ÎNSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG





Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber

Telefon:

Vermittlung (02 41) 80-51 00 Durchwahl (02 41) 80-51 14

eMail

hohberg@ibac.rwth-aachen.de

Datum 10.05.1999 Hb/Fk-F 625 (f-625-kb-hb.doc)

KURZBERICHT: "AUSLAUGUNG UMWELTRELEVANTER STOFFE AUS ZEMENTGEBUNDENEN BAUSTOFFEN - BEWERTUNG ÜBER MODELL-RECHNUNGEN" – F 625



EINLEITUNG 1

Aufgrund des wachsenden Umweltbewußtseins in der Öffentlichkeit und der zunehmenden Verwertung von Abfällen in Baustoffen wird der Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus Baustoffen eine immer größere Bedeutung zugemessen. Für eine umfassende Bewertung der Umweltverträglichkeit von Baustoffen fehlen immer noch geeignete und allgemein akzeptierte Konzepte.

Zur Bewertung der Boden- und Grundwasserbelastung aufgrund der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe, müssen die Ergebnisse der Laboruntersuchungen in die Praxis übertragen werden können. Da Versuche unter Laborbedingungen immer Konventionen darstellen, sind hierzu Modellbetrachtungen erforderlich. Grundsätzlich sind zwei Arten von Rechenmodellen zu unterscheiden /1/:

- 1. Modelle, mit denen die Freisetzung (Emission) der umweltrelevanten Stoffe aus dem Baustoff/Bauteil in den Boden/das Grundwasser berechnet wird. Da der dominierende Auslaugmechanismus bei zementgebundenen Baustoffen die Diffusion ist /4, 5/ werden hierzu Diffusionsmodelle unter Berücksichtigung baustoffspezifischer und praxisrelevanter Randbedingungen verwendet.
- Modelle, mit denen die Ausbreitung der freigesetzten Stoffe im Boden/Grundwasser simuliert wird. Mit diesen Transportmodellen können die zeitlich variierenden Konzentrationen umweltrelevanter Stoffe im Boden/Grundwasser unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse in Abhängigkeit vom Abstand zum Bauteil/Bauwerk ermittelt werden.

Durch die Kombination von Diffusions- und Transportmodell wird eine Bewertung des Auslaugverhaltens von Baustoffen möglich, indem die Schadstoffkonzentrationen im Boden/ Grundwasser unter definierten Randbedingungen (Bodenverhältnisse, z. B. stark durchlässiger Untergrund, geringes Grundwassergefälle) in Abhängigkeit von der Zeit prognostiziert werden. Die prognostizierten Konzentrationen können dann mit den entsprechenden Vorsorgewerten aus dem Wasserrecht verglichen werden. Hierzu ist die Festlegung von definierten Randbedingungen (Konventionen) notwendig.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Modellrechnungen zur Bewertung der Auslaugung durchgeführt /2/. Diese Modellrechnungen sollen als Grundlage zur Festlegung von Konventionen bei der Bewertung der Auslaugung dienen. Daher wurden verschiedene Parameter in den Berechnungen variiert, um zu einer realistischen und praxisgerechten Festlegung der Randbedingungen zu kommen und eine standortunabhängige Bewertung der Baustoffe zu ermöglichen. Im folgenden werden die durchgeführten Modellberechnungen am Beispiel der Chromauslaugung aus Beton erläutert.

BESCHREIBUNG DER MODELLRECHNUNGEN 2 2.1

Allgemeines

Um zu einer einheitlichen Bewertung der Auslaugung aus monolithischen Baustoffen zu gelangen, müssen folgende Randbedingungen festgelegt werden:



- die Größe des betrachteten Bauteils,
- der Bereich des Grundwassers in Kontakt mit dem Bauteil (Kontakgrundwassers), über den bei der Bewertung kleinräumig gemittelt werden kann,
- der Abstand vom Bauteil, in dem die ermittelten Konzentrationen mit den entsprechenden Vorsorgewerten (Geringfügigkeitsschwellen) verglichen werden,
- der Zeitpunkt nach dem ersten Kontakt mit dem Grundwasser an dem die ermittelten Konzentrationen mit den Vorsorgewerten verglichen werden.

