

AiF-Forschungsvorhaben Nr.: 15250 N
Bewilligungszeitraum: 01.07.2007 – 31.12.2009
Forschungsthema: **Einfluss von Betonzusatzmitteln auf das Auslaugverhalten von Spurenelementen aus Festbetonen**

1 Einleitung

Die Europäische Bauproduktenrichtlinie (CPD) fordert, dass die auf dem europäischen Binnenmarkt gehandelten Bauprodukte so beschaffen sind, dass die daraus hergestellten Bauwerke allen wesentlichen Anforderungen, zum Beispiel an Standfestigkeit, Feuersicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit, entsprechen. Neben diesen traditionell im Baurecht verankerten Anforderungen nimmt die CPD mit der „Wesentlichen Anforderung Nr. 3“ gezielt Bezug auf den Schutz von Hygiene, Gesundheit und Umwelt. Von harmonisierten europäischen technischen Spezifikationen (harmonisierte europäische Normen hENs oder europäische technische Zulassungen ETAs) wird gefordert, dass sie die für den Schutz der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerks notwendigen Festlegungen enthalten. Dies setzt allerdings voraus, dass in den entsprechenden Bauordnungen der Mitgliedsstaaten qualitative und – wenn notwendig – auch quantitative Anforderungen an Bauprodukte vorhanden sind.

Die Analyse der bestehenden Anforderungen in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union hat ergeben, dass zurzeit nur zwei Mitgliedsstaaten, die Niederlande und Deutschland, derartige quantitative Anforderungen an Bauprodukte stellen. Dies hat dazu geführt, dass die bisher verabschiedeten harmonisierten Produktnormen, darunter die europäische Zementnorm EN 197-1, ausschließlich allgemeine Hinweise auf bestehende nationale Anforderungen enthalten.

Für die zukünftige Aus- und Überarbeitung harmonisierter technischer Spezifikationen sollen nun ein Nachweiskonzept und zugehörige Nachweisinstrumente hinsichtlich der „Wesentlichen Anforderung Nr. 3“, wie zum Beispiel Prüfverfahren und Analysemethoden, erarbeitet werden. Dazu hat die Europäische Kommission am 16. März 2005 das Mandat M/366 „Entwicklung horizontaler genormter Bewertungsmethoden für harmonisierte Konzepte zu gefährlichen Stoffen gemäß der Bauproduktenrichtlinie – Emissionen in Raumluft, Boden, Oberflächenwasser und Grundwasser“ veröffentlicht. Das Mandat sieht ein mehrstufiges Nachweiskonzept vor, das sicherstellen soll, dass nur dort Prüfungen gefordert werden, wo dies unter Beurteilung möglicher Gefährdungen der Umweltmedien Wasser, Boden (durch Auslaugung) und Luft (durch Ausgasung) durch das jeweilige Bauprodukt tatsächlich notwendig ist. Im Einzelnen sind die folgenden drei Nachweismöglichkeiten in dem Mandat verankert:

- Nachweis ohne Prüfung (Without Testing), sogenannte „WT-Produkte“
- Nachweis ohne regelmäßige Prüfung (Without Further Testing), sogenannte „WFT-Produkte“
- Nachweis durch regelmäßige Prüfung (With Further Testing), sogenannte „FT-Produkte“

Für die Nachweismöglichkeit ohne Prüfung (WT-Produkte) ist vorgesehen, dass die Einstufung in diese Klasse durch die Mitgliedsstaaten, vertreten durch den „Ständigen Ausschuss für das Bauwesen“, erfolgt. Basis für diese Entscheidung sollen die bestehenden Erfahrungen aus der Praxis und/oder wissenschaftliche Erkenntnisse für die verschiedensten Baustoffe sein. Für zementgebundene Baustoffe liegen zahlreiche Untersuchungen vor, die belegen, dass Spurenelemente oder kritische organische Verbindungen nur in Spuren vorhanden sind, die im Wesentlichen den Einträgen aus den Roh- und Prozessstoffen entsprechen. Die Freisetzung solcher Spurenstoffe während der Nutzung der Bauwerke ist sehr gering und liegt häufig an der Bestimmungsgrenze der modernen, sehr empfindlichen Analysemethoden. Diese Aussage ist durch umfangreiche Untersuchungen auch für

Zemente und Betone belegt, bei deren Herstellung sekundäre Roh-, Brenn- oder Betonzusatzstoffe zum Einsatz kommen.

Während das Freisetzungverhalten von Spurenelementen aus Betonen mit und ohne sekundäre Zusatzstoffe, wie zum Beispiel Flugaschen aus Steinkohlekraftwerken, sehr gut untersucht ist, gibt es zurzeit so gut wie keine Erkenntnisse darüber, ob und wenn ja, wie Betonzusatzmittel das Auslaugverhalten von Spurenelementen beeinflussen. In der modernen Betontechnologie werden Betonzusatzmittel vielfältig eingesetzt, um die Frisch- und Festbetoneigenschaften, wie zum Beispiel Konsistenz, Erstarren oder Frostwiderstand, gezielt zu steuern. Für die Herstellung von Hochleistungsbetonen, wie zum Beispiel hochfesten oder selbstverdichtenden Betonen, ist der Einsatz leistungsfähiger Fließmittel unerlässlich, um die erforderliche Konsistenz einzustellen. Es kann davon ausgegangen werden, dass heutzutage in Deutschland mehr als 90 % aller Betone mit Betonzusatzmitteln hergestellt werden.

