen sind. Weiterhin werden Schütteltests, z. B. bei pH 12 benötigt, um aus den Ergebnissen eines Standtests effektive Diffusionskoeffizienten berechnen zu können, da in der Regel die betrachteten umweltrelevanten Stoffe nicht vollständig im Eluenten löslich sind.

Die Gesamtgehalte ermöglichen nur eine grobe Einschätzung, da die in der Praxis ausgelaugten Stoffmengen von den Gesamtgehalten meist unabhängig sind /5/. Allerdings kann über die Gesamtgehalte der Eintrag von Schwermetallen in den Beton beurteilt werden.

Bei der Beurteilung wurden zwei Überlegungen getroffen:

- Bei Stoffen, die wie Zement zum Großteil chemisch umgesetzt werden, erfolgt die Einbindung in erster Linie durch den Zementstein. Hier ist der Diffusionswiderstand der Matrix und die Stabilität von Reaktionsprodukten mit eingebundenen Schwermetallen entscheidend. Das gilt z. B. für Mikrosilika. Sind die Gesamtgehalte umweltrelevanter Stoffe hier geringer als im Zement (der als umweltverträglich bewertet wird), so kann eine Gefahr für die Umwelt mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden.
- Bei Stoffen, die während der Zementhydratation nur oberflächlich oder gar nicht reagieren, wie Flugasche oder Pigmente, können die Gesamtgehalte deutlich höher als im Zement sein, ohne eine Gefahr für die Umwelt darzustellen.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass bezüglich der Umweltverträglichkeit von Zement nach DIN EN 197-1 /85/ genügend Daten zur Verfügung stehen, um die Umweltverträglichkeit zu beurteilen. Hier bestehen keine Bedenken.

Bei den Gesteinskörnungen besteht keine so breite Datenbasis, da zumeist Quarz in Auslaugversuchen eingesetzt wurde. Die üblichen natürlichen Zuschläge sind jedoch auf Grund ihrer im Vergleich zu Zement geringen Schwermetallgehalte und ihrer Beständigkeit im alkalischen Milieu als unproblematisch zu betrachten. Ähnliches gilt für die Leichtzuschläge. Da über Schwerzuschläge sehr wenig Literatur bezüglich der Umweltverträglichkeit gefunden wurde und die Schwermetallgehalte hoch sind, wird empfohlen, hier weitere Versuche durchzuführen, bevor eine abschließende Wertung abgegeben wird. Schlacken können in der Rohdichte sehr verschieden sein und daher in allen Zuschlagklassen auftauchen. Ihre Umweltverträglichkeit sollte im Einzelfall geprüft werden, da die Schwermetallgehalte sehr stark schwanken können. Meist wird die Durchführung eines Schütteltests (DEV-S4) an der Schlacke ausreichend sein, um die Unbedenklichkeit der Inhaltsstoffe zu belegen. Rezyklierte Gesteinskörnungen nach DAfStb-Richtlinie /25/ sind als umweltverträglich zu bewerten, sofern sie keine relevanten organischen Verunreinigungen enthalten.

Die betrachteten anorganischen Zusatzstoffe stellen bezüglich der Auslaugung keine Gefahr für Boden und Grundwasser dar, solange die Schwermetallgehalte in den üblichen Spannebenen (Tabelle A1 im Anhang) liegen. Die organischen Zusatzstoffe führen zu einer geringen

Freisetzung von organischen Stoffen, die jedoch unter dem Grenzwert von 20 mg/l TOC des DIBt-Merkblatts /11/ liegt.

Bei den Betonzusatzmitteln bestehen noch eine Reihe offener Fragen, vor allem in Bezug auf entstehende Abbauprodukte. Allerdings ist die Konzentration dieser Stoffe sehr gering, so dass fraglich ist, ob sich diese Stoffe als umweltrelevant erweisen. Derzeit laufen Untersuchungen zur Auslaugung organischer Stoffe aus fließmittelhaltigem Beton im Rahmen des vom BMBF finanzierten Verbundprojekts „Konzept zur Bewertung des Auslaugverhaltens mineralischer Baustoffe/-körper durch Sicker- und Kontaktgrundwasserprognose. Die Ergebnisse werden zu einer Klärung der offenen Fragen beitragen.

5.3 Emission von Gasen

Es ist damit zu rechnen, dass leicht flüchtige Komponenten in erster Linie aus dem Frischbeton, d. h. während der Verarbeitung, freigesetzt werden. Relevante Stoffe sind hier Ammoniak (aus Flugasche, s. Abschnitt 4.3.2.3) und organische Stoffe, z. B. Formaldehyd, das in erster Linie aus Betonzusatzmitteln stammt (s. Abschnitt 4.4.11). Auch die organischen Zusatzstoffe emittieren flüchtigen Stoffe. Diese Emissionsvorgänge klingen bereits nach kurzer Zeit deutlich ab.

Eine endgültige Bewertung der Emissionen kann allerdings noch nicht getroffen werden, da für die Nutzungsphase noch kein klares Bewertungskonzept vorliegt. Die MAK-Werte gelten nur für eine Dauer von 8 Stunden täglich. Wohnräume können nicht nach diesen Kriterien beurteilt werden. Ein stoffbezogenes Beurteilungskonzept muss die für die Risikoabschätzung erforderlichen toxikologischen Stoffdaten ebenso wie die sonst gegebenen Hintergrundbelastungen beinhalten und sollte der Nutzungssituation des betreffenden Innenraums Rechnung tragen.

6 LITERATUR

- /1/ Steinhäuser, K.G.: LtWS - Nr. 28 Bewertung wassergefährdender Stoffe – Dokumentation des bisherigen Einstufungsverfahrens, 1998. – Adresse : <http://www.umwelt-daten.de/down-d/ltws28.pdf>
- /2/ Reder, A.: Der Fischttest nach DIN - eine kritische Betrachtung, Adresse : <http://www.giub.uni-bonn.de/seminare/wasser/ss98/Reder.html>

- /3/ VGB PowerTech: Beurteilung der Ökotoxizität von Steinkohlenflugaschen durch Bestimmung der aquatischen Toxizität – Zusammenfassung von Untersuchungen des Hygiene Instituts Gelsenkirchen, unveröffentlicht
- /4/ Sloot van der, H.A.; Heasman, L.; Quevauviller, Ph.: Harmonisation of Leaching / Extraction Tests. Vol. 70: Studies in Environmental Science. Amsterdam: Elsevier, 1997
- /5/ Hohberg, I.: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Dissertation, 2002 = Berlin : Beuth. – In : Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (erscheint in Kürze)
- /6/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Portlandzement, Portlandhüttenzement, Portlandkalksteinzement, Hochofenzement und Trasszement. Mainz : Firma Heidelberger Zement AG, 2001
- /7/ Hohberg, I. ; Müller, C. ; Schießl, P. ; Volland, G.: Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe. Sachstandsbericht. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Nr. 458, 1996
- /8/ DAfStb UA Umweltverträglichkeit von Beton, Arbeitsgruppe Normung von Auslaugverfahren: Normentwurf „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“ – 5. Fassung. Feb. 2002
- /9/ Spanka, G. ; Thielen, G.: Freisetzung flüchtiger Substanzen aus zementgebundenen Bauprodukten (Teil 1+2). In: Beton 49 (1999), Nr. 2, S. 111-114, Nr. 3, S. 173-177, 1999
- /10/ Beckert, J. ; Einbrodt, H.J. ; Fischer, M.: Untersuchungen zur gesundheitlichen Beurteilung von Naturgips und Rea-Gips aus Kohlekraftwerken im Hinblick auf deren Verwendung zur Herstellung von Baustoffen. (Vergleich von Naturgips und Rea-Gips)). Lübeck : Institut für Hygiene.- Aachen : Institut für Hygiene und Arbeitsmedizin.- Berlin : Institut für Boden- und Lufthygiene des Gesundheitsamtes, 1991. - Bericht und gutachterliche Stellungnahme
- /11/ Merkblatt „Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ – Teil I. (Fassung Nov. 2000.) Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2000
- /11a/ Projektgruppe „Beton und zementgebundene Baustoffe“, Kapitel Beton und Betonausgangsstoffe des Teil II – Bewertungskonzepte für spezielle Bauprodukte – des DIBt-Merkblatts /11/. Entwurf 04/02. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2002
- /12/ Roth-Kleyer, S.: Vegetationstechnische Eigenschaften mineralischer Substratkomponenten zur Herstellung von Vegetationstrag- und Dränschichten für bodenferne Begrünungen In: Dach und Grün (2001), Nr. 1 Adresse: <http://www.alpavert.ch/lavamix/lavamix60d.htm>

- /13/ Göttges, D. ; Volland, G. ; FMPA: Umweltverträglichkeit mineralischer Baustoffe : Inhaltsstoffe und Emission. Stuttgart : Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, 1998. - Sachstandsbericht Nr. 4417, 1998
- /14/ Schießl, P. ; Hohberg, I.: Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen – Untersuchungen zum Auslaugverhalten. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. - Forschungsbericht Nr. F 414
- /15/ Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dorner, H.W.; Handke, D.: Verringerung chemischer Auslaugungen aus Spritzbetonauskleidungen zum Schutz von Tunneldrainagen und Umwelt. In: Berichte aus dem Baustoffinstitut (1992), Nr. 2, S. A87-A90, 1992
- /16/ Sprung, S.: Umweltentlastung durch Verwertung von Sekundärrohstoffen. In: Zement Kalk Gips 45 (1992), Nr. 5, S. 213-221
- /17/ Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. (Fassung: 09.1991). Berlin : Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1991
- /18/ Richtlinien für die Erteilung von Zulassungen für Betonzusatzmittel (Zulassungsrichtlinien) (Fassung Juni 1993). In: Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik 24 (1993), Nr. 5, S. 162-173
- /19/ DBV Merkblattsammlung: Merkblatt Zugabewasser für Beton. (Fassung Januar 1982). Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, 1991. - In: Merkblattsammlung Merkblätter, Sachstandberichte, Richtlinien, S. 16-25
- /20/ Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf : Verlag Bau + Technik GmbH, 2000
- /21/ Planung und Bau von Wasserbehältern: Grundlagen und Ausführungsbeispiele (Fassung: 02.88) , Nr. W 311. Frankfurt : Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser , 1988
- /22/ Sprung, S.; Rechenberg, W.; Bachmann, G.: Environmental compatibility of cement and concrete. Amsterdam: Elsevier, 1984. - In: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Proceedings, Maastricht, Netherlands, 1-3 June 1994, (Goumans, J.J.J.M. ; et al (Ed.)), S. 369-386
- /23/ Produktinformation der Firma Safa; SAFAMOLITH. Adresse: <http://www.safa.de/html/menu.html>
- /24a/ Sauerwald: Hochofenstückschlacke HOS – Bestimmung der Wassergefährdungsklasse. Gelsenkirchen : Hygiene-Instituts des Ruhrgebiets (Institut für Umwelthygiene und Umweltmedizin), unveröffentlicht, Feb. 2002
- /24b/ Sauerwald: Elektroofenschlacke EOS – Bestimmung der Wassergefährdungsklasse. Gelsenkirchen : Hygiene-Instituts des Ruhrgebiets (Institut für Umwelthygiene und Umweltmedizin), unveröffentlicht, Dez. 2001