Zur Prognose der orts- und zeitabhängigen Konzentrationen im Grundwasser sind zwei Schritte notwendig:

- 1. Ermittlung der Freisetzung der umweltrelevanten Stoffe (hier Chrom) aus dem Baustoff (Beton). Diese Emission entspricht dem Eintrag, der Immission in das Grundwasser (siehe Abschn. 2.2).
- 2. Simulation der Ausbreitung der umweltrelevanten Stoffe im Grundwasser (vgl. Abschn. 2.4).

Diese Schritte werden im folgenden beschrieben.

2.2 Auswahl der Betone

Bei den im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Modellrechnungen wurden vorhandene Untersuchungsergebnisse aus /5, 6, 7/ ausgewertet. Dabei handelt es sich um Ergebnisse von praxisorientierten Auslaugversuchen im Labor (Standtests). Den Untersuchungsergebnissen in /5, 6, 7/ Ergebnissen ist zu entnehmen, daß aus zementgebundenen Baustoffen als umweltrelevanter Stoff im jungen Alter des Betons vor allem das Chrom freigesetzt wird. Die Modellrechnungen wurden daher am Beispiel des Chroms durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich hinsichtlich der Festlegung von Konventionen auch auf andere Schwermetalle übertragen, wobei jedoch das Rechenmodell für die Freisetzung aus dem Baustoff komplexer gestaltet sein muß.

Die Zusammensetzung der für die Berechnungen ausgewählten Betone ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

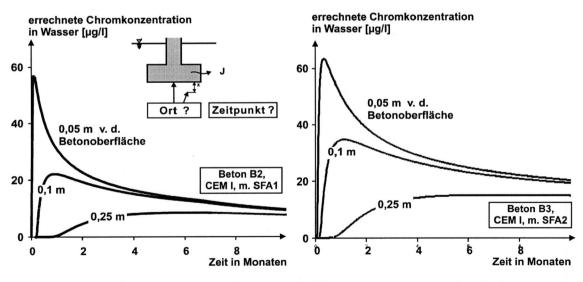
Probe	B1	B2	В3	B4	B5	
Bestandteil	kg/m ³					
1	2	3	4	5	6	
CEM I 32,5 R	360	320	320	360	320	
SFA 1		80			-	
SFA 2	-	-	80	-	80	
Zuschlag (Sieblinie A/B 16)	1817	1777	1776	1807	1769	
Wasser	180	180	180	180	180	
$(w/z+0.5f)-Wert^{1}$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	

<u>Tabelle 1:</u> Zusammensetzung der für die Berechnungen ausgewählten Betone

2.3 Berechnung der Freisetzung des Chroms aus dem Beton

Zunächst wurde aus den Untersuchungsergebnissen der effektive Diffusionskoeffizient für Chrom für die unterschiedliche Betone ermittelt. Dann wurde jeweils die sich zeitlich ändernde Freisetzung von Chrom aus Beton mit Hilfe eines numerischen Diffusionsrechenansatz berechnet /2/.

In Bild 1 sind die Ergebnisse dieser Berechnungen am Beispiel der Betone B2 und B3 (siehe Tabelle 1) zweier herkömmlichen Betons mit Zusatz von Steinkohlenflugasche (SFA) wiedergegeben. Wie aufgrund der allgemeinen Diffusionsgesetze zu erwarten ist, nehmen die Chromkonzentrationen sowohl mit zunehmender Kontaktzeit als auch mit zunehmenden Abstand zum Beton ab. Hier gilt es also, Konventionen zu treffen, für welchen Abstand vom Baustoff/Bauteil die sich zeitlich ändernden Freisetzungen ermittelt werden sollen.



<u>Bild 1:</u> Ermittlung der Freisetzung von Chrom aus Beton anhand eines numerischen Diffusionsrechenansatz /2/

¹⁾ k = 0.5; k = Wirksamkeitswert zur Anrechnung der SFA auf den w/z-Wert



Nach den Vorgaben aus dem Gewässerschutz ist hier das Kontaktgrundwasser, das ist die an den Beton angrenzende, sehr dünne Wasserschicht, zu betrachten, wobei eine kleinräumige Mittelwertbildung zulässig ist /3/. Das heißt, es muß für die Bewertung festgelegt werden, über welchen Bereich die Konzentrationen gemittelt werden sollen.