Die Wirkstoffe von Betonzusatzmitteln sind in vielen Fällen organische oder anorganische Verbindungen mit mehreren funktionellen Gruppen, wie zum Beispiel Sulfat-, Sulfonat-, Hydroxyl- und Carboxylgruppen. Aufgrund dieses Molekülaufbaues stellen diese Verbindungen Polyelektrolyte dar, die sehr starke Wechselwirkungen mit positiv geladenen Partikeln oder Kationen (Komplexierungsreaktionen) eingehen können. Diese Reaktionen können zu Ausflockungen, aber auch, wie zum Beispiel im Falle der Komplexverbindungen, zu erhöhten Löslichkeiten führen. Dabei ist der Reaktionsverlauf u. a. von der Art des Kations, dem chemischen Aufbau des Polyelektrolyten sowie von seiner Konzentration abhängig. Welchen Einfluss Wechselwirkungen zwischen Spurenelementen im Beton und Betonzusatzmitteln auf das Freisetzungverhalten der Spurenelemente haben, ist bislang nicht systematisch untersucht worden.

Durch Untersuchungen an Betonen mit verschiedenen handelsüblichen Betonzusatzmitteln sollte deren Einfluss auf die Freisetzung von Spurenelementen systematisch untersucht werden. Diese Untersuchungen und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse bzw. Bewertungen sollen dazu beitragen, Betone mit Betonzusatzmitteln sachgerecht in die vorgesehenen Nachweisklassen WT, WFT oder FT einzustufen. Dies stellt sicher, dass Prüfungen nur in den Fällen durchgeführt werden, in denen sie zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit des Bauproduktes tatsächlich notwendig sind. Damit können unnötige Prüfkosten – insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, die oft nur über geringe Laborkapazitäten verfügen – und damit einhergehende wirtschaftliche Nachteile für den modernen Betonbau vermieden werden.

Das Forschungsvorhaben (AiF-Forschungsvorhaben Nr.: 15250 N) der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, durch systematische Auslauguntersuchungen an verschiedenen Festbetonen den möglichen Einfluss verschiedener handelsüblicher Betonzusatzmittel auf das Auslaugverhalten von Spurenelementen aus zusatzmittelhaltigen Betonen zu erfassen. Dabei wurde auch untersucht, ob die eingesetzte Zusatzmittelmenge die Freisetzung von Spurenelementen beeinflusst. Weiterhin wurden für die drei Zusatzmittel, die die größten Auswirkungen auf die Spurenelementauslaugung zeigten, der Einfluss dieser Mittel auf die Spurenelementfreisetzung in Abhängigkeit vom Sulfat- bzw. Alkali-Gehalt der Zemente (Dotierung mit Natriumsulfat) bzw. der Zementart untersucht.

Für die im Versuchsprogramm vorgesehenen Betonherstellungen wurden zwei Portlandzemente der Festigkeitsklasse 42,5 R bezogen, die sich hinsichtlich ihres wasserlöslichen Sulfatgehalts deutlich unterscheiden (Zement A: niedriger Gehalt an wasserlöslichem Sulfat; Zement B: hoher Gehalt an wasserlöslichem Sulfat). Außerdem wurde ein Hochofenzement CEM III/A 42,5 N (Zement C) bezogen, der mit dem gleichen Zementklinker wie der Zement A hergestellt wurde. Die Auswahl der Zemente erfolgte anhand einer im Forschungsinstitut der Zementindustrie vorliegenden Datenbank, die die Spurenelementgehalte aller deutschen Normzemente enthält. Dabei wurden Zemente mit möglichst hohen Gehalten an Barium, Chrom, Nickel und Vanadium ausgesucht, da eigene Untersuchungen an Betonen ohne Betonzusatzmittel gezeigt haben, dass für diese Elemente Eluatkonzentrationen auftreten können, die in die Nähe der entsprechenden Grenzwerte kommen.

Von den wesentlichen deutschen Herstellern von Betonzusatzmitteln wurden 11 handelsübliche Betonzusatzmittel bezogen. Dabei handelte es sich, in Absprache mit den Zusatzmittelherstellern, um Betonzusatzmittel, die möglichst nur aus einer reinen Wirkstoffkomponente bestehen. Außerdem wurden zwei Ausgangsstoffe für chromatoreduzierende Betonzusatzmittel (Zinn(II)-sulfat und Eisen(II)-sulfat) bezogen. In Tabelle 1 sind die bei den Untersuchungen eingesetzten 13 verschiedenen Betonzusatzmittel bzw. Zusatzmittelpwirkstoffe zusammengefasst. Die beiden Zusatzmittel auf Polycarboxylatetherbasis weisen, nach Angabe des Herstellers, deutlich verschiedene Hauptkettenlängen der Wirkstoffe auf.