- /24c/ Sauerwald: LD-Schlacke LDS 2 – Bestimmung der Wassergefährdungsklasse. Gelsenkirchen : Hygiene-Instituts des Ruhrgebiets (Institut für Umwelthygiene und Umweltmedizin), unveröffentlicht, Dez. 2001
- /25/ Beton mit rezykliertem Zuschlag. Teil 1: Betontechnik Teil 2: Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand. Ausgabe Aug. 1998. Berlin : Deutscher Ausschuss für Stahlbeton , 1998
- /26/ Alean, J.; Carniel, R.: Informationen über Stromboli, Ätna und andere Vulkane, Thematische Liste der Fachbegriffe. Adresse: <http://www.educeth.ch/stromboli/glossary/thema-de.html>, 2002
- /27/ Baulexikon; das größte deutsche Fachlexikon im Internet. Testversion. Adresse: http://www.baulexikon.de/Bautechnik/Begriffe_Bautechnik/b/BAUlexikon_bims.htm
- /28/ Rust, A.: Blähtone, Blähschiefer, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Seminararbeit. Adresse: <http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/oberseminar/pdf/Alexander%20Rust.pdf>, 1999
- /29/ Produktinformation der Dennert Poraver GmbH, Schüsselfeld. Adresse: http://www.poraver.de/DE/frame_de.html
- /30/ Dämmstoff-Datenbank. Adresse: <http://www.nabu.de/archiv2/nachbar-natur/datenbank/blaehperlit.htm>
- /31/ Nierobis, L.: Informationen zu anorganischen Wärmedämmstoffen. Adresse: <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/anorganisch.htm> , 2002
- /32/ Environmental impact assessment of Elkem Mikrosilika. Oslo : Elkem Materials, 1998
- /33/ Sauerwald: Prüfberichte über die Bestimmung der akuten oralen Säugetiertoxizität, der akuten Toxizität gegenüber Fischen, der Algentoxizität und der Daphnientoxizität von Hüttensand. Gelsenkirchen : Hygiene-Instituts des Ruhrgebiets (Institut für Umwelthygiene und Umweltmedizin), unveröffentlicht, 2000 / 2001
- /34/ Tebbe, R.: Anorganische Pigmente, grundsätzliche Eigenschaften und Herstellung. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 58 (1992), Nr. 3, S. 130 – 139
- /35/ Lichtgrün, Lichtblau, Echtschwarz – Anorganische Spinellpigmente (Ausgabe: April 1993). Leverkusen : Bayer, 1993. - Firmenschrift
- /36/ Chromoxidgrün-Pigmente – Hochwertige Pigmente zur dauerhaften Einfärbung von Lacken, Kunststoffen und Baustoffen (Ausgabe: August 1997). Leverkusen: Bayer, 1997. - Firmenschrift
- /37/ Sicotan – die Nickel-, Chrom- und Mangantitanpigmente der BASF, Ausgabe: April 2000. Adresse: http://www.basf.de/basf/img/produkte/farbmittel/pigmente/pdf/ti/d/sicotan_d_low.pdf, 2000
- /38/ Nagataki, S.; Yu, Q.; Hisada, M.: Effect of Leaching Conditions and Curing Time on the Leaching of Heavy Metals in Fly Ash Cement Mortars. In: Advances in Cement Research 14 (2002), Nr. 2, S. 71-83

- /39/ Ruckstuhl, S.: Environmental Exposure Assessment of Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates and Sulfonated Naphthalenes Applied as Concrete Superplasticizers. Zürich, Swiss Federal Institute of Technology, Dissertation, 2001
- /40/ Sprung, S.; Rechenberg, W.: Schwermetallgehalte im Klinker und im Zement. In: Zement-Kalk-Gips 47 (1994), Nr. 5, S. 258-263
- /41/ Betonzusatzmittel und Umwelt. Frankfurt : Deutsche Bauchemie, 1999. - Sachstandsbericht
- /42/ Bundesanstalt für Arbeitsschutz; Gefahrstoffverordnung (GefStoffV): Verordnung über gefährliche Stoffe, Gefahrstoffverordnung und Anhänge I-VI. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Juli 1997. - Regelwerk RW 14
- /43/ Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln, 1. Version. Zürich : Fachverband Schweizerischer Hersteller von Betonzusatzmitteln, FSHBZ, 1995
- /44/ Brameshuber, W., Uebachs, S.: Freisetzung von umweltrelevanten organischen Bestandteilen aus Betonen mit Betonzusatzmitteln. Aachen : Institut für Bauforschung, 2000. - Forschungsbericht Nr. F 587
- /45/ Seifert, B.: Richtwerte für die Innenraumluft: Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). In: Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 42 (1999), Nr. 3, S. 270 - 278.
- /46/ Aignesberger, A.; Rey, T.; Schraemli, W.: Elektronenmikroskopische Studien der Erhärtungsvorgänge von Zement mit Zusätzen von Melaminharzen. In: Zement-Kalk-Gips 22 (1969), Nr. 8, S. 297-305
- /47/ Aignesberger, A.; Rosenbauer, H.-G.: Langzeitverhalten eines Betons mit Zusatz eines anionischen Melamin-Formaldehyd-Kondensationsproduktes. In: Tonindustriezeitung 97 (1973), Nr. 8, S. 205-207
- /48/ Aignesberger, A.; Reichert, J.: Melment in Concrete - Long Term Behaviour and selected Case Histories. Trostberg : SKW, 1970. - Firmenschrift
- /49/ Spanka, G. ; Thielen, G.: Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten. In: Beton 45 (1995), Nr. 5, S. 320-327
- /50/ Merkblatt Strahlenschutz - Merkblatt für das Entwerfen, Herstellen und Prüfen von Betonen des bautechnischen Strahlenschutzes (Fassung 1978 überarbeitet 1996). Wiesbaden : Deutscher Beton-Verein, 1997. - In: Merkblattsammlung Merkblätter, Sachstandsberichte. 1997
- /51/ Betontechnische Daten, Beton nach DIN 1045 unter Berücksichtigung der neuen Zementnorm DIN EN 197-1 (Ausgabe: Juli 2001. Heidelberg : Heidelberger Zement, 2001

- /52/ DIN Sicherheitsdatenblatt zum Produkt Lipaton SB 5850 (Handelsname). Marl : Hüls AG, Erscheinungsjahr unbekannt
- /53/ DIN Sicherheitsdatenblatt zum Produkt Mowilith LDM 6880 (Handelsname). Frankfurt : Hoechst AG, Erscheinungsjahr unbekannt
- /54/ Brameshuber, W. ; Brockmann, J. ; Rankers, R.: Emission von umweltrelevanten organischen Bestandteilen aus Betonen mit organischen Betonzusatzstoffen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1999. – Forschungsbericht Nr. F 626
- /55/ Molhave, L.: Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. In: Indoor Air 1 (1991), S. 357-376
- /56/ Dillmann, O. O.: GEODIENSTonline, Internetpräsentation vom Geowissenschaftlichen Dienst Wegberg. Adresse: <http://www.geodienst.de>), 2002
- /57/ Rösler, H. J.: Lehrbuch der Mineralogie, Bergakademie Freiberg, 3. Aufl. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984
- /58/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für 2-Propanol. Stuttgart : August Hedinger GmbH & Co, 2002.
- /59/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Aceton. Karlsruhe : Carl Roth GmbH & Co, 1998
- /60/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für n-Hexan. Stuttgart : Aug. Hedinger, 2000
- /61/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Benzol. Stuttgart : Aug. Hedinger GmbH & Co, 1998
- /62/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für 1-Butanol. Stuttgart : Aug. Hedinger GmbH & Co, 2000
- /63/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Toluol. Stuttgart : Aug. Hedinger GmbH & Co, 2001
- /64/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Xylol. Stuttgart : Aug. Hedinger GmbH & Co, 2001
- /65/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Styrol. Stuttgart : Aug. Hedinger GmbH & Co, 1999
- /66/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Naphthalin. Stuttgart : Aug. Hedinger GmbH & Co, 2002
- /67/ EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG für Formaldehyd-Lösung 35 % . Stuttgart : Hedinger GmbH & Co, 2000
- /68/ Enius AG - Gesundes Bauen, Wohnen und Leben. Adresse: <http://enius.de/schadstoffe.html>, 2002
- /69/ Seilnacht, T.: Chemieunterricht und Chemiedidaktik, Chemikalienlexikon organische Stoffe. Adresse: www.seilnacht.tuttlingen.com/Chemie/ch_organ.html, 2002

