

Kanton Aargau

Studie zum Umgang mit Bor bei der Altlastenbeurteilung

22. Januar 2013



BMG ENGINEERING AG

Consulting:
Ifangstrasse 11 • CH-8952 Schlieren/Zürich
Tel. 044 732 92 92 • Fax 044 730 66 22
bmg@bmgeng.ch • www.bmgeng.ch

Labors:
Ifangstrasse 11 • CH-8952 Schlieren/Zürich
Tel. 044 732 92 92 • Fax 044 732 92 21
labors@bmgeng.ch

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	1
1.2	Durchgeführte Arbeiten	1
1.3	Informationsquellen.....	2
2	Bor-Quellen, Bindungsformen und Anwendungen.....	4
2.1	Natürliches Vorkommen.....	4
2.2	Anwendungen von elementarem Bor	4
2.3	Anwendungen von Borverbindungen	5
2.3.1	Borax.....	5
2.3.2	Borsäure und Perborate	5
2.4	Fazit.....	5
3	Hintergrundbelastung	8
3.1	Grundwasser	8
3.1.1	Allgemeines.....	8
3.1.2	Messresultate NAQUA Schweiz (2004-2006)	9
3.1.3	Messresultate NAQUA, Messstellen Kanton Aargau (2000-2012).....	9
3.1.4	Abgrenzung von Borbelastungen geogenen Ursprung	9
3.2	Oberflächengewässer	10
3.3	Trinkwasser	11
3.4	Fazit.....	11
4	Human- und Ökotoxikologie	12
4.1	Humantoxizität	12
4.1.1	Menschliche Bor-Aufnahme	12
4.1.2	Konzentrationswert nach Altlastenverordnung.....	12
4.1.3	Kurzcharakterisierung der Humantoxizität	13
4.1.4	Fazit	13
4.2	Ökotoxikologische Aspekte	14
4.2.1	Predicted No Effect Concentration (PNEC)	14
4.2.2	Zu erwartende aquatische PEC-Werte durch Sickerwässer von Deponien	14
4.2.3	Fazit und Schlussfolgerungen	15
5	Unterscheidung von Bor aus Sickerwässern von Deponien und Abwässern	16
5.1	Problemstellung	16
5.1.1	Komplexbildner EDTA und NTA	17
5.1.2	Cyanide.....	18
5.2	Fazit.....	19
6	Praktische Anwendung in der Altlasten-Bearbeitung	19

Tabellen

Tab. 1	Zusammenstellung Bindungsformen von Bor und deren Anwendungen	7
Tab. 2	Resultate einiger Borbestimmungen in Oberflächengewässern	10
Tab. 3	Mittelwerte, Maxima und Minima der Bor-Konzentrationen im Sickerwasser von Deponien als Funktion der Zeit.....	15
Tab. 4	In Datenbanken erfasste Parameter bzgl. Deponiemonitoring Schweiz	16

Abbildungen

Abb. 1	Messresultate Grundwasser-Beobachtung NAQUA für fünf Aargauer Fassungen im Zeitraum 2002-2010.....	9
Abb. 2	Bor-Konzentrationen in Trinkwasser für verschiedene Aargauer Gemeinden (Jahre 2008 und 2009)	11

Abkürzungen

AltIV	Altlastenverordnung
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAG	Bundesamt für Gesundheit
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BG	Bestimmungsgrenze
BgVV	Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin
DOC	Dissolved organic carbon
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
FIV	Fremd- und Inhaltsstoffverordnung
HERA	Human and Environmental Risk Assessment
K-Wert	Konzentrationswert nach AltIV
LD ₅₀ -Wert	Lethale Dosis für 50% der Versuchsorganismen
NADUF	Nationales Programm für die analytische Daueruntersuchung der Schweizerischen Fließgewässer
NTA	Nitritotriacetat
PEC	Predicted Environmental Concentration
PNEC	Predicted No Effect Concentration
RfD-Wert	Reference Dose
SKUDENA	Standortbezogene Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer (Ein Projekt der Technischen Universität Wien)
SF	Slope Factor (SF _o : orale Aufnahme)
TDI	Tolerable Daily Intake
TOC	Total Organic Carbon
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
WHO	World Health Organization