Tabelle 1: Überblick über die bei den Untersuchungen eingesetzten Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoffe

Nr.	Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoff	Nr.	Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoff
1	Ligninsulfonat	8	Phosphonsäure
2	Melaminsulfonat	9	Pyrophosphat
3	Naphthalinsulfonat	10	Zucker
4	Polycarboxylatether A	11	Methylcellulose
5	Polycarboxylatether B	12	Zinn(II)-sulfat
6	Wurzelharz	13	Eisen(II)-sulfat
7	Alkylpolyglycolethersulfat		

Die für die Auslauguntersuchungen benötigten Betone wurden in Anlehnung an das DIBt-Merkblatt, Teil II Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte „Betonausgangsstoffe und Beton“ im Labor aus den Betonausgangsstoffen hergestellt. Der Zementgehalt der Betone betrug jeweils 280 kg/m^3 . Als Gesteinskörnung wurde Rheinkiessand entsprechend DIN EN 12620 mit einer Sieblinie in der Mitte des Bereichs A 16/B 16 entsprechend DIN 1045-2 eingesetzt. Zur Stabilisierung der Frischbetone, insbesondere bei hohen Dosierungen an verflüssigenden Betonzusatzmitteln, wurden den Betonen jeweils 100 kg/m^3 Quarzsand W 3 zugegeben. Der Wasserzementwert betrug üblicherweise $w/z = 0,60$. Bei Betonzusatzmitteln bzw. Wirkstoffen, die die Konsistenz beeinflussten, wurde der Wassergehalt so eingestellt, dass eine Konsistenz erzielt wurde, die in etwa der Konsistenz des Vergleichsbetons ohne

Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoff entspricht. Zunächst wurden die Betone mit den beiden Portlandzementen A und B in Kombination mit den 13 Betonzusatzmitteln bzw. Wirkstoffen hergestellt. Dabei wurden die Betonzusatzmittel bzw. Wirkstoffe in der zulässigen und zweifach zulässigen Höchstkonzentration eingesetzt. Anhand der Ergebnisse der Auslauguntersuchungen für die Betone mit dem Portlandzement A wurden die Betonzusatzmittel Nr. 1, Nr. 9 und Nr. 11 für die weitergehenden Untersuchungen mit dem dotierten Zement A (Dotierung mit Natriumsulfat) und mit dem Hochofenzement ausgewählt. Bei diesen weitergehenden Untersuchungen wurden die Betone mit der üblichen Einsatzkonzentration, der zulässigen und zweifach zulässigen Höchstkonzentration der Betonzusatzmittel hergestellt.

Für die Auslauguntersuchungen wurden Betonwürfel der Abmessung 10 x 10 x 10 cm³ entsprechend DIN EN 12390-2 hergestellt, dabei wurde kein Schalöl verwendet. Die Würfel wurden in der Regel nach einem Tag ausgeschalt. Bei stark verzögernden Betonzusatzmitteln bzw. Wirkstoffen erfolgte das Ausschalen, sobald eine ausreichende Festigkeit der Probekörper erreicht war. Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper dicht in Kunststoffolie verpackt und bei einer Temperatur von 20 ± 2 °C bis zu dem vorgesehenen Prüfalter von 56 Tagen gelagert. Im Anschluss an die Lagerung wurde die Kunststoffolie entfernt und die Probekörper ohne weitere Vorbehandlung der Auslaugprüfung zugeführt.

Die Auslauguntersuchungen an den Betonwürfeln wurden als Doppelbestimmung gemäß der DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“ durchgeführt. Die Probekörper wurden in verschließbaren PE-Behältern, die mit PE-Auflagern für die Probekörper versehen sind, eingebracht. Anschließend wurden 4,8 l demineralisiertes Wasser als Eluent in den Behälter gegeben. Diese Wassermenge entspricht dem vorgegebenen Eluentvolumen/Prüfkörperoberflächen-Verhältnis V_e/A_o von 80 : 1 l/m². Der Eluent wurde nicht gerührt. Nach den vorgegebenen Zeitintervallen wurde das Eluat komplett entnommen und Teilproben für die nachfolgenden Analysen vorbereitet. Anschließend wurden erneut 4,8 l demineralisiertes Wasser in den Behälter gegeben (kompletter Austausch des Eluenten). Zwischen den Wasserwechseln wurde weder nachgespült noch getrocknet. Die aufsummierte Auslaugdauer im Langzeitstandtest betrug 56 Tage.

Tabelle 2: In den Eluaten zu bestimmende Parameter

Nr.	Parameter	Nr.	Parameter
1	pH-Wert	16	Kalium (K)
2	elektrische Leitfähigkeit	17	Kupfer (Cu)
3	Geruch	18	Quecksilber (Hg)
4	Färbung, Trübung	19	Mangan (Mn)
5	Neigung zur Schaumbildung	20	Molybdän (Mo)
6	Chlorid (Cl ⁻)	21	Natrium (Na)
7	Nitrat (NO ₃ ⁻)	22	Nickel (Ni)
8	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	23	Blei (Pb)
9	Arsen (As)	24	Antimon (Sb)
10	Barium (Ba)	25	Selen (Se)
11	Beryllium (Be)	26	Zinn (Sn)
12	Cadmium (Cd)	27	Tellur (Te)
13	Calcium (Ca)	28	Thallium (Tl)
14	Cobalt (Co)	29	Vanadium (V)
15	Chrom (Cr)	30	Zink (Zn)

In Tabelle 2 sind die in den Eluaten zu bestimmenden Parameter zusammengefasst. Die Analyse der Eluate erfolgte möglichst direkt nach der Eluatentnahme. Erforderlichenfalls wurden die Eluate bis zur Durchführung der Analysen stabilisiert.

3 Ergebnisse

Die durchgeführten Langzeitstandtests haben zunächst gezeigt, dass die organoleptischen Parameter Geruch, Färbung und Trübung sowie die Neigung zur Schaumbildung in keinem Fall durch den Einsatz der Betonzusatzmittel signifikant beeinflusst werden. Dies liegt zum einen an der großen Bindekapazität von Zementen für Betonzusatzmittel, zum anderen an der relativ hohen Wassermenge von 80 l/m^3 je Quadratmeter bei den Auslaugversuchen gemäß der DAfStb-Richtlinie. Bei den organoleptischen Prüfungen für zementgebundene Werkstoffe in Kontakt mit Trinkwasser gemäß dem DVGW-Arbeitsblatt W 347 beträgt diese Wassermenge nur 40 l/m^3 .