- /70/ Schießl, P. ; Hohberg, I. ; Rankers, R.: Umweltverträglichkeit von Baustoffen für Außenfassaden. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. - Forschungsbericht Nr. F 415
- /71/ Landesanstalt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht Rheinland Pfalz, Ref. 64/ Dr. Nonte: Informationen zum Einsatz von Abfällen in Bauprodukten aus abfallwirtschaftlicher Sicht – Tischvorlage zur 4. Sitzung der Projektgruppe „Beton und zementgebundene Baustoffe“ vom 12.10.2001
- /72/ Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth Completely Revised Edition, 1994
- /73/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen –Technische Regeln –. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 4., erweiterte Auflage. Stand: Nov. 1997
- /74/ Verein Deutscher Zementwerke (VDZ); Forschungsinstitut der Zementindustrie: Tätigkeitsbericht 1990-93 Düsseldorf : Verein Deutscher Zementwerke e.V., 1993
- /75/ Bialucha, R. ; Geiseler, J. ; Degro, W.: Zur Wirkung von Hochofenschlacke auf Boden und Grundwasser bei Verwendung im Straßenbau. Duisburg : Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken. - In: Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (1991), Nr. 1, S. 221-237
- /76/ Hammer, S. ; Geiseler, J.: Einfluss von Straßenbaustoffen aus Eisenhüttenschlacken auf den Vitalitäts- Zustand von Straßenbäumen. Duisburg : Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken. - In: Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (1991), Nr. 1, S. 238-248
- /77/ Geiseler, J.: Verwertung von Hochofen- und Stahlwerksschlacken. Duisburg : Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken. - In: Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (1991), Nr. 1, S. 1-32
- /78/ Verein Deutscher Zementwerke ; VDZ: Eigenschaften von granulierten Hochofenschlacken und künstlichen basischen Gläsern. Düsseldorf : Verein Deutscher Zementwerke, VDZ. - In: Schriftenreihe der Zementindustrie (1954), Nr. 15
- /79/ UAG "Hintergrundwerte" der Ad-hoc-AG Geochemie Statusbericht Dezember 1996 Hrsg.: Mederer, Joseph; Hindel, Roland; Rosenberg, Fred; Linhard, Elmar; Martin, Manfred 1998.
- /80/ Schießl, P. ; Müller, C. ; Hohberg, I.: Umweltverträglichkeit von Recyclingmaterialien - Ansätze zur Bewertung im Hinblick auf die Verwertung als Betonzuschlag -. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. - Forschungsbericht Nr. F 469
- /81/ VGB ; Techn. Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber ; VGB-Konferenz: Verwertung von Reststoffen und Entsorgung von Abfällen aus Kohlekraftwerken 1994 - VGB-TB 704 - Vorträge der VGB Konferenz vom 9./10. März 1994 in Essen. Essen : VGB-Kraftwerkstechnik, 1994. - VGB-TB 704

/82/ Schubert, P. ; Heer, B.: Umweltverträgliche Verwertung von Mauerwerk-Baureststoffen : Environmentally Compatible Recycling of Waste Masonry Materials. Aachen : Institut für Bauforschung, 1997. - Forschungsbericht Nr. F. 497

Verwendete Normen:

- /83/ DIN 38412: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) –
- Teil 8 1991-03. Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Bakterien (Pseudomonas-Zellvermehrungs-Hemmtest) (L 8) – zurückgezogen: Febr. 1996, ersetzt durch DIN EN ISO 10712 (Febr. 1996)
 - Teil 9 1989-05. Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Grünalgen (Scenedesmus-Zellvermehrungs-Hemmtest) (L 9) – zurückgezogen: April 1993, ersetzt durch DIN EN 28692 (April 1993), entspricht ISO 8692 (Nov. 1987)
 - Teil 11 1982-10. Bestimmung der Wirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Kleinkrebse (Daphnien-Kurzzeittest) (L 11)
 - Teil 15 1982-06. Bestimmung der Wirkung von Wasserinhaltsstoffen auf Fische, Fischtest (L 15)
 - Teil 20 1980-12. Bestimmung der Giftwirkung von Abwässern auf Fische, Fischtest (L 20)
 - Teil 30 1989-03. Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Daphnien über Verdünnungsstufen (L 30)
 - Teil 31 1989-03. Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser gegenüber Fischen über Verdünnungsstufen (L 31)
- /84/ DIN 4030: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase –
- Teil 1 1991-06. Grundlagen und Grenzwerte
- /85/ DIN EN 197: Zement -
- Teil 1 2001-02. Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzementen.
- /86/ DIN EN 206: Beton –
- Teil 1 2001-07. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /87/ DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton –
- Teil 2 2001-07 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- /88/ DIN 4226: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel –
- Teil 1 2001-07. Normale und schwere Gesteinskörnungen

- Teil 2 2002-02. Leichte Gesteinskörnungen (Leichtzuschläge)
- Teil 100 2002-02. Rezyklierte Gesteinskörnungen
- /89/ DIN EN 450 1995-01. Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung.
- /90/ DIN EN 450 Entwurf 2001-06. Flugasche für Beton
Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /91/ DIN EN 13 263: Silikastaub für Beton -
Teil 1 2002-10 Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien
Teil 2 2002-10 Konformitätsbewertung
- /92/ DIN 51 043 1979-08. Trass; Anforderungen, Prüfung
- /93/ DIN EN 12 878 1999-09. Pigmente zum Einfärben von zement- und/oder kalkgebundenen Baustoffen – Anforderungen und Prüfung
- /94/ DIN 2614 1990-02. Zementmörtelauskleidungen für Gussrohre, Stahlrohre und Formstücke; Verfahren, Anforderungen, Prüfungen
- /95/ DIN 4301 1981-04. Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen
- /96/ DIN 4301 Entwurf 2000-05. Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen
- /97/ DIN 18200 2000-05. Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte - Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten
- /98/ DIN 55666 1995-04. Prüfung von Formaldehyd emittierenden Beschichtungen, Melaminschaumstoffen und Textilien - Bestimmung der Ausgleichskonzentration an Formaldehyd in einem kleinen Prüfraum
- /99/ DIN 38 414: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Schlamm und Sedimente (Gruppe S) –
Teil 4 1984-10. Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)

Tabelle A1: Positivliste mit Gesamtgehalten von umweltrelevanten Schwermetallen und Spurenelementen in Betonausgangsstoffen

Stoff	Gesamtgehalte in mg/kg																			Bewertung der Umweltschadlichkeit
	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Ga	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Ti	V	Zn		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Zemente																				
CEM I ⁹⁾	4 - 23	185 - 390	0,2 - 1,1	1 - 5	0,03 - 6	2,8 - 21	25 - 124	55 - 98	5 - 9	< 0,02 - 0,12		17 - 97	5 - 254	2 - 18		< 0,02 - 4,1	20 - 100	21 - 679	bei Übereinstimmung keine weiteren Nachweise erforderlich	
CEM II ⁹⁾	2 - 76	37 - 450	0,1 - 3	0,06 - 1	0,01 - 3	2 - 25	7 - 144	4 - 129	0,1 - 17	< 0,2		12 - 100	4 - 247			< 1	16 - 94	26 - 660		
CEM III/A-S ⁹⁾					0,01 - 1		8 - 88			< 0,05			4 - 99			0,02 - 0,6		32 - 330		
CEM III/B-S ⁹⁾					0,01 - 1		7 - 88			< 0,05			4 - 99			0,2 - 0,6		26 - 330		
CEM III/A-D																				
CEM III/A-P ⁹⁾					0,02 - 1		12 - 90			< 0,03			7 - 103			< 0,4		44 - 340		
CEM III/B-P ⁹⁾					0,03 - 1		16 - 90			< 0,04			10 - 98			< 0,4		55 - 316		
CEM III/A-Q ¹²⁾							227			< 0,02						< 0,02				
CEM III/B-Q																				
CEM III/A-V ⁹⁾	2-76				0,02 - 3		11 - 144			0,03 - 0,2		17 - 100	6 - 247			0,04 - 0,8		40 - 577		
CEM III/B-V ¹²⁾							137			< 0,02						0,4				
CEM III/A-W																				
CEM III/B-W																				
CEM III/A-T ⁹⁾					0,04 - 2		11 - 87			< 0,1			5 - 102			0,1 - 0,6		47 - 344		
CEM III/B-T ⁹⁾					0,1 - 2		12 - 80			0,01 - 0,11			6 - 93			0,2 - 1		65 - 329		
CEM III/A-L ⁹⁾	2-14		0,2-3		0,01 - 1		8 - 86			< 0,02			4 - 100				16 - 94	32 - 660		
CEM III/B-L																				
CEM III/A-LL																				
CEM III/B-LL																				
CEM III/A-M																				
CEM III/B-M																				
CEM III ¹¹⁾	0,8 - 2				< 0,1 - 1	< 0,2 - 2	20 - 80	5 - 17		< 0,1		4 - 25	< 1 - 18			< 0,5		5 - 80		
CEM III/A ⁹⁾					0,01 - 1		4 - 86			< 0,1			2 - 71			0,04 - 0,7		15 - 231		
CEM III/B ⁹⁾					0,01 - 1		3 - 83			< 0,2			2 - 42			0,1 - 0,8		9 - 132		
CEM III/C																				
CEM IV																				
CEM IV/A																				
CEM IV/B																				
CEM V																				
CEM V/A																				
CEM V/B																				
Spannbreiten für alle o. g. Zemente ⁹⁾	< 1 - 53		< 0,02 - 2,5		< 0,1 - 8	1 - 28	12 - 105	2 - 282		< 0,02 - 0,34		6 - 80	0 - 203	< 1 - 35	< 1 - 2,6	< 0,5 - 2	15 - 200	15 - 450		
Mittelwerte ¹⁰⁾	6,8		0,7		0,4	10	40	25		0,07		24	27	6			56	140		
Zem. Bestandteile																				
Hütensand ¹¹⁾					0,01 - 70		1 - 143			< 0,005 - 0,2		1 - 10	1 - 10			0,1 - 1		1 - 60		
gebr. Ölschiefer ¹¹⁾					0,5 - 3		20 - 40			0,05 - 0,3			10 - 50			1 - 3		160 - 250		
Naturgips ^{9), 7)}	< 5 / 7	16 / 93	< 0,01 - 0,9	< 5 / 11	0,03 - 0,6	< 7 / 8	0,65 - 33	< 10 / 32	< 5 / < 5	< 0,005 - 0,08		0,3 - 13,5	0,46 - 21,4	5 / 17	< 0,46	< 0,05 - 0,2	0,93 - 27	1 - 61		
REA-Gips ⁷⁾	0,21 - 2,7		0,03 - 0,65		0,003 - 0,29	0,04 - 2,2	1 - 9,7	1,1 - 8,6		0,03 - 1,3		0,3 - 12,9	0,27 - 22		0,7 - 15,7	< 0,05 - 0,4	1,2 - 7,7	1,7 - 53,2		
Gesteinskörnung normal																				
Quarzk. Gestein ^{6), 11)}	5 / 42	214 / 1264		< 5 / 7	0,01 - 1	7 / 37	28 / 229	< 10 / 85	5 / 22	0,008 - 0,1	< 5 / 5	< 7 / 73	< 10 / 70	6 / 12		< 0,1 - 1	18 / 105	11 / 112		
Kalkstein ^{9), 11)}	< 5 / 28	52 / 783	< 0,01 - 12	5 / 13	0,04 - 0,5	< 7 / 28	7 / 35	13 / 87	< 5 / 7	0,005 - 0,1	< 5 / 9	< 7 / 21	< 10 / 186	10 / 27		0,06 - 1,8	5 - 80 ¹⁾	13 / 218 ¹⁾		
Granit ⁵⁾	5 / 49	361 / 1415				7 / 25	8 / 136	< 10 / 46	19 / 27		< 5 / < 5	< 7 / 48	18 / 53	8 / 13			15 / 102	55 / 122		
Basalt, Diabas, Gabbro ⁹⁾	< 5 / 25	600 / 1359			0,14 - 0,6 ⁸⁾	35 / 63	215 / 654	44 / 97	20 / 27	0,09 - 0,1 ³⁾	< 5 / 10	91 / 362	< 10 / 69			0,36	200 / 366	102 / 293		
Grauwacke ⁵⁾	9 / 41	364 / 743				16 / 30	58 / 102	17 / 78	16 / 25			< 7 / 42	41 / 228				79 / 113	61 / 146		
Schmelzkammergr. ¹¹⁾	7 - 41				< 0,5 - 1,9		134 - 159	135 - 160		< 0,1		104 - 117	82 - 156	< 0,1			229 - 278	148 - 447		
Hochofenschlacke ¹³⁾	0,2 - < 1	< 1791 - 8957 ¹⁴⁾			0,1 - < 1	2 - 8	24 - 40	9 - 10		< 0,1 - < 1	< 2	< 2	6 - 21	2		< 0,5 - < 1	50	70 - < 100		
Stahlwerksschlacke ¹³⁾	0,2 - < 1				0,1 - < 1	4 - 10	340 - 2550	16 - 50		0,1 - < 1	80	< 2 - 9	5 - 8	0,4		< 0,5 - 2	600	30 - 150		