Die mit Hilfe des Diffusionsansatzes errechneten Freisetzungen entsprechen der Freisetzung in Wasser. Diese Freisetzungen wurden jeweils auf die Freisetzung ins Grundwasser umgerechnet. Anschließend wurden mit einem Transportmodell die orts- und zeitabhängigen Konzentrationen des Chroms im Grundwasser berechnet.

2.4 Ausbreitung der umweltrelevanten Stoffe im Grundwasser

2.4.1 Beschreibung des Modells

Zur Prognose der zeit- und ortsabhängigen Konzentrationen umweltrelevanter Stoffe im Grundwasser, müssen zunächst folgende Randbedingungen festgelegt werden:

- Abmessungen des Modellgeländes,
- Abmessungen des betrachteten Bauteils,
- Beschaffenheit des Grundwasserleiters (gespannt, ungespannt),
- Durchlässigkeit des Untergrundes (k_f),
- Grundwassergefälle (i).

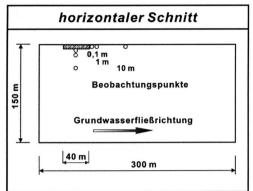
In den durchgeführten Berechnungen wurden einige der Parameter variiert, um zu einer realistischen und praxisgerechten Festlegung der Randbedingungen zu kommen. Die gewählten Bedingungen spiegeln nicht die tatsächlich gegebenen Bedingungen in einem Grundwasserleiter wieder, die wesentlich komplexer sind, als in dem gewählten, einfach konzipierten Modell. Mit dem Modell sollen Betone standortunabhängig unter jeweils gleichen (ungünstigen) Randbedingungen bewertet werden.

In Bild 2 ist das für die Berechnungen verwendete Grundwassermodell einmal im horizontalen Schnitt durch den Grundwasserleiter (Aquifer) und einmal im vertikalen Schnitt durch den Aquifer dargestellt. Das gewählte Modellgelände hat die Abmessungen $150 \times 300 \text{ m}^2$.

Es wird ein Betonfundament betrachtet, das über die gesamte Breite (im Bild 40 m) in den Aquifer hineinragt. Damit die Berechnung unabhängig von der Mächtigkeit der grundwasserführenden Schicht ist, wurde die Freisetzung aus dem Fundament über die gesamte Aquiferhöhe (10 m) ermittelt.

In verschiedenen Abständen zum Betonfundament (0,1 m, 1 m und 10 m in Richtung des fließenden Grundwassers und senkrecht zur Fließrichtung) wurden Beobachtungspunkte eingefügt, an denen die sich über die Betrachtungszeit im Grundwasser einstellenden Konzentrationen aufgezeichnet wurden (Durchgangskurven).





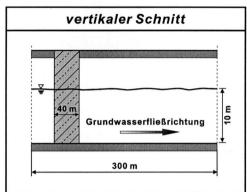


Bild 2: Betonfundament im Kontakt mit Grundwasser; schematische Skizzierung des Grundwassermodells zur Bewertung der Auslaugung

3 AUSWAHL DER BETONE UND RANDBEDINGUNGEN

Um zu überprüfen, wie sich die Variation verschiedener Parameter auf die prognostizierten Grundwasserkonzentrationen auswirken, wurden die Berechnungen mit variierten Randbedingungen durchgeführt. In Tabelle 2 sind die gewählten Variationen zusammengestellt.