Hinsichtlich der Spurenelementauslaugung hat sich gezeigt, dass die Spurelementgehalte in den Eluaten des Langzeitstandtests für die Elemente Quecksilber (Hg), Molybdän (Mo), Selen (Se) und Tellur (Te) in allen Fällen unterhalb der Bestimmungsgrenze der eingesetzten, sehr nachweisstarken Analysemethoden liegen. Für die Elemente Arsen (As), Beryllium (Be), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Blei (Pb), Zinn (Sn) und Thallium (Tl) liegen sehr viele Spurenelementgehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze der eingesetzten, sehr nachweisstarken Analysemethoden. Diese Ergebnisse bestätigen die große Bindekapazität von Zementen für Spurenelemente.

Die Bewertung der in diesem Forschungsvorhaben bei den durchgeführten Auslauguntersuchungen ermittelten Spurenelementgehalte in den Eluaten des Langzeitstandtests kann nicht durch einen direkten Vergleich mit den sehr scharfen, sogenannten Geringfügigkeitsschwellenwerten der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) erfolgen, da jeder Laborversuch eine Konvention darstellt und je nach den Versuchsbedingungen andere Eluatwerte ergibt. Für die Abschätzung der Auswirkungen eines realen Bauteils auf das Grundwasser muss deshalb die Immission in das Grundwasser betrachtet werden. Der Teil II des DIBt-Merkblatts „Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte“ für wasserundurchlässige Bauweisen im Grundwasser beschreibt dazu ein Konzept, auf das bei der Auswertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse zurückgegriffen wurde. Dieses Konzept gilt für Zemente, Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel und Gesteinskörnungen sowie für Konstruktionsmörtel und Betone, die eine allgemeine bauausichtliche Zulassung benötigen. Bei diesem Bewertungskonzept wird das Kontaktgrundwasser zur Abschätzung der Stofffreisetzung aus Bauteilen herangezogen. In Modellrechnungen werden die Auslaugungen aus dem Baustoff mit einem Diffusionsmodell und die Stoffausbreitung in Boden/Grundwasser durch ein geologisches Strömungs- und Transportmodell ermittelt. Durch die Kombination der beiden Modelle kann der zeitliche Verlauf der Stoffkonzentrationen im Grundwasser für definierte Randbedingungen prognostiziert werden. Bild 1 zeigt dieses Schema zur Bewertung der Auslaugung aus Baustoffen anhand von Rechenmodellen.

Unter genau definierten Randbedingungen können mit dem Freisetzungmodell unter Bezug auf die festgelegten Geringfügigkeitsschwellenwerte der verschiedenen Parameter die im 56d-Langzeitstandtest einzuhaltenden maximalen Freisetzungsmengen berechnet werden. Als Randbedingungen für die Modellrechnung sieht der Teil II des DIBt-Merkblatts eine Bauteilfläche von 800 m^2 , einen Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens von 10^{-4} m/s und eine effektive Porosität von 0,1 sowie ein Grundwassergefälle von 10^{-3} vor. Die Schichtdicke des Kontaktgrundwassers (X_R) für die kleinräumige Mittelwertbildung beträgt 0 m bis 2,0 m. Als Zeitspanne, über die zeitlich gemittelt wird, sind 6 Monate festgelegt. Als Bodentemperatur werden 10 °C angenommen. Bei der Berechnung darf keine Retardierung und kein chemischer oder biologischer Abbau berücksichtigt werden.

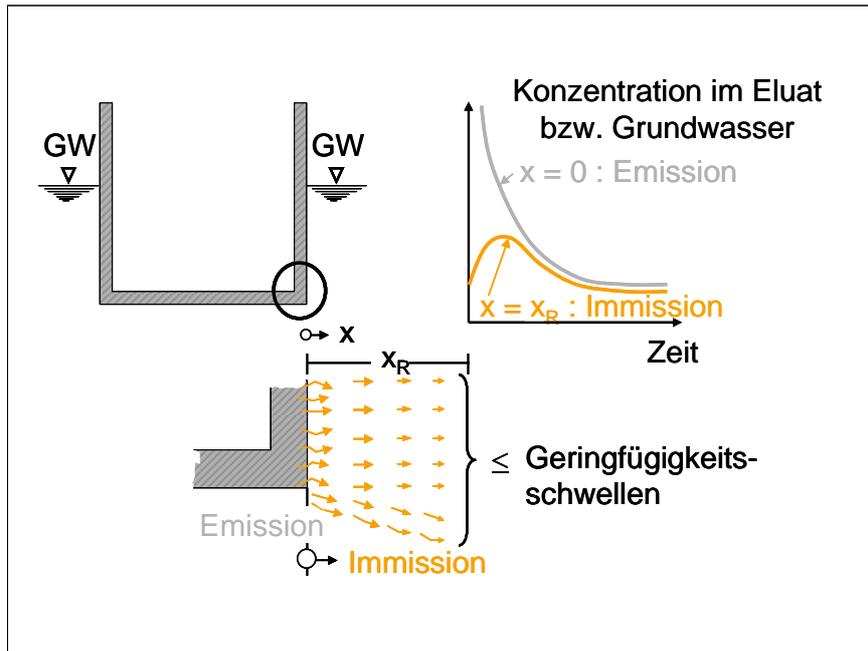


Bild 1 : Schema zur Bewertung der Auslaugung aus Baustoffen anhand von Rechenmodellen (Quelle: Teil II des DIBt-Merkblatts)