Tabelle A1: Fortsetzung

Stoff	Gesamtgehalte in mg/kg																			Bewertung der Umweltauglichkeit
	As	Ba	Be	Br	Cd	Co	Cr	Cu	Ga	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Ti	V	Zn	Zr	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
schwer																				
Baryt		588412 ²⁾																		
Magnetit ¹⁾						Spuren	Spuren						Spuren	Spuren						
Hämatit																				
Ilmenit																				
Ferrophosphor																				
Ferrosilizium																				
Eisengranalien																				
Stahlsand																				
Limont		Spuren															Spuren			
normale Gesteins-																				
körnungen für																				
Strahlenschutzbeton																				
Serpentin ⁹⁾		18 / 82					1163 / 1669	81 / 180	8 / 11			965 / 1180					91 / 119	98 / 131		
Colemanit																				
Borcalit																				
Borfit																				
Borkarbit																				
leicht																				
Naturbims ^{6), 11)}	7 / 14				0,4 / 1,3	7	70 / 220	11 / 26		0,03 / 0,15		32 / 44	33 / 59							
Tuff ⁵⁾	9 / 84	268 / 1103		< 5 / 14		16 / 80	65 / 745	22 / 140	18 / 42		< 5 / 12	34 / 648	8 / 237				124 / 355	110 / 170	90 / 451	
Lavaschlacke																				
Sinterbims																				
Kesselsand																				
Ziegelepitt ¹⁵⁾	< 5 - 26	133 - 1734		< 2 - < 20	< 2 - < 10	32 - 64	< 10 - 198	< 2 - 65	1 - 24	< 0,5	< 10	4 - 68	7 - 147	1 - < 10		< 0,5			13 - 206	
Blähton bzw. Ton ^{6), 11)}	15 / 78	312 / 815	2 - 18		< 0,02 - 500	20 / 43	105 / 217 ¹⁾	29 / 284	23 / 35	0,02 - 0,5	< 5 / 26	43 / 119	27 / 124 ¹⁾	7 / 13		0,2 - 0,9	128 / 295 ¹⁾	78 / 304 ¹⁾		
Blähschiefer																				
Blähglas																				
Blähperlit																				
Blähkimmer bzw. Glimmerschiefer ⁹⁾	8 / 22				< 0,3 / 0,5		84	37 / 51		0,05 / 0,05		40 / 58	45 / 93						150 / 300	
Schaumsand, Schaumkies																				
Rezykl. Zuschlag ¹⁶⁾	5 - 14	355 - 445		< 5	< 2	33 - 72	36 - 67	10 - 44	6 - 7	< 0,005 - 0,2		13 - 30	34 - 265	< 5		0,05 - 0,11			73 - 155	
Zusatzstoffe																				
SFA ¹⁷⁾	0,6 - 365	612 - 2249	5 - 18	1 - 4	0,2 - 14,4	36 - 250	21 - 374	38 - 650	2 - 84	< 0,1 - 2,4		15 - 600	11 - 1040	< 0,5 - 90	1 - 35	0,6 - 15	230 - 500	47 - 1483		
Stikkaustaub / Mikrosilika ⁴⁾	< 10	3,83	< 10		< 2	< 2	< 2	5,58		0,043	< 5	< 2	5,93	< 10	< 10	< 10	< 2		18,6	
Trass					0,1 - 1		40 - 90			< 0,01 - 0,1			30 - 70			0,1 - 1			110 - 190	
Farbpigment																				
	Angabe von Schwermetallgehalten ist nicht sinnvoll, da sie z. T. Bestandteil der farbgebenden Verbindung (hohe Gehalte) sind, aber oxidisch gebunden vorliegen und daher nicht löslich sind.																			
Zusatzmittel	Hauptsächlich organische Verbindungen mit vernachlässigbaren Gehalten an Schwermetallen und Spurenelementen																			
Zugabewasser	vernachlässigbare Gehalte an Schwermetallen und Spurenelementen																			
Restwasser																				
	kein Nachweis erforderlich																			

- 1) in /40/ und /71/ werden für Ton und Kalkstein z. T. deutlich höhere Werte angegeben (Ton: max. 1500 mg/kg Cu, 481 mg/kg Pb, 3600 mg/kg V und 1300 mg/kg Zn, Kalkstein: 3000 mg/kg V und 1900 mg/kg Zn).
 In solchen Fällen ist die Umweltverträglichkeit ggf. zu überprüfen.
 2) theoretischer Gehalt bei reinem BaSO₄.
 3) 90 % Perzentilwert
 4) bestimmt nach NS 4770, säurelösliche Anteile, keine Angaben zum Probenumfang
 5) bei Recyclinzuschlag nach DAStb-Richtlinie sind ggf. zusätzlich die Gehalte an eluierbaren organischen Stoffen zu prüfen

- Angaben zum Probenumfang:
 6) Angabe in 50 % / 97,5 % Perzentilwert, 6827 Datensätze für Locker- und Festgesteine /79/
 7) repräsentative Proben aus 12 Naturgips-Lagerstätten, 12 Steinkohle- und 3 Braunkohlekraftwerken /10/, ergänzt um Werte aus /40/ ohne Angaben
 8) insgesamt 198 Proben verschiedener Zementwerke /7, 14, 40, 74/
 9) berechnet /7/
 10) Messungen an über 400 deutschen Normzementen, 1998 /20/

- 11) keine Angaben /5, 7, 40, 71 bzw. 74/
 12) 1 Probe /22/
 13) 1 Probe /76/ ergänzt um Werte aus /71/ ohne Angaben
 14) 14 Schlacken (basisch und sauer) /78/
 15) 22 Proben verschiedener Mauerziegel (HIZ, MZ, HFZ, FZ, KS, Pb, LB) /70, 82/
 16) 5 Proben /80/
 17) 25 Proben aus verschiedenen Anlagen /3, 14, 81/, ergänzt um Werte aus /74/ und /71/ ohne Angaben

Tabelle A2: Zemente nach DIN EN 197-1

Hauptbestandteile	Bezeichnung der 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung: (Massenanteile in Prozent) ¹⁾											
			Hauptbestandteile											Nebenbestandteile
			Portlandzementklinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolane		Flugasche		gebrannter Schiefer	Kalkstein			
						natürlich	nat.ge-temp. ²⁾	kiesel-säurereich	kalkreich		L	LL		
K	S	D ³⁾	P	Q	V	W	T	L	LL					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
CEM I	Portlandzement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandpuzzolan-zement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandflugasche-zement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandschiefer-zement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5

Tabelle A2: Fortsetzung (1)

Hauptbestandteile	Bezeichnung der 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung: (Massenanteile in Prozent) ¹⁾											
			Hauptbestandteile										Nebenbestandteile	
			Portlandzementklinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolane		Flugasche		gebrannter Schiefer	Kalkstein			
						natürlich	nat.ge-temp. ²⁾	kiesel-säurereich	kalkreich					
K	S	D ³⁾	P	Q	V	W	T	L	LL					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
CEM II	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portlandkompositzement ^c	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzzolan-zement ⁴⁾	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Kompositzement ⁴⁾	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	-	0-5

Tabelle A2: Fortsetzung (2)

Hauptbestandteile	Bezeichnung 27 Produkte (Normalzementarten)		Zusammensetzung: (Massenanteile in Prozent) ¹⁾										
			Hauptbestandteile										Nebenbestandteile
			Portlandzementklinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolane		Flugasche		gebrannter Schiefer	Kalkstein		
						natürlich	nat.ge-temp. ²⁾	kiesel-säurereich	kalkreich				
K	S	D ³⁾	P	Q	V	W	T	L	LL				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
CEM V	Kompositzement ⁴⁾	CEM V/B	20-38	31-50	-			31-50	-	-	-	-	0-5

1): Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile

2): natürlich getempert

3): Der Anteil an Slikastaub ist auf 10% begrenzt

4): In den Portlandkompositzementen CEM II/A-M und CEM II/B-M, in den Puzzolanzementen CEM IV/A und CEM IV/B und in den Kompositzementen CEM V/A und CEM V/B müssen die Hauptbestandteile außer Portlandzementklinker durch die Bezeichnung des Zementes angegeben werden (Beispiel: siehe Abschnitt 8).