<u>Tabelle 2:</u> Modellvariationen zur Berechnung der orts- und zeitabhängigen Chromkonzentrationen in Grundwasser

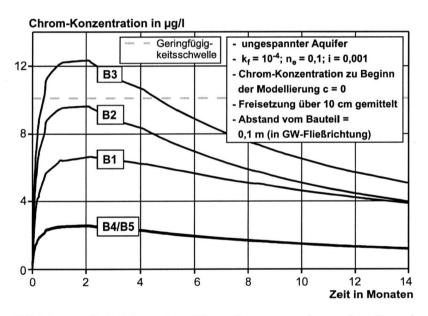
Parameter	Symbol	Einheit	gewählte Größe
1	2	3	4
		m ²	200
Fläche des Bauteils	-		400
			800
1.1 - 1 - 2 1 - 1 Miss 1 disease	-	cm	0 - 10
kleinräumige Mittelwertbildung im Kontaktgrundwasser	-		0 - 20
iii Kolitaktgrulidwassei			0 - 30
	-	m	0,1
Abstand zum Bauteil			1
			10
D		m/s; -	10^{-3} ; 0,2
Durchlässigkeitsbeiwert; effektive Porosität	$k_f; n_e$		10 ⁻⁴ ; 0,1
effektive Porositat			10 ⁻⁵ ; 0,1
	i	-	1.10-3
Grundwassergefälle			5·10 ⁻³
	*		1.10-4

: Standardbedingungen



Dabei sind die grau unterlegten Bedingungen die Bedingungen, die in Diskussionen mit der LAGA und der DIBt PG "Boden- und Grundwassergefährdung durch Baustoffe" vorgeschlagen wurden. Es handelt sich um ungünstige Bedingungen (geringe Grundwasserfließgeschwindigkeit, kleinräumige Mittelwertbildung).

Zunächst wurden für die fünf gewählten Betone die sich unter Standardbedingungen (siehe Tabelle 2) einstellenden Grundwasserkonzentrationen berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 3 wiedergegeben. Wie erwartet, nehmen die Chromkonzentrationen im Grundwasser mit zunehmender Zeit nach dem ersten Kontakt mit dem Grundwasser ab. Für Beton B3 werden die höchsten Konzentrationen, für die Betone mit Hochofenzement als Bindemittel werden die geringsten Konzentrationen prognostiziert. Dabei war nur ein geringer Unterschied in der Auslaugrate durch den Zusatz von Steinkohlenflugasche bei den Betonen mit Hochofenzement als Bindemittel zu verzeichnen. Lediglich die Konzentrationen für den Beton B3 überschreiten im Abstand 0,1 m vom Bauteil für einen Zeitraum von etwa vier Monaten die Vorsorgewerte für Chrom(VI)) (10 μ g/l). Der Beton B3 wurde für die weiteren Berechnungen gewählt, da er die höchste Chromauslaugung der betracheten Betone aufwies.



<u>Bild 3:</u> Zeitabhängige Chromkonzentrationen im Grundwasser (GW); Abhängigkeit vom Beton

In Bild 4 sind die zeitabhängigen Chromkonzentrationen im Grundwasser für den Beton B3 in Abhängigkeit von der Bauteilgröße dargestellt. Dem Bild ist zu entnehmen, daß bei einer Bauteilfläche von 200 m² die Chromkonzentrationen nur in der Anfangsphase kurzfristig den Vorsorgewert für Chrom(VI) leicht überschreiten. Bei größeren Bauteilflächen als 400 m² wird die maximale Chromkonzentration im Grundwasser nicht höher, die Konzentrationen nehmen aber langsamer ab.

In Bild 5 ist der Einfluß der Mittelwertbildung über verschiedene Abstände zum Bauteil dargestellt, nämlich 0 - 10 cm, 0 - 20 cm und 0 - 30 cm.

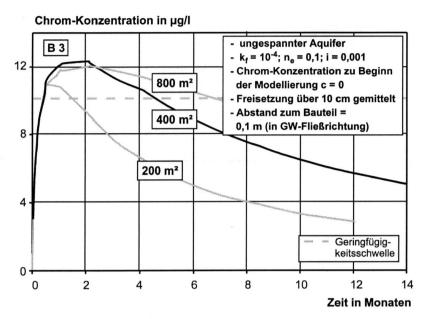


Bild 4: Zeitabhängige Chromkonzentrationen im Grundwasser (GW); Abhängigkeit von der Größe des Bauteils

Dem Bild 5 ist zu entnehmen, daß sich in diesen kleinen Abständen zum Bauwerk die Konzentrationen nicht wesentlich verändern. Dies ist vor allem auf die langsame Fließgeschwindigkeit des Wassers zurückzuführen. Für die Bewertung könnten die Konzentrationen also ohne weiteres in einem Kontaktwasserbereich von 0 - 30 cm gemittelt werden. Wie sich die prognostizierten Konzentrationen in größeren Abständen zum Bauteil verändern, wird im folgenden erläutert.