Tabelle 3: Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA und daraus berechnete maximal zulässige Freisetzungen aus zementgebundenen Baustoffen im 56d-Langzeitstandtest

Parameter	Geringfügigkeitsschwellenwert	Maximal zulässige Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest
Spurenelemente	[µg/l]	[mg/m ²]
Arsen (As)	10	10,3
Barium (Ba)	340	351
Cadmium (Cd)	0,5	0,52
Cobalt (Co)	8	8,25
Chrom (Cr)	7	7,22
Kupfer (Cu)	14	14,4
Quecksilber (Hg)	0,2	0,21
Molybdän (Mo)	35	36,1
Nickel (Ni)	14	14,4
Blei (Pb)	7	7,22
Antimon (Sb)	5	5,15
Selen (Se)	7	7,22
Thallium (Tl)	0,8	0,82
Vanadium (V)	4	4,12
Zink (Zn)	58	59,8
Anionen	[mg/l]	[g/m ²]
Chlorid (Cl ⁻)	250	258
Sulfat (SO ₄ ⁻²)	240	247

In Tabelle 3 sind die Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA sowie die unter den vorgenannten Randbedingungen berechneten Freisetzungen im 56d-Langzeitstandtest für die von der LAWA festgelegten wesentlichen anorganischen Parameter zusammengefasst.

Zur Bewertung der in diesem Forschungsvorhaben bei den durchgeführten Auslauguntersuchungen ermittelten Spurenelementgehalte in den Eluaten wurden für alle Auslaugversuche die kumulierten Auslaugmengen über 56 Tage in mg/m^2 bzw. für die Anionen in g/m^2 berechnet. Während die Messwerte der Spurenelementgehalte der Doppelbestimmung in den Einzeleluaten teilweise stärker voneinander abweichen – insbesondere dann, wenn die Messwerte in der Nähe der Bestimmungsgrenze liegen – stimmen die kumulierten Auslaugmengen im Allgemeinen recht gut überein. Das Verhalten bei den Einzeleluaten kann wahrscheinlich dadurch erklärt werden, dass der pH-Wert der Eluate einen sehr großen Einfluss auf die Auslaugmengen amphoterer Elemente oder Elemente, die Oxyanionen bilden, haben kann.

Bei der Berechnung der kumulierten Auslaugung über 56 Tage wurde bei Werten, die unter der Bestimmungsgrenze lagen, mit der halben Bestimmungsgrenze gerechnet. In den Bildern 2 bis 7 sind exemplarisch die Auslaugkurven für die Elemente Barium, Chrom, Nickel und Vanadium sowie für die Anionen Chlorid und Sulfat für die Betonmischung mit dem Zement A ($w/z = 0,60$, ohne Betonzusatzmittel) dargestellt.