Tabelle A3: Chemische Zusammensetzung von Portlandzementklinker, Portlandhüttenzement, Portlandpuzzolanzement und Hochofenzement (Hauptbestandteile), /5, 13/

Stoff	Einheit	Portland- zementklinker	Portland- hüttenzement	Portlandpuzzo- lanzement	Hochofen- zement
1	2	3	4	5	6
CaO	M.-%	61,4 – 69	52 – 66	42 – 58	43 – 64
SiO ₂		19 – 24	19 – 26	27 – 34	21 – 32
Al ₂ O ₃		3 – 9	4 – 10	6 – 11 ¹⁾	6 – 14 ¹⁾
Fe ₂ O ₃		1 – 5	1 – 4	3,0 – 4,3	1 – 4
MgO		< 1 – 4,2	0,5 – 5	1 – 5	1 – 9,5
K ₂ O		k. A.	0,3 – 1,7	0,6 – 1,6	0,3 – 1,6
Na ₂ O		k. A.	0,1 – 0,6	0,1 – 0,4	0,1 – 0,9
SO ₃		0,7 – 3	1 – 4	2,0 – 3,5	1 – 4,5

1) Al₂O₃ und TiO₂

Tabelle A4: Chemische Zusammensetzung von Trass (Hauptbestandteile), /13/

Stoff	Einheit	Gehalt
1	2	3
SiO ₂	M.-%	50 – 70
Al ₂ O ₃		14 – 20
Na ₂ O		0,2 – 5
K ₂ O		2 – 6
Fe ₂ O ₃		2 – 5
CaO		2 – 10
MgO		< 5

Tabelle A5: Chemische Zusammensetzung von Mikrosilika /32/

Stoff	Einheit	Gehalt
1	2	3
SiO ₂	M.-%	85 – 95
Fe ₂ O ₃		max. 3,0
Al ₂ O ₃		max. 1,5
CaO		max. 0,7
MgO		max. 2,0
Na ₂ O		max. 1,0
K ₂ O		max. 3,0
C		max. 4,0

Tabelle A6: Zusammensetzung natürlicher Gesteine, zusammengestellt aus /26, 50, 51, 56, 57/.

Gestein	Hauptbestandteile	chem. Formel ³⁾	Begleitminerale
1	2	3	4
Andesit	Na-reicher Plagioklas Pyroxen (Kettensilikate) Quarz (53 - 63 %)	s. bei Plagioklas <i>ABSi₂O₆</i> SiO ₂	Biotit, Eisenoxide
Baryt ^s	Baryt (85 % und mehr)	BaSO ₄	-
Basalt	Plagioklas Pyroxene Quarz (≤ 53 %)	s. bei Plagioklas <i>ABSi₂O₆</i> SiO ₂	Olivin, Pyroxen, Amphibole, Feldspatvertreter und Biotit
Borcalzit ¹⁾	Bor-III-oxid (40 - 45 %) Calciumoxid (25 - 35 %)	B ₂ O ₃ + CaO + H ₂ O	-
Borkarbid ¹⁾	Borkarbid (98 – 100 %) ²⁾	B ₄ C	-
Borfritte ¹⁾	Borfritte	B ₂ O ₃ + SiO ₂ + Na ₂ O	-
Colemanit	Colemanit	2CaO · 3 B ₂ O ₃ · 5 H ₂ O	-
Dazite	Quarz (63 – 68 %) Pyroxene	SiO ₂ <i>ABSi₂O₆</i>	Plagioklas, Hornblende, Amphibole, Eisenoxide

Tabelle A6: Fortsetzung

Gestein	Hauptbestandteile	chem. Formel ³⁾	Begleitminerale
1	2	3	4
Diabas	Plagioklas, teilweise umgewandelt zu Epidot Calzit	s. bei Plagioklas $\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})\text{Al}_2[\text{O/OH/SiO}_4/\text{Si}_2\text{O}_7]$ CaCO_3	-
	Pyroxene, teilweise umgewandelt zu Chlorit und Hornblende	ABSi_2O_6 komplexer Aufbau mit Mg, Al, Fe und Si $\text{Ca}_2(\text{Na,K})_{0,5-1}(\text{Mg,Fe})_{3-4}(\text{Fe,Al})_{2-1}[(\text{O,OH,F})_2/\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}]$	
Gabbro	Plagioklas (40 – 70 %) Pyroxen (15 – 45 %)	s. bei Plagioklas ABSi_2O_6	Olivin, Magnetit, Ilmenit, Magnetkies
Glimmer	Biotit Muskovit	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[(\text{OH,F})_2/\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ $\text{KAl}_2[(\text{OH,F})_2/\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	Quarz Feldspat u. a.
Glimmerschiefer	Glimmer (vor allem Muskovit) (> 50 %) Feldspat (< 20 %) Quarz	s. bei Glimmer Plagioklas, und K- und Ba-haltige Feldspäte	Granat, Stauolith, Disthen
Granit	Feldspat (30 – 65 %) Quarz (15 – 40 %) Glimmer, Biotit ($\leq 10\%$)	K-Na-Feldspat SiO_2 s. bei Glimmer	Amphibol, Pyroxen
Grauwacke (Art von Sandstein)	Quarz Feldspat Tonminerale	SiO_2 Plagioklas, und K- und Ba-haltige Feldspäte s. bei Ton	Glimmer, Chlorit
Hämatit ^S	Hämatit (65 - 68 %)	Fe_2O_3	-
Ilmenit ^S	Ilmenit	FeTiO_3	-
Kalkstein	Calcit ($\geq 80\%$) oder Dolomit	CaCO_3 $(\text{Ca, Mg})\text{CO}_3$	Pyrit, Markasit
Limonit ^S	Limonit	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ (Kristallwasser 10 – 12 %)	-
Magnetit ^S	Magnetit (65 - 70 %)	Fe_3O_4	-

Tabelle A6: Fortsetzung

Gestein	Hauptbestandteile	chem. Formel ³⁾	Begleitminerale
1	2	3	4
Plagioklas (Natrium- Calcium- Feldspäte)	Albit Oligoklas Andesin Labradorit Bytownit Anorit	Na (AlSi ₃ O ₈) (Na,Ca) [(Al,Si) ₄ O ₈] (Na,Ca) [(Al,Si) ₄ O ₈] (Ca,Na) [(Al,Si) ₄ O ₈] (Ca,Na) [(Al,Si) ₄ O ₈] Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	-
Rhyolit (Quarz- porphyr)	Quarz (> 68 %) Feldspat Biotit	SiO ₂ Plagioklas, und K- und Ba- haltige Feldspäte s. bei Glimmer	Quarz
Serpentin	Serpentin	Mg ₆ [(OH) ₆ Si ₄ O ₁₁] · H ₂ O Kristallwasser (11 – 13 %)	-
Ton	Kaolinit Montmorillonit Illit u.a.	Al ₂ (OH) ₄ [Si ₂ O ₅] Al ₂ [(OH) ₂ Si ₄ O ₁₀] · n H ₂ O KAl ₂ [(OH) ₂ AlSi ₃ O ₁₀]	Quarz, Feldspat, Glimmer,
Ton- schiefer	Tonminerale Quarz	s. bei Ton SiO ₂	Chlorit, Hämatit
Quarz	Quarz	SiO ₂	-

s: Schwerzuschlag

1) Industrieprodukt

2) entspricht einem Borgehalt von 77 bis 79 %

 3) A: Ca und Na, seltener Li, Mg, Fe²⁺

 B: Mg, Fe²⁺, Fe³⁺, Al, seltener Ti, V, Cr

Tabelle A7: Geringfügigkeitsschwellen zur Bewertung von Bauprodukten nach DIBt-Merkblatt /11/

	Schadstoff	Einheit	Gerinfügigkeitsschwelle
1	2	3	4
Anorganische Parameter	Antimon (Sb)	µg/l	10
	Arsen (As)		10
	Blei (Pb)		25
	Cadmium (Cd)		5
	Chrom, gesamt (Cr)		50
	Chromat (Cr)		8
	Kobalt (Co)		50
	Kupfer (Cu)		50
	Molybdän (Mo)		50
	Nickel (Ni)		50
	Quecksilber (Hg)		1
	Selen (Se)		10
	Zink (Zn)		500
	Zinn (Sn)		40
	Cyanid, gesamt (CN ⁻)		50
	Cyanid, leicht freisetzbar (CN ⁻)		10
Fluorid (F ⁻)	750		
Organische Parameter	PAK, gesamt ¹⁾	0,2	
	- Naphthalin	2	
	LHKW, gesamt ²⁾	10	
	Aldrin	0,1	
	DDT	0,1	
	PCB, gesamt ³⁾	0,05	
	Mineralölkohlenwasserstoffe ⁴⁾	200	
	BTEX ⁵⁾	20	
- Benzol als Einzelstoff	1		
Phenole	20		

- 1) PAK, gesamt: Summe aller polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ohne Naphthalin und Methylnaphthalin
- 2) LHKW, gesamt: Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe, d. h. Summe der halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe
- 3) PCB, gesamt: Summe der polychlorierten Biphenyle
- 4) n-Alkane (C10 ... C39), Isoalkane Cycloalkane und aromatische Kohlenwasserstoffe
- 5) BTEX-Aromaten, gesamt: Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Toluol, Xylole, Ethylbenzol, Styrol, Cumol)

Tabelle A8: Toxikologische Daten, WGK und MAK-Werte der im Gasraum von zementgebundenen Stoffen mit Betonzusatzmitteln bzw. organischen Betonzusatzstoffen gefundenen Stoffe /58 bis 67/.