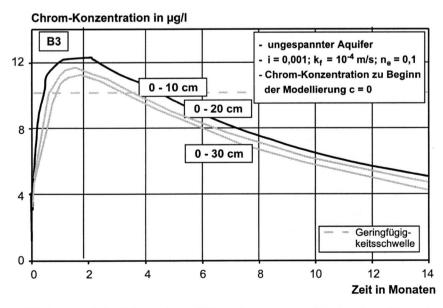


Bild 5: Zeitabhängige Chromkonzentrationen im Grundwasser; Einfluß der kleinräumigen Mittelwertbildung

عدطنـ

In Bild 6 sind die zeitabhängigen Chromkonzentrationen für den Beton B3 in verschiedenen Abständen zum Bauteil (in Grundwasserfließrichtung (f) und senkrecht (s) dazu) dargestellt. Dem Bild ist zu entnehmen, daß senkrecht zur Grundwasserfließrichtung die Chromkonzentrationen ein kleineres Maximum haben und schneller abnehmen, als in Fließrichtung. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die in das Grundwasser eingetragenen Stoffe in Fließrichtung "mitgeschleppt" werden und senkrecht zur Fließrichtung Wasser hinzukommt, das keinen Kontakt mit dem Bauteil hatte und die Konzentrationen etwas verdünnt. Dem Bild ist weiter zu entnehmen, daß in einem Abstand von 5 m zum Bauteil zu keinem Zeitpunkt die Geringfügigkeitsschwellen überschritten werden (senkrecht zur Fließrichtung schon in einem Abstand von 1 m), wobei weder eine Redtardierung noch ein chemischer Abbau während der Fließstrecke angenommen wurde.

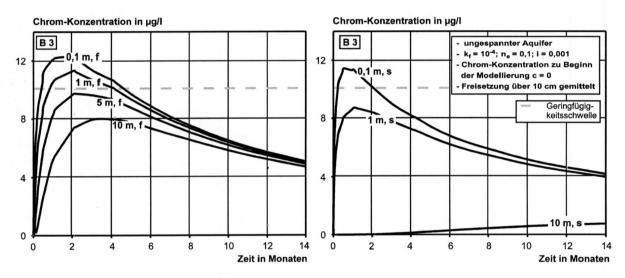


Bild 6: Orts- und zeitabhängige Chromkonzentrationen; Abhängigkeit vom Abstand zum Bauteil ((f) Abstand in Grundwasserfließrichtung, (s) senkrecht zur Grundwasserfließrichtung)

In Bild 7 sind die zeitabhängigen Chromkonzentrationen in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Untergrundes für den Beton B3 dargestellt. Erwartungsgemäß nehmen die Chromkonzentrationen bei einer größeren Durchlässigkeit des Untergrundes schneller ab. Eine Verringerung der Durchlässigkeit des Untergrundes führt nicht zu einem höheren Maximum, sondern die Konzentrationen nehmen langsamer ab.

In Bild 8 sind die zeitabhängigen Chromkonzentrationen für unterschiedliche Grundwassergefälle (Fließgeschwindigkeiten) dargestellt. Es wird deutlich, daß bei Grundwassergefällen kleiner als 10⁻³ die prognostizierten Konzentrationen sich nur unwesentlich unterscheiden. Das heißt mit einem Grundwassergefälle von 10⁻³ wurde eine ungünstige Bedingung gewählt. Bei einer Vergrößerung des Gefälles nehmen die prognostizierten Konzentrationen sehr schnell ab.