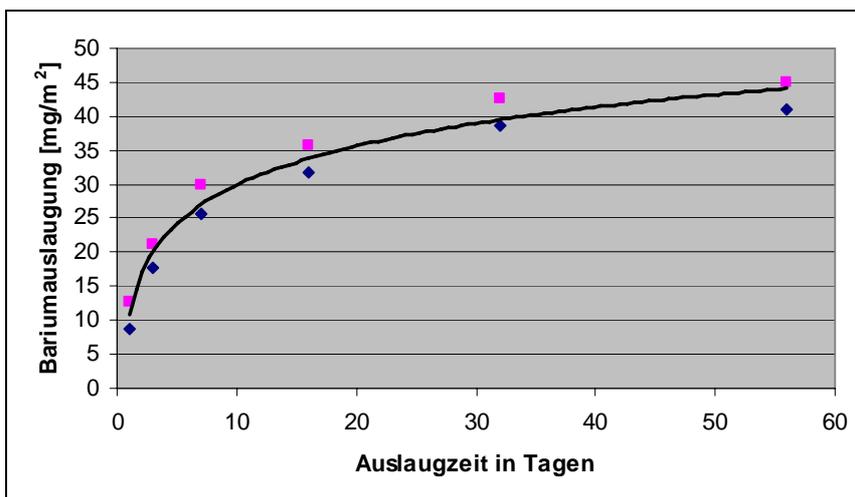


Bild 2: Bariumauslaugung im 56d-Langzeitstandtest

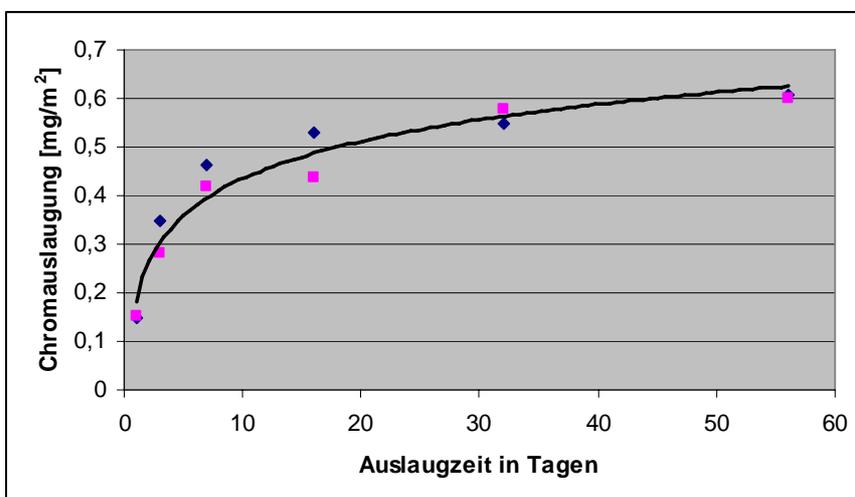


Bild 3: Chromauslaugung im 56d-Langzeitstandtest

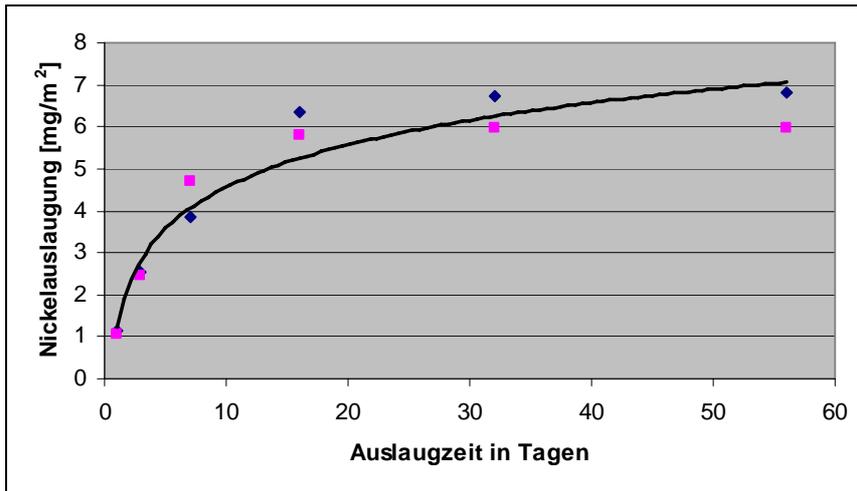


Bild 4: Nickelauslaugung im 56d-Langzeitstandtest

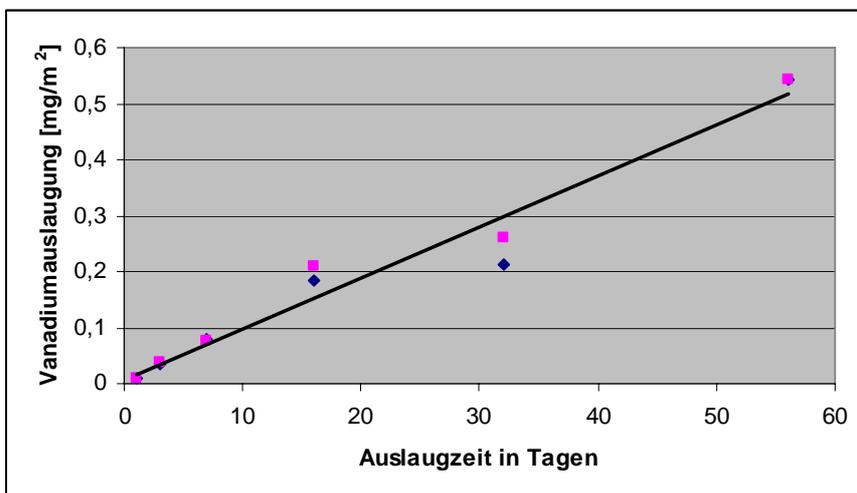


Bild 5: Vanadiumauslaugung im 56d-Langzeitstandtest

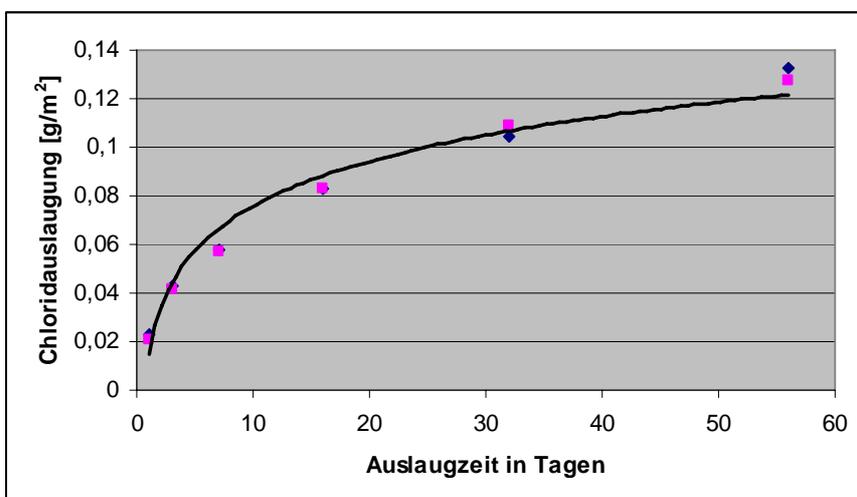


Bild 6: Chloridauslaugung im 56d-Langzeitstandtest

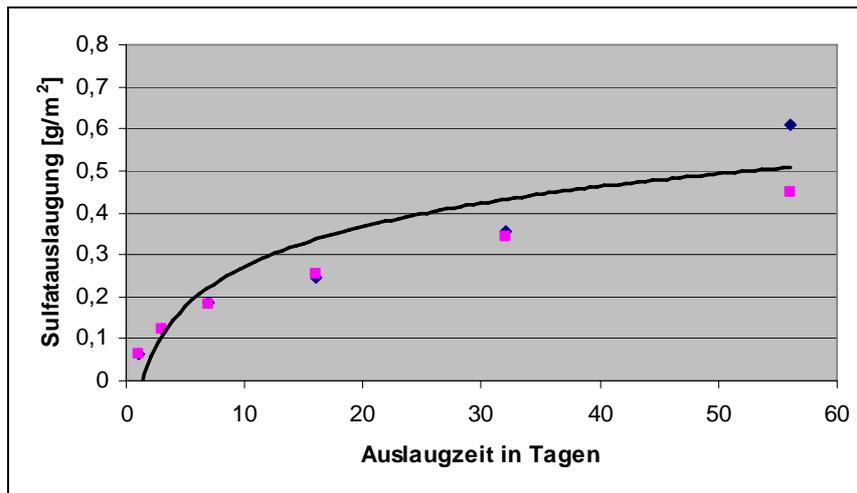


Bild 7: Sulfatauslaugung im 56d-Langzeitstandtest

Während die Auslaugkurven für Barium, Chrom, Nickel, Chlorid und Sulfat in etwa den erwarteten Verlauf für eine diffusionskontrollierte Auslaugung zeigen, ergibt sich für Vanadium eine eher lineare Beziehung. Dies kann durch die starke pH-Wertabhängigkeit der Vanadiumauslaugung erklärt werden. So wird bei dem 32-Tage-Eluat der geringste pH-Wert und eine nur geringe Vanadiumauslaugung beobachtet. Im 56-Tage-Eluat steigen der pH-Wert und die Vanadiumauslaugung wieder an. Durch diesen Anstieg des 56d-Werts ergibt sich als Ausgleichkurve eine Gerade.

In Tabelle 4 sind die jeweiligen Höchstwerte der kumulierten Auslaugmengen der Spurenelemente Arsen bis Zink sowie der Anionen Chlorid und Sulfat, für die Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA vorliegen (siehe Tabelle 3), über alle in diesem Forschungsvorhaben hergestellten 98 Betone dargestellt. In dieser Tabelle sind außerdem für die Spurenelemente und Anionen die Abweichungen von der maximal zulässigen Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest in Prozent angegeben. Dabei sind kumulierte Auslaugmengen, die mehr als 50 % der maximal zulässigen Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest betragen, gelb hinterlegt. Solche Überschreitungen wurden nur für die Elemente Nickel (Ni), Blei (Pb), Vanadium (V) und Zink (Zn) festgestellt. Überschreitungen der maximal zulässigen Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest traten nicht auf.

Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass hier jeweils die Höchstwerte über alle 98 Betone aufgelistet sind. Dabei traten die Höchstwerte nicht bei einer Betonmischung auf, sondern verteilten sich über alle Betone. Die Gesamtbetrachtung der Einzelergebnisse für die 98 verschiedenen Betone zeigt, dass in den meisten Fällen sehr geringe Auslaugmengen auftreten, die weniger als 10 % der maximal zulässigen Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest betragen.