Schadstoff	Toxikologische Daten					WGK	MAK-Wert
	Säugetier-toxizität ¹⁾ , LD ₅₀	Fisch-toxizität ²⁾ , LC ₅₀	Daphnien-toxizität ³⁾ , EC ₅₀	Algen-toxizität ⁴⁾ , EC ₅₀	Bakterien-toxizität ⁵⁾ , EC ₅₀		
	mg/kg	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		
1	2	3	4	5	6	7	8
2-Propanol	> 2000	100 - 1000 ^{2a)}	> 1000	> 1000	> 1000	1	500
Aceton	5800	5540 - 8120 ^{2b)}	k. A.	k. A.	k. A.	1	1200
n-Hexan	28700	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	1	180
Benzol	> 3000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	3	3,2
Ethylbenzol	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	1	440
1-Butanol	790	> 1200 ^{2a)}	1983 ^{3a)}	> 500 ^{4a)}	4400	1	300
Toluol	> 2000	1 - 10	10 - 100	10 - 1000	10 - 1000	2	190
o,m,p-Xylol	4300	> 308 ^{2a)}	165	k. A.	k. A.	2	440
Styrol	5000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	2	85
Naphthalin	1780	10 ^{2a)}	1 ^{3b)}	33 ^{4b)}	k. A.	2	50
Formaldehyd	800	> 10	42	k. A.	k. A.	2	0,6

1) getestet an Ratten, in mg/kg Körpergewicht

2) getestet an a) Goldorfen, b) Regenbogenforellen und Dickkopfelritzen über 96 h

3) getestet an Wasserflöhen über a) 48 h, b) 96 h

4) getestet an Grünalgen über a) 48 h, b) 24 h

5) getestet an Pseudomonas putida über 17 h

k. A.: keine Angaben

Tabelle A9: Toxikologische Eigenschaften und Kennzeichnung der im Gasraum von zementgebundenen Baustoffen mit Betonzusatzmitteln /-stoffen gefundenen Schadstoffe /58 bis 69/.

Schadstoff	Gefahrensymbol ¹⁾	toxikologische Eigenschaften
1	2	3
2-Propanol	F, Xi	Verursacht Kopfschmerzen, Schwindelgefühl, Übelkeit; bei hohen Dampfkonzentrationen Bewusstlosigkeit. Reizwirkung auf Haut, Augen und Atmungsorgane
Aceton	F, Xi	Flüssigkeit kann auf der Haut Entzündungen hervorrufen. Dämpfe reizen die Bronchien, verursachen Kopfschmerzen und Müdigkeit. In höheren Konzentrationen narkotisierend.
n-Hexan	F, Xn, N	Gefahr ernster Gesundheitsschäden bei längerer Exposition durch Einatmen. Wirkt degenerierend auf das periphere Nervensystem. Längere Exposition (2 bis 6 Monate) führt zu Muskelschwäche und Empfindungslosigkeit der Beine bis zur neurogenen Muskelatrophie führen.
Benzol	F, T	Benzoldämpfe sind sehr toxisch; als Symptome treten Schwindel, Erbrechen und Bewusstlosigkeit auf; bei 2 V.-% in der Atemluft tritt Tod nach 5-10 Minuten ein. Flüssigkeit kann auch über die Haut aufgenommen werden und verursacht schwere Vergiftungen. Chronische Vergiftungen: Schädigung des Knochenmarks, der Leber und der Nieren. Benzol kann Leukämie hervorrufen und gilt als stark krebserzeugender Stoff.
Ethylbenzol	F, Xn	Dämpfe und Flüssigkeit können Schwindel, Kopfschmerzen, Benommenheit bis zur Bewusstlosigkeit, Atemlähmung und Herz-Kreislaufstillstand verursachen. Hirnfunktionsstörungen sind möglich. Reizung der Augen und der Haut. Gefahr der Hautresorption
1-Butanol	Xn	Gesundheitsschädlich beim Verschlucken; Gefahr ernster Augenschäden. Dämpfe reizen Haut und Atmungsorgane und können Benommenheit verursachen.
Toluol	F, Xn	Dämpfe wirken narkotisierend, verursachen Kopfschmerzen Schwindelgefühl, Übelkeit und Bewusstlosigkeit; reizen Augen und Atemwege. Flüssigkeit kann auch über Haut in den Blutkreislauf kommen. Fruchtschädigung bei Schwangerschaften ist wahrscheinlich.

Tabelle A9: Fortsetzung

Schadstoff	Gefahrensymbol ¹⁾	toxikologische Eigenschaften
1	2	3
o,m,p-Xylol	F, Xn	Xylol kann über Atemwege / Haut aufgenommen werden. Es wirkt stark narkotisch. Luftkonzentrationen $\geq 200 \text{ ml/m}^3$ erzeugen Schleimhautreizungen, Erbrechen und Schwindel. Tödliche Dosis: 15 ml oral. Chronische Aufnahme bedingt krebserzeugend.
Styrol	Xn	Reizwirkung auf Haut und Augen, neurotoxisch, Leber- und Nierenschädigung möglich. Gesundheitsschädlich beim Einatmen
Naphthalin	Xn, N	Dämpfe reizen Augen und Atemwege (Atemlähmung möglich). Flüssigkeit kann auch über Haut in den Blutkreislauf kommen (Hautresorption), starke Hautreizungen. Aufnahme kann Magen-Darm-Störungen, Krämpfe, Blutbildveränderungen verursachen.
Formaldehyd	T	Dämpfe reizen Augen und Schleimhäute. Verschlucken führt zu schweren Verätzungen der Speiseröhre und des Magen-Darmtrakts; Erbrechen, Bewusstlosigkeit, Kollaps. lebensgefährliche Dosis: 60 ml 35%ige Formaldehydlösung. Verdacht auf Auslösung von Allergien und auch Krebs

- 1) F: leicht entzündlich
 N: umweltgefährlich
 Xn: gesundheitsschädlich
 Xi: reizend
 T: giftig

Bauforschung für die Praxis

- Brandschutzkosten im Wohnungsbau**
Karl Deters
Band 59, 2001, 245 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4258-0
€ 50,- | sFr 86,-
- Gemeinschaftliches Wohnen im Alter**
R. Weeber, G. Wölfle, V. Rösner
Band 58, 2001, 175 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4257-2
€ 46,- | sFr 79,-
- Entwicklung eines Bewertungssystems für
ökonomisches und ökologisches Bauen
und gesundes Wohnen**
C.J. Diederichs, P. Getto, S. Streck
Band 57, 2002, 230 S., mit CD-ROM, Abb.,
Tab., kart., ISBN 3-8167-4256-4
€ 50,- | sFr 86,-
- Vergabeverfahren und Baukosten**
Hannes Weeber, Simone Bosch
Band 56, 2001, 192 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4255-6
€ 50,- | sFr 86,-
- Konzepte für die praxisorientierte Instand-
haltungsplanung im Wohnungsbau**
Ralf Spilker, Rainer Oswald
Band 55, 2000, 71 S., 5 Abb., zahlr. Tab.,
kart., ISBN 3-8167-4254-8
€ 22,- | sFr 39,50
- Bewährung innen wärmedämmter
Fachwerkbauten**
Problemstellung und daraus abgeleitete Kon-
struktionsempfehlungen
Reinhard Lamers, Daniel Rosenzweig, Ruth Abel
Band 54, 2000, 173 S., 123 Abb., kart.,
ISBN 3-8167-4253-X
€ 25,- | sFr 44,-
- Überprüfbarkeit und Nachbesserbarkeit
von Bauteilen - untersucht am Beispiel der
genutzten Flachdächer**
Rainer Oswald, Ralf Spilker, Klaus Wilmes
Band 53, 1999, 133 S., 49 Abb., 4 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4252-1
€ 37,- | sFr 63,-
- Bauschadensfibel für den privaten
Bauherrn und Hauskäufer**
Rainer Oswald, Ruth Abel, Volker Schnapauff
Band 52, 1999, 140 S., 19 Abb., 3 Tab., fester
Einband, ISBN 3-8167-4251-3
€ 25,- | sFr 44,-
- Balkone, kostengünstig und
funktionsgerecht**
Hannes Weeber, Margit Lindner
Band 51, 1999, 146 S., 102 Abb., 26 Tab.,
kart., ISBN 3-8167-4250-5
€ 38,- | sFr 65,-
- Kostenfaktor Erschließungsanlagen**
Hannes Weeber, Michael Rees
Band 50, 1999, 226 S., 107 Abb., 15 Tab.,
kart., ISBN 3-8167-4249-1
€ 50,- | sFr 86,-
- Eigenleistung beim Bauen**
Wie Eigentümer und Mieter sich am Bau ihrer
Wohnung beteiligen können
R. Weeber, H. Weeber, S. Kleebaur, H. Gerth,
W. Pohrt
Band 49, 1999, 154 S., 25 Abb., 12 Tab.,
ISBN 3-8167-4248-3
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosteneinsparung durch Bauzeit-
verkürzung**
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann
Band 48, 1999, 174 S., 38 Abb., 36 Tab.,
ISBN 3-8167-4247-5
€ 37,- | sFr 64,-
- Das wärme- und feuchteschutztechnische
Verhalten von stählernen Fassadendurch-
dringungen**
Lutz Franke, Gernod Deckelmann
Band 47, 1998, 74 S., 38 Abb., 13 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4246-7
€ 15,- | sFr 26,-
- Kostengünstige bauliche Maßnahmen zur
Reduzierung des Energieverbrauchs im
Wohnungsbestand**
R. Oswald, R. Lamers, V. Schnapauff,
R. Spilker, K. Wilmes
Band 46, 1998, 100 S., 57 Abb., kart.
ISBN 3-8167-4245-9
€ 17,- | sFr 30,50
- Sicherung des baulichen Holzschutzes**
Horst Schulze
Band 45, 1998, 168 S., 136 Abb.,
10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4244-0
€ 22,- | sFr 39,50
- Luftdichtigkeit von industriell errichteten
Wohngebäuden in den neuen Bundes-
ländern**
Wolfgang Richter, Dirk Reichel
Band 44, 1998, 88 S., 34 Abb., 15 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4243-2
€ 15,- | sFr 26,-
- Leitfaden Kostendämpfung im
Geschoßwohnungsbau**
Karl Deters, Joachim Arlt
Band 43, 1998, 162 S., 135 Abb.,
34 Tab., kart., ISBN 3-8167-4242-4
€ 22,- | sFr 39,50
- Langzeitbewährung und Entwick-
lungstendenzen von Kunststoff-Bau-
produkten im Wohnungsbau**
Dieter Arlt, Rainer Weltring
Band 42, 1998, 137 S., 90 Abb., 7 Graph.,
kart., ISBN 3-8167-4241-6
€ 20,- | sFr 35,-
- Ausschreibungshilfen für recycling-
gerechte Wohnbauten**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 41, 1998, 172 S., 28 Abb., kart.
ISBN 3-8167-4240-8
€ 22,- | sFr 39,50
- Gebrauchsanweisung für Häuser**
Volker Schnapauff, Silke Richter-Engel
Band 40, 1997, 116 S., 4 Abb., 7 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4239-4
€ 19,- | sFr 34,-
- Ergänzender Neubau in bestehenden
Wohnsiedlungen**
H. Weeber, R. Weeber, M. Lindner, u. a.
Band 39, 1997, 194 S., 230 Abb., kart.,
ISBN 3-8167-4238-6
€ 25,- | sFr 44,-
- Lüftung in industriell errichteten
Wohnhäusern**
Wilfried Jank
Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Tab.,
13 Tafeln, kart., ISBN 3-8167-4236-X
€ 15,- | sFr 26,-
- Auswirkungen der neuen Wärmeschutz-
verordnung auf den Schallschutz von
Gebäuden**
Siegfried Koch, Werner Scholl
Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4235-1
€ 15,- | sFr 26,-
- Baukostensenkung durch gesicherte Scha-
densbeurteilung an aufwerksporigen
Leichtbetonelementen der industriell errich-
teten Wohnbauten der ehemaligen DDR**
Mirko Neumann, Mathias Reuschel
Band 35, 1997, 320 S., 227 Abb.,
105 Tab., kart., ISBN 3-8167-4234-3
€ 41,- | sFr 70,-
- Verhinderung von Emissionen aus
Baustoffen durch Beschichtungen**
Lutz Franke, Martin Wesselmann
Band 34, 1997, 68 S., 11 Abb., 9 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4233-5
€ 15,- | sFr 26,-
- Wärmedämmverbundsysteme
(WDVS) im Wohnungsbau**
Institut für Bauforschung e.V., Hannover
Band 32, 1997, 250 S., 128 Abb.,
20 Tab., kart., ISBN 3-8167-4231-9
€ 30,- | sFr 51,50