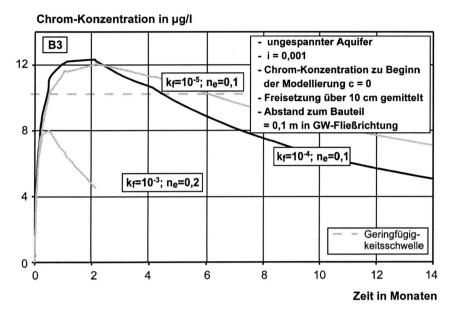
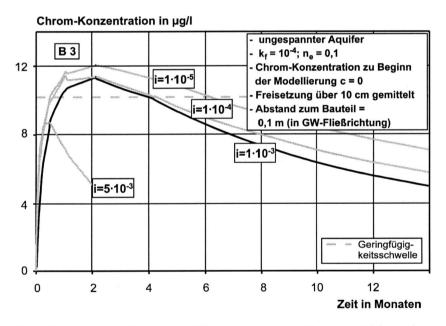


Bild 7: Zeitabhängige Chromkonzentrationen; Einfluß der Durchlässigkeit und der effektiven Porosität (k_f; n_e)



<u>Bild 8:</u> Zeitabhängige Chromkonzentrationen; Abhängigkeit vom Grundwassergefälle i



4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, daß vor allem die Fließgeschwindgkeit des Grundwassers einen entscheidenden Einfluß auf die prognostizierten Grundwasserkonzentrationen hat. Die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers ist naturgemäß von der Durchlässigkeit des Untergrundes und dem Grundwassergefälle abhängig. Dabei wirkten sich kleinere Grundwasserfließgeschwindigkeiten als 0,01 m/d kaum auf die prognostizierten Konzentrationen aus, während bei höheren Fließgeschwindigkeiten die Konzentrationen schnell abnehmen.

Mit zunehmender Bauteilgröße wird das Konzentrationsmaximum zwar nicht erhöht wird, dafür nehmen aber die Konzentrationen mit der Zeit langsamer ab.

Kleine Abstände vom Bauwerk wirken sich bei den gewählten niedrigen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers nur in sehr geringem Umfang aus. Zur Bewertung kann daher ohne weiteres im Kontaktgrundwasser über einen Bereich von 0 - 30 cm bzw. sogar von 0 - 50 cm gemittelt werden. Für die Bewertung sollte außerdem nicht nur kleinräumig sondern auch zeitlich gemittelt werden. Aufgrund der Ergebnisse wird vorgeschlagen, die prognostizierten Konzentrationen über eine Zeit von drei Monaten zu mitteln und den Wert, der sich aus dieser Mittelung ergibt, mit dem entsprechenden Vorsorgewert zu vergleichen.

5 VORSCHLÄGE ZUR FESTLEGUNG DER KONVENTIONEN

Folgende Konventionen müssen für die Bewertung der Boden- und Grundwassergefährdung infolge der Auslaugung aus Beton festgelegt werden:

- die Größe des betrachteten Bauteils,
- der Bereich, über den im Kontaktgrundwasser kleinräumig gemittelt werden kann,
- der Abstand vom Bauteil, in dem die ermittelten Konzentrationen mit den Vorsorgewerten verglichen werden,
- der Zeitpunkt nach dem ersten Kontakt mit dem Grundwasser an dem die ermittelten Konzentrationen mit den Vorsorgewerten verglichen werden,
- die Durchlässigkeit des Untergrundes und das Grundwassergefälle.

Aufgrund der durchgeführten Modellrechnungen werden die in Tabelle 3 aufgeführten Randbedingungen vorgeschlagen.

In Tabelle 4 sind die über drei Monate gemittelten Konzentrationen im Grundwasser für die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gewählten Betone zusammengestellt. Dabei sind die Mittelwerte jeweils für verschiedene Bereiche des Kontaktgrundwassers angegeben.

Betrachtet man die über 0-30 cm und drei Monate gemittelten Werte, so unterschreiten alle untersuchten Betone die Geringfügigkeitsschwelle für Chrom(VI), obwohl bei den Berechnungen "worst-case"-Bedingungen zugrunde gelegt wurden.