Bei einem Vergleich der Einzelergebnisse der 98 verschiedenen Betone lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen der Zusatzmittelart bzw. Zusatzmittelkonzentration und den festgestellten Auslaugungen erkennen. Tendenziell deutet sich an, dass die Zusatzmittel zu einer leichten Erhöhung der Auslaugwerte führen, die mit steigender Zusatzmittelkonzentration zunimmt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass beim Einsatz der Betonzusatzmittel in der zulässigen und zweifach zulässigen Höchstkonzentration sehr stark in die Porenstruktur der Zementsteinmatrix eingegriffen wird. So erstrecken sich zum Beispiel die 56d-Druckfestigkeiten der Betone von 1,9 MPa bis zu 97,7 MPa und die LP-Gehalte von 0,5 Vol.-% bis zu 12,0 Vol.-%. Dichtere Betone mit hohen Druckfestigkeiten und geringen LP-Gehalten haben einen höheren Diffusionswiderstand und damit eine geringere Auslaugung der im Porenwasser des Zementsteins gelösten Elemente. Weiterhin kann auch

der Hydratationsgrad des Zements im Beton einen Einfluss auf die Auslaugung haben, da sich der Anteil der im Porenwasser gelösten Elemente, zum Beispiel durch den pH-Wert des Porenwassers, verändern kann. Bei stark verzögerten Betonen ist außerdem davon auszugehen, dass in den Zementphasen eingebundene Elemente nur zu einem geringen Anteil in Kontakt mit dem Zugabewasser kommen, in die Porenlösung übergehen und auslaugen können.

Tabelle 4 Höchstwerte der kumulierten Auslaugmengen der Spurenelemente Arsen bis Zink sowie der Anionen Chlorid und Sulfat für alle in diesem Forschungsvorhaben hergestellten 98 Betone sowie die Abweichungen von der maximal zulässigen Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest

Parameter	Maximale kumulierte Auslaugmenge [mg/m ²]	Maximale kumulierte Auslaugmenge bezogen auf die maximal zulässige Freisetzung im 56d-Langzeitstandtest [%]
Arsen (As)	4,45	43,2
Barium (Ba)	79,9	22,8
Cadmium (Cd)	0,11	21,2
Cobalt (Co)	0,17	2,06
Chrom (Cr)	1,79	24,8
Kupfer (Cu)	6,02	41,8
Quecksilber (Hg)	0,005	2,38
Molybdän (Mo)	0,48	1,33
Nickel (Ni)	13,4	93,1
Blei (Pb)	5,45	75,5
Antimon (Sb)	0,75	14,6
Selen (Se)	0,24	3,32
Thallium (Tl)	0,22	26,8
Vanadium (V)	3,30	80,1
Zink (Zn)	51,4	86,0
Anionen	[g/m ²]	[%]
Chlorid [Cl ⁻]	0,56	0,22
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	2,13	0,86

Bei den weitergehenden Versuchen mit dem dotierten Zement A hat sich gezeigt, dass die Auslaugwerte der Betone im Vergleich zu den Betonen mit dem undotierten Zement A im Allgemeinen geringer ausfallen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass durch das gut wasserlösliche Natriumsulfat die Dissoziation anderer Elemente zurückgedrängt wird. Damit sinken deren Konzentration im Porenwasser und die Auslaugung. Die Betone mit dem Hochofenzement C verhalten sich ähnlich wie die entsprechenden Betone mit dem Portlandzement A.