BESTELLSCHEIN

**Titel ankreuzen und im Umschlag oder
per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07
senden an:**

Fraunhofer IRB Verlag
 Fraunhofer-Informationszentrum
 Raum und Bau IRB
 Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
 Telefon (07 11) 970 - 25 00
 E-Mail: info@irb.fhg.de
 URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender

 Straße/PF
 PLZ/Ort
 Datum
 Unterschrift

02/2002 [BfP-alle|Titel-Anzeige.qxd]

- Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor**
Teil 1, Konstruktionsempfehlungen und optimierte Anschlußsituationen (Details)
W.-H. Pohl, S. Horschler, R. Pohl
Teil 2, Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken
Gerd Hauser, Horst Stiegel
Band 31, 1997, 294 S., 169 Abb., kart., ISBN 3-8167-4230-0
€ 14,- | sFr 25,-
- Fenster - Sanierung und Modernisierung**
Hans-Rudolf Neumann
Band 30, 1997, 134 S., 90 Abb., 11 Tab., kart., ISBN 3-8167-4229-7
€ 20,- | sFr 35,-
- Schäden an nicht industriell hergestellten Wohnbauten der neuen Bundesländer**
R. Oswald, R. Spilker, V. Schnapauff, u. a.
Band 29, 1996, 116 S., 66 Abb., 30 Tab., kart., ISBN 3-8167-4228-9
€ 17,- | sFr 30,50
- Parkierungsanlagen im verdichteten Wohnungsbau**
Hannes Weeber, Rotraut Weeber
Band 28, 1997, 156 S., 60 Abb., 28 Tab., kart., ISBN 3-8167-4227-0
€ 22,- | sFr 39,50
- Möglichkeiten der Einsparung von Wohnkosten durch Mieterbeteiligung**
M. Elff, K. Goldt, B. Harms, u. a.
Band 27, 1997, 157 S., 3 Abb., 8 Tab., kart., ISBN 3-8167-4226-2
€ 22,- | sFr 39,50
- Die Berechnung von Flachdecken über Zustands- und Einflußflächen**
Max Baerschneider
Band 26, 1996, 380 S., 196 Tab., kart., zweibändig, ISBN 3-8167-4225-4
€ 49,- | sFr 83,50
- Feuchttransportvorgänge in Stein und Mauerwerk - Messung und Berechnung**
M. Krus, H.-M. Künzel, K. Kießl
Band 25, 1996, 75 S., 31 Abb., 2 Tab., kart., ISBN 3-8167-4224-6
€ 15,- | sFr 26,-
- Wohngebäudesanierung und Privatisierung**
Hannes Weeber, Michael Rees
Band 24, 1996, 107 S., 51 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4223-8
€ 20,- | sFr 35,-
- Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden**
Helmut Künzel
Band 23, 1996, 85 S., 32 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4222-X
€ 15,- | sFr 26,-
- Neue Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Wohngebäude**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 22, 1996, 110 S., 26 Abb., 3 Tab., kart., ISBN 3-8167-4221-1
€ 17,- | sFr 30,50
- Standisicherheit der Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**
E. Cziesielski, N. Fouad, F.-U. Vogdt
Band 21, 1996, 226 S., 71 Abb., kart., ISBN 3-8167-4220-3
€ 30,- | sFr 51,50
- Sicherheit von Glasfassaden**
X. Shen, H. Techen, J. D. Wörner
Band 20, 1996, 38 S., 26 Abb., 4 Tab., kart., ISBN 3-8167-4219-X
€ 12,- | sFr 21,50
- Kostengünstige Umnutzung aufgegebener militärischer Einrichtungen für Wohnzwecke, Wohnergängungseinrichtungen und andere Nutzungen**
B. Jacobs, J. Kirchhoff, J. Mezler
Band 19, 1996, 204 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4218-1
€ 28,- | sFr 47,50
- Holztafelbauweise im mehrgeschossigen Wohnungsbau**
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann
Band 18, 1996, 237 S., 116 Abb., 23 Tab., kart., ISBN 3-8167-4217-3
€ 30,- | sFr 51,50
- Gefährdungspotentiale asbesthaltiger Massenbaustoffe in den neuen Bundesländern**
Klaus Bergner, unter Mitarbeit von Franka Stodollik und Hans-Otto Eckler
Band 17, 1996, 75 S., 26 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4216-5
€ 15,- | sFr 26,-
- Transparent gedämmte Altbauten**
G. H. Bondzio, K. Brandstetter, P. Sulzer, S. Al Bosta, u. a.
Band 15, 1996, 130 S., 44 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4214-9
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosten und Techniken für das "Überwintern" erhaltenswerter Bausubstanz**
Michael Rees, Hannes Weeber
Band 14, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4213-0
€ 25,- | sFr 44,-
- Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung und Flächenkühlung**
Erhard Mayer (Hrsg.)
Band 13, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4212-2
€ 25,- | sFr 44,-
- Zusätzliche Wärmedämmsysteme bei Fertigteilbauten**
Typenserie P2
P. Bauer, B. Loeser, H. Schwarzgig, T. Spengler
Band 12, 1995, 118 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4211-4
€ 20,- | sFr 35,-
- Körperschalldämmung von Sanitärräumen**
Karl Gösele, Volker Engel
Band 11, 1995, 76 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4210-6
€ 15,- | sFr 26,-
- Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen**
Gertraud Hofmeister
Band 9, 1995, 210 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4208-4
€ 25,- | sFr 44,-
- Ökologische Auswirkungen von Hochhäusern**
Band 8, 1995, 418 S., 114 Abb., kart., ISBN 3-8167-4207-6
€ 50,- | sFr 86,-
- Wohnhochhäuser heute**
H. Weeber, R. Weeber, M. Hasenmaier, u. a.
Band 7, 1995, 165 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4206-8
€ 25,- | sFr 44,-
- Abfallvermeidung in der Bauproduktion**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 6, 1994, 198 S., 75 Abb., 16 Tab., kart., ISBN 3-8167-4205-X
€ 25,- | sFr 44,-
- Barrierefreie Erschließungssysteme von Wohngebäuden**
R. Weeber, M. Rees, H. Weeber
Band 5, 1994, 64 S., 52 Abb., 6 Tab., kart., ISBN 3-8167-4204-1
€ 12,- | sFr 21,50
- Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz**
Lutz Franke, Gernod Deckelmann
Band 4, 1994, 80 S., zahlreiche Abb. und Tab., kart., ISBN 3-8167-4203-3
€ 20,- | sFr 35,-
- Niveaugleiche Türschwellen bei Feuchträumen und Dachterrassen**
R. Oswald, A. Klein, K. Wilmes
Band 3, 1994, 56 S., 48 Abb., kart., ISBN 3-8167-4202-5
€ 12,- | sFr 21,50
- Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**
R. Oswald, V. Schnapauff, R. Lamers, u. a.
Band 2, 1995, 333 S., 515 Abb., kart., ISBN 3-8167-4201-7
€ 40,- | sFr 69,50
- Heizung und Lüftung im Niedrigenergiehaus**
Gerhard Hausladen, Peter Springl
Band 1, 1994, 214 S., 74 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4200-9
€ 25,- | sFr 44,-
- Informieren Sie mich bitte laufend über neue **Fachbücher**

BESTELLSCHEIN

■ **Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 2508 oder -2507 senden an:**