Überträgt man die erhaltenen Ergebnisse wieder auf den Laborversuch, so würde sich als Grenzwert für die aufgrund von Diffusion freigesetzte Menge (im 1. Jahr) mit den in Tabelle 3 zusammengestellten Konventionen ein Wert von 10 mg/m² ergeben. Bei Einhaltung dieses Wertes ist ganz grundsätzlich keinerlei Gefährdung für Boden und Grundwasser zu erwarten.

<u>Tabelle 3:</u> Randbedingungen für die Modellrechnungen zur Bewertung der Auslaugung aus Beton (Vorschlag)

Randbedingung	Gewählte Größe			
1	2			
Größe des betrachteten Bauteils	400 m^2			
Bereich über den kleinräumig gemittelt werden darf (in Fließrichtung)	0-30 cm			
Abstand vom Bauteil, in dem die ermittelten	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,			
Konzentrationen mit den Vorsorgewerten verglichen werden (in GW-Fließrichtung)	• 10 m			
Zeitpunkt nach dem ersten Kontakt mit dem Grundwassser, an dem die ermittelten Konzentrationen mit den Vorsorgewerten verglichen	1. die Vorsorgewerte sollen im Abstand 10 m zu keinem Zeitpunkt die Vor- sorgewerte überschreiten			
werden	2. im Abstand 0,1 m soll der über drei Monate gemittelte Wert den Vorsorgewert um maximal 50 % überschreiten			
Durchlässigkeit des Untergrundes	$k_f = 10^{-4} \text{m/s}$			
Grundwassergefälle	$i = 10^{-3}$			

<u>Tabelle 4:</u> Konzentrationen im Kontaktgrundwasser im Abstand von 0,1 m zum Bauteil (in Grundwasserfließrichtung) gemittelt über drei Monate nach dem ersten Kontakt des Bauteils/Baustoffs mit dem Grundwasser¹⁾

	Mittlere Chromkonzentration im Kontaktgrundwasser					
Beton	B1	B2	В3	B4	В5	
Bereich der Mittelwertbildung	μg/l					
1	2	3	4	5	6	
0 - 10 cm	6,0	8,8	11,3	2,3	2,4	
0 - 20 cm	5,8	8,5	10,7	2,2	2,3	
0 - 30 cm	5,2	7,3	9,9	2,0	2,1	

¹⁾ ohne Berücksichtigung der Temperatur des Grundwassers und der Retardierung



6 LITERATUR

- /1/ Hohberg, I.; Schießl, P.: Auslaugung umweltrelevanter Stoffe Bewertung über Modellrechnungen. Berlin: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 1998. In: Beiträge zum 36. Forschungskolloquium am 08. und 09. Oktober 1998 an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, S. 158-165
- /2/ Hohberg, I.; Schießl, P.; Wiens, U.: Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen durch Modellierung der Auslaugvorgänge. Aachen, Institut für Bauforschung 1999, Forschungsbericht Nr. F625
- /3/ Stockerl, R.: Das Wasserrecht: Grundlagen und Auswirkungen auf den Einsatz von Bauprodukten. Workshop der Deutschen Bauchemie "Boden- und Grundwassergefährdung durch Bauprodukte Neue bauaufsichtliche Anforderungen", Frankfurt, 23. Mai 1998
- /4/ Hohberg, I.; Müller, Ch.; Schießl, P.; Volland, G.: Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe. Sachstandsbericht. Berlin: Beuth. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1996), Nr. 458
- /5/ Schießl, P.; Hohberg, I.: Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen: Untersuchungen zum Auslaugverhalten von sekundären Baustoffen. Aachen, Institut für Bauforschung 1995. Forschungsbericht Nr. F 414
- /6/ Schießl, P.; Hohberg, I.: Vergleichsuntersuchungen zur Normung von Auslaugverfahren für zementgebundene Baustoffe. Aachen, Institut für Bauforschung, 1997. Forschungsbericht Nr. F 594
- /7/ Sloot van der, H.A.; Rauret, G.; Mehu, J.; Hjelmar, O.; Hohberg, I.: Technical network for the Harmization of Leaching/Extraction tests. EU-contract No.