4 Zusammenfassung

In Deutschland ist die Prüfung der Umweltverträglichkeit nur für Bauprodukte notwendig, die einer bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt bedürfen. Die Europäische Bauproduktenrichtlinie (CPD) fordert dagegen, dass alle harmonisierten europäischen technischen Spezifikationen die für den Schutz der unmittelbaren Umgebung eines Bauwerks notwendigen Festlegungen hinsichtlich Hygiene, Gesundheit und Umwelt enthalten. Prüfungen sind jedoch nur in den Fällen vorgesehen, in denen tatsächlich eine Gefährdung der Umweltmedien Wasser, Boden und Luft durch das jeweilige Bauprodukt erfolgen kann. Dazu sind die Nachweismöglichkeiten „Nachweis ohne Prüfung (WT), ohne regelmäßige Prüfung (WFT) und durch regelmäßige Prüfung (FT)“ vorgesehen.

Während das Freisetzungverhalten von Spurenelementen aus Betonen mit und ohne sekundäre Zusatzstoffe, wie zum Beispiel Flugaschen aus Steinkohlekraftwerken, sehr gut untersucht ist, gab es so gut wie keine Erkenntnisse darüber, ob und wenn ja, wie Betonzusatzmittel das Auslaugverhalten von Spurenelementen beeinflussen, obwohl heutzutage in Deutschland mehr als 90 % aller Betone mit Betonzusatzmitteln hergestellt werden. Ziel dieses Forschungsvorhabens war deshalb, durch systematische Auslauguntersuchungen an verschiedenen Festbetonen den möglichen Einfluss verschiedener handelsüblicher Betonzusatzmittel – auf der Basis von Ligninsulfonat, Melaminsulfonat, Naphthalinsulfonat, Polycarboxylatether, Wurzelharz, Alkylpolyglycolethersulfat, Phosphonsäure, Pyrophosphat, Zucker, Methylcellulose, Zinn(II)-sulfat und Eisen(II)-sulfat – auf das Auslaugverhalten von Spurenelementen aus zusatzmittelhaltigen Betonen zu erfassen.

Die Betonherstellung erfolgte in Anlehnung an den Teil II des DIBt-Merkblatts „Bewertungskonzept für spezielle Bauwerke“. Die zusatzmittelhaltigen Betone wurden mit der üblichen, der zulässigen und zweifach zulässigen Höchstkonzentration der Betonzusatzmittel hergestellt. Weiterhin wurde für drei Zusatzmittel, die die größten Auswirkungen auf die Spurenelementauslaugung gezeigt hatten, der Einfluss dieser Mittel auf die Spurenelementfreisetzung in Abhängigkeit vom Sulfat- bzw. Alkaligehalt der Zemente (Dotierung mit Natriumsulfat) und der Zementart untersucht.

Die Auslauguntersuchungen wurden entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“ durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die organoleptischen Parameter der Eluate durch die Betonzusatzmittel nicht signifikant beeinflusst werden. Hinsichtlich der Spurenelementauslaugung hat sich gezeigt, dass die Spurenelementgehalte in den Eluaten für die Elemente Quecksilber (Hg), Molybdän (Mo), Selen (Se), und Tellur (Te) in allen Fällen unterhalb der Bestimmungsgrenze der eingesetzten, sehr nachweisstarken Analysemethoden liegen. Für die Elemente Arsen (As), Beryllium (Be), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Zinn (Sn) und Thallium (Tl) liegen sehr viele Spurenelementgehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Die Bewertung der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Auslaugergebnisse erfolgte gemäß dem Teil II des DIBt-Merkblatts. Bei dieser Bewertung hat sich gezeigt, dass in den meisten Fällen Auslaugmengen auftreten, die weniger als 10 % der maximal zulässigen Freisetzung betragen. Höhere Auslaugmengen, die 50 % der maximal zulässigen Freisetzung überschreiten, wurden nur für die Elemente Nickel (Ni), Blei (Pb), Vanadium (V) und Zink (Zn) festgestellt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass selbst unter ungünstigen Bedingungen – Zemente mit relativ hohen Spurenelementgehalten und sehr hohe Zusatzmittelkonzentrationen, die zu einem sehr starken Eingriff in die Porenstruktur der Zementsteinmatrix führten – die Anforderungen des Teils II des DIBt-Merkblatts an die maximal zulässige Spurenelementfreisetzung von allen untersuchten Betonen erfüllt wurden. Die erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnisse

werden in die europäischen Diskussionen zur Einstufung von Bauprodukten in die Nachweisklassen „Nachweis ohne Prüfung (WT), Nachweis ohne regelmäßige Prüfung (WFT) und Nachweis durch regelmäßige Prüfung (FT)“ eingebracht. Die sachgerechte Einstufung zusatzmittelhaltiger Betone bzw. von Betonzusatzmitteln in die entsprechende Nachweisklasse stellt sicher, dass Prüfungen nur in den Fällen durchgeführt werden, in denen sie zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit tatsächlich notwendig sind.