■ **Fraunhofer IRB Verlag**

■ Fraunhofer-Informationszentrum
■ Raum und Bau IRB

■ **Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart**

■ **Telefon (07 11) 970 - 2500**

■ **E-Mail: info@irb.fhg.de**

■ **URL: <http://www.IRBbuch.de>**

■ Absender

■

■

■ Straße/PF

■ PLZ/Ort

■ Datum

■ Unterschrift

Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann

- Schadenfreies Bauen**
Gesamtausgabe Bände 1 – 26
2002, alle Bände mit festem Einband
ISBN 3-8167-5796-0
€ 1037,- | sFr 1744,-
Bei Abnahme der Gesamtausgabe sparen Sie € 115,-
- Schäden an polymeren Beschichtungen**
Robert Engelfried
Band 26: 2001, 146 S., 94 Abb., 14 Tab.,
ISBN 3-8167-5795-2
€ 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten**
Günter Zimmermann
Band 25: 2001, 200 S., 175 Abb., 16 Tab.,
ISBN 3-8167-5791-X
€ 48,- | sFr 82,50
- Schäden an Installationsanlagen**
Heizungs- und Raumluftechnische Anlagen,
Trinkwasser-, Abwasser- und Gasinstallationsanlagen
Heinz Wirth, Stefan Wirth
Band 24: 2001, 270 S., 114 Abb., 33 Tab.,
ISBN 3-8167-5790-1
€ 57,- | sFr 96,-
- Schäden an Türen und Toren**
Ralf Schumacher
Band 23: 2001, 372 S., 291 Abb., 32 Tab.,
ISBN 3-8167-4169-X
€ 71,- | sFr 118,-
- Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen**
Hans-Joachim Scheewe
Band 22: 2001, 232 S., 80 überw. farb. Abb.,
50 Tab.,
ISBN 3-8167-4168-1
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Glasfassaden und -dächern**
Peter Küffner, Oliver Lummertzheim
Band 21: 2000, 132 S., 106 z.T. farb. Abb.,
6 Tab.,
ISBN 3-8167-4165-7
€ 40,- | sFr 68,50
- Schäden an Wärmedämm-Verbundsystemen**
Erich Cziesielski, Frank Ulrich Vogdt
Band 20: 2000, 202 S., 75 Konstruktionsskizzen,
28 Tab. u. Diagramme, 98 Fotos,
ISBN 3-8167-4164-9
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden aus Mehrschicht-Betonplatten**
Ralf Ruhnau, Nabil Fouad
Band 19: 1998, 104 S., 61 Abb.; 7 Tab.,
ISBN 3-8167-4160-6
€ 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken**
Hubert Satzger
Band 18: 1998, 78 S., 59 Abb., 5 Tab.,
ISBN 3-8167-4159-2
€ 23,- | sFr 40,50
- Schäden an Dränanlagen**
Wilfried Muth
Band 17: 1997, 114 S., 128 Abb., 10 Tab.,
ISBN 3-8167-4154-1
€ 35,- | sFr 60,50
- Tauwasserschäden**
Richard Jenisch
Band 16: 2. überarb. Aufl., 2001, 129 S.,
66 Abb., 6 Tab., ISBN 3-8167-5792-8
€ 37,- | sFr 62,50
- Schäden an Estrichen**
Klaus G. Aurnhammer
Band 15: 2., erg. Aufl., 1999, 216 S., 44 Abb.;
17 Tab.,
ISBN 3-8167-4162-2
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Tragwerken aus Stahlbeton**
Bernhard Brand, Gerhard Glatz
Band 14: 1996, 217 S., 129 Abb., 24 Tab.,
ISBN 3-8167-4153-3
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk**
Helmut Klaas, Erich Schulz
Band 13: 1995, 224 S., 162 Abb., 13 Tab.,
ISBN 3-8167-4152-5
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Metallfassaden und -dachdeckungen**
Franz Lubinski, Fritz Röbber, Uwe Nagel, u. a.
Band 12: 2. erw. Aufl., 2001, 415 S., 303
Abb., 22 Tab.,
ISBN 3-8167-4166-5
€ 76,- | sFr 127,-
- Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein**
Martin Sauder, Renate Schloenbach
Band 11: 1995, 274 S., 95 Abb., 31 Tab.,
ISBN 3-8167-4150-9
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwänden mit Asbestzement-, Faserzement- und Schieferplatten**
Klaus W. Liersch
Band 10: 1995, 146 S., 86 Abb., 20 Tab.,
ISBN 3-8167-4149-5
€ 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Fassadenputzen**
Helmut Künzel
Band 9: 2. erw. Aufl., 2000, 142 S., mit zahlr.
Abb. und Tab.,
ISBN 3-8167-4167-3
€ 38,- | sFr 65,-
- Schäden an Abdichtungen in Innenräumen**
Erich Cziesielski, Michael Bonk
Band 8: 1994, 112 S., 55 Abb., 4 Tab.,
ISBN 3-8167-4147-9
€ 33,- | sFr 57,-
- Rissschäden an Mauerwerk**
Ursachen erkennen - Rißschäden vermeiden.
Werner Pfefferkorn
Band 7: 3. überarb. Aufl., 2002, 292 S.,
290 Abb., 18 Tab.,
ISBN 3-8167-5793-6
€ 53,- | sFr 89,-
- Schäden an Fenstern**
Wolfgang Klein
Band 6: 1994, 154 S., 92 Abb., 2 Tab.,
ISBN 3-8167-4145-2
€ 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Wänden und Decken in Holzbauart**
Horst Schulze
Band 5: 1993, 158 S., 140 Abb.,
ISBN 3-8167-4144-4
€ 37,- | sFr 64,-
- Schäden an Industrieböden**
Erich Cziesielski, Thomas Schrepfer
Band 4: 2., erw. Aufl., 1999, 169 S., 69 Abb.,
33 Tab.,
ISBN 3-8167-4163-0
€ 46,- | sFr 78,-
- Schäden an Sichtbetonflächen**
Heinz Klopfer
Band 3: 1993, 123 S., 77 Abb., 9 Tab.,
ISBN 3-8167-4142-8
€ 35,- | sFr 60,50
- Schäden an Flachdächern und Wannenaus wasserundurchlässigem Beton**
Gottfried C.O. Lohmeyer
Band 2: 3. neu bearb. Aufl., 2001, 272 S.,
171 Abb., 28 Tab.,
ISBN 3-8167-5794-4
€ 50,- | sFr 86,-
- Schäden an Außenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau**
Ralf Ruhnau
Band 1: 1992, 132 S., 87 Abb.,
ISBN 3-8167-4140-1
€ 35,- | sFr 60,50

BESTELLSCHEIN

■ Titel ankreuzen und im Umschlag oder
 ■ per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07
 ■ senden an:

Fraunhofer IRB Verlag
 ■ Fraunhofer-Informationszentrum
 ■ Raum und Bau IRB
 ■ Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
 ■ Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
 ■ E-Mail: info@irb.fhg.de
 ■ URL: <http://www.IRBbuch.de>

■ Absender
 ■
 ■
 ■
 ■ Straße/PF
 ■ PLZ/Ort
 ■ Datum
 ■ Unterschrift

02/2002 [sFBalle Titel-AnzeigeA4.qxd

Die »Bauschäden-Sammlung« in 13 Bänden

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann



In der Fachwelt hat diese Zusammenstellung von typischen Bauschadensfällen als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Bau- und Planungsleistungen großes Ansehen erlangt.

Die 13 Bände mit dem Untertitel »Sachverhalt - Ursachen - Sanierung« enthalten Schadensberichte aus allen baukonstruktiven Bereichen und sind durch Themen- und Sachregister erschlossen.

Der Nutzer kann so auf Anhieb feststellen,

- ob ein gleicher oder ähnlicher Schaden bereits dokumentiert ist,
- welche Schäden für ein bestimmtes Bauteil typisch sind,
- wie diese Schäden vermieden werden können oder welche Maßnahmen zu ihrer Behebung in Frage kommen.

Seit 3 Jahrzehnten ist die »Bauschäden-Sammlung« eine ständige Rubrik des »Deutschen Architektenblattes«.

Bauschäden-Sammlung, Band 13 Sachverhalt - Ursachen - Sanierung

2001, 184 Seiten,
zahlreiche, überwiegend farbige
Abbildungen, fester Einband,
ISBN 3-8167-4185-1
€ 27,- | sFr 44,-

Der Herausgeber

Professor Günter Zimmermann, ein bekannter Bausachverständiger mit langjähriger Erfahrung, betreut seit 3 Jahrzehnten die »Bauschäden-Sammlung« im »Deutschen Architektenblatt« und ist auch für die Herausgabe der Buchausgabe verantwortlich.

BESTELLSCHEIN

- Band 1: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 2: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 3: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 4: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 5: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 6: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 7: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 8: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 9: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 10: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 11: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 12: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 13: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-

Sie sparen € 36,- bei Abnahme der

- Bände 1-13 komplett:
€ 315,- | sFr 476,-

Alle Bände im Format A 5 quer, mit zahlreichen, zum Teil farbigen Abbildungen, festem Einband und Fadenheftung

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
E-Mail: info@irb.fhg.de
URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender

Straße/PF

PLZ/Ort

Datum

Unterschrift

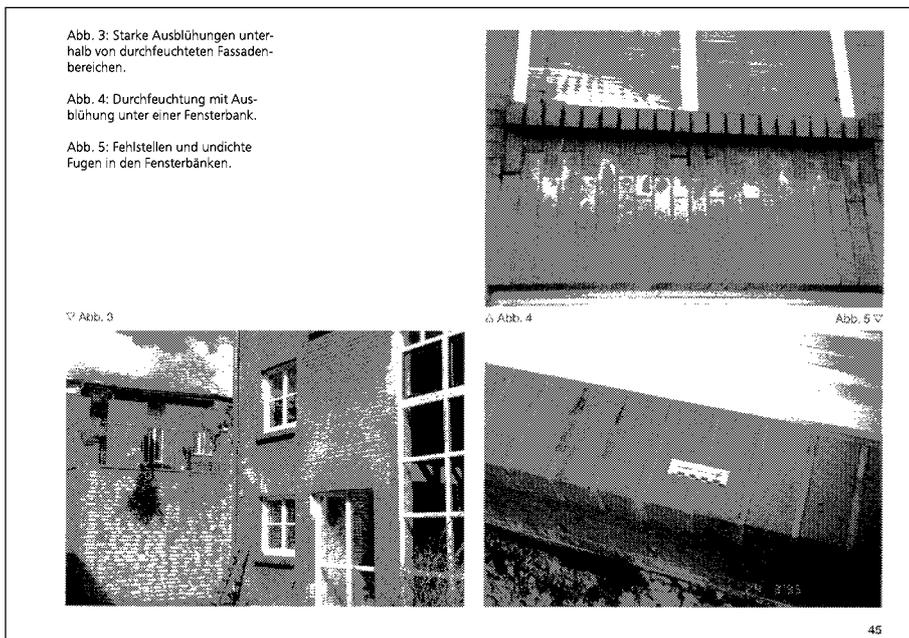


Abb. 3: Starke Ausblühungen unterhalb von durchfeuchteten Fassadenbereichen.

Abb. 4: Durchfeuchtung mit Ausblühung unter einer Fensterbank.

Abb. 5: Fehlstellen und undichte Fugen in den Fensterbänken.

Abb. 3

Abb. 4

Abb. 5