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Bor wurde und wird in zahlreichen Consumer Products wie z.B. Waschmittel wie auch im Bereich der Baumaterialien verwendet. Aus diesem Grund ist Bor nicht nur in Abwasser, sondern auch in Sickerwässern von Deponien in substantiellen Konzentrationen nachzuweisen. Dies hat zur Folge, dass im Grundwasser-Abstrom von Deponien, welche Sickerwasser emittieren, neben Ammonium, Nitrat, Chlorid, Sulfat und organischen Verbindungen auch Bor nachgewiesen werden kann.

Für die Beurteilung des Einflusses von Deponien auf das Schutzgut Grundwasser bzw. Trinkwasser kann daher auf Analysen von Bor als Indikator zurückgegriffen werden. Bor weist in der Schweiz einen geologischen Hintergrund im zweistelligen µg/l-Bereich auf. Daher kann erst ab einer Konzentration von ca. 40 µg/l Bor im Grundwasser von einem zuverlässigen Hinweis auf den Einfluss von Deponien sowie kommunalem Abwasser gesprochen werden.

Die Altlastenverordnung (AltIV) legt keinen Konzentrationswert für Bor fest. Es stellt sich nun in konkreten Fällen die Frage, wie Standorte zu beurteilen sind, bei denen im unmittelbaren Abstrom oder in einer Trinkwasserfassung Bor nachgewiesen wird.

Die Sektion Abfälle und Altlasten des Kantons Aargau beauftragte die BMG Engineering AG, Empfehlungen bezüglich des Umgangs mit Bor im Altlasten-Vollzug zu erarbeiten. Diese Empfehlungen sollen auf Abklärungen in diversen Themenkreisen basieren, welche wesentliche Informationen über das Vorkommen und die Relevanz bzw. die (Öko)-Toxizität von Bor und dessen (dominanten) Bindungsderivaten aufzeigen. Ziel ist eine praxistaugliche Gesamtempfehlung bezüglich des Umgangs mit Bor bei der Beurteilung von belasteten Standorten.

1.2 Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Recherche und Zusammenstellung möglicher Bor-Quellen
- Identifizierung der bekanntesten Bor-Bindungsformen
- Recherche und Zusammenstellung der Anwendungen von Bor und deren Bindungsformen in der Industrie und im Haushalt
- Abklärungen Hintergrundbelastungen (Grundwasser / Oberflächengewässer / Trinkwasser)
- Toxikologische Beurteilung von Bor-Verbindungen
- Evaluation ökotoxikologischer Aspekte
- Möglichkeit zur Unterscheidung von Bor aus unterschiedlichen Quellen (Abwasser / Deponien)
- Verfassen des vorliegenden Berichtes

1.3 Informationsquellen

Der vorliegende Bericht stützt sich neben den relevanten gesetzlichen Bestimmungen auf die folgenden Referenzelemente:

- [1] N.N. Greenwood, A. Earnshaw. Chemie der Elemente, 1988, ISBN 3-527-26169-9, S. 173.
- [2] A.F. Holleman, E. Wiberg. Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 101. Auflage 1995, ISBN 3-11-012641-9; S. 986, 991, 1034-1040.
- [3] The Pesticide Manual, a World Compendium, 15. Edition 2009, Editor: CDS Tomlin, S. 118-120.
- [4] GESTIS Stoffdatenbank vom Institut für Arbeitsschutz der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung. [Http://gestis.itrust.de/](http://gestis.itrust.de/)
- [5] Borates, bore et composés du bore, Société Chimique de la France (online-Dokumente, aufgerufen am 21.02.2012).
- [6] Human and Environmental Risk Assessment on Ingredients of Household Cleaning Products, Substance : Boric Acid, Edition 1.0, December 2005.
- [7] Bassermann; in: Das neue grosse farbige Lexikon; 1988, ISBN 3-8094-0002-5, S. 640.
- [8] Stellungnahme der Arzneimittelkommission der Deutschen Apotheker vom 23. November 1999, abgerufen am 22. November 2010.
- [9] Stellungnahme des BfR (früher BgVV) vom 1. Februar 1995 zum Thema „Borsäuregehalte in Spielzeugen (*Slimys*)“.
- [10] www.kremer-pigmente.de.
- [11] Schadstoffberatung.de/infobaum/daemm.htm.
- [12] G. Metzner, G. Lind, L. Nitschke: Survey of boron levels in aquatic environments in Germany. Tenside, surfactants, detergents, 36 (6), 1999, 364-378.
- [13] Beyer KH, W.F. Bergfeld, W.O. Berndt, R.K. Boutwell, W.W. Carlton, D.K. Hoffmann and A.L. Schroeter, FDA Cosmetic Ingredient Review Expert Panel, Final report on the safety assessment of sodium borate and boric acid, J. Am. Coll. Toxicology 2, 87-125 (1983).
- [14] Assessment of the Risk to Consumers from Borates and the Impact of Potential Restrictions on their Marketing and Use, Final Report, RPA, November 2008.
- [15] Kilchmann S. 2001: Typology of recent groundwater from different aquifer environments based on geogenic tracer elements. Dissertation Nr. 2411, EPFL, Lausanne.
- [16] Biehler D., Schmassmann H., Schneemann K. und Sillanpää J. 1993: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. Nagra Technischer Bericht 92-08. Nagra, Wettingen.
- [17] Boron in drinking-water, background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization 2009.

- [18] Wegleitung Grundwasserschutz, Vollzug Umwelt herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL Bern, 2004.
- [19] Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA), Zustand und Entwicklung 2004-2006, herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU Bern, 2009.
- [20] EAWAG, Jahresbericht 1990: Bestimmung von Borspuren in Gewässern.
- [21] EAWAG, Jahresbericht 1984: Verhalten ausgewählter anorganischer Spurenstoffe in natürlichen Gewässern.
- [22] Bucheli, M., Studer, P., Zoller, O. Bundesamt für Gesundheit BAG, Fachartikel zum Thema „Fremd- und Inhaltsstoffverordnung (FIV): Änderungen im Bereich Trinkwasser“, Aqua & Gas N°3, 2012.
- [23] International Programme on Chemical Safety, World Health Organization, 1998.
- [24] Toxicological Data, compiled by the National Institute of Health (NIH), USA, selected and distributed by Technical Database Services (TDS), New York, 2009.
- [25] Ecotoxicological Data, compiled by the US Environmental Protection Agency (EPA), selected and distributed by Technical Database Services (TDS), New York, 2009.
- [26] Ceradel, Fiche de données de sécurité BORAX, mars 1996.
- [27] Directive 98/8/EC concerning the placing biocidal products on the market, Assessment Report, Disodium octaborate tetrahydrate, 20 February 2009.
- [28] Sicherheitsdatenblatt Borsäure bei Merck, Version 16.0, 24.10.2011.
- [29] Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu) - Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammenschutzmittel - Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dezember 2000.
- [30] F.M. Gersich, Evaluation of static chronic toxicity test method for *Daphnia magna* Straus using boric acid. Environ. Toxicol. Chem. 1984, 3, S. 89-94.
- [31] Ergänzendes Kurzgutachten: Altlasten Muttentz-Toxikologische Beurteilung für Bor, Chrom, Methylnaphthalin, Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe GmbH, Freiburg, 1. November 2007.
- [32] Scientific committee on toxicity, ecotoxicity and the environment (CSTEE) – Opinion on the results of the Risk Assessment of: sodium perborate, 2003.
- [33] Standortbezogene Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer (SKUDENA), Endbericht, Technische Universität Wien, Januar 2011.
- [34] Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien, Inge Krümpelbeck, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, September 1999.

- [35] Landesumweltamt (LUA) Nordrhein-Westfalen 2003 (D): EDTA in Nordrhein-Westfalen – ein synthetischer Stoff in der aquatischen Umwelt, Essen.
- [36] Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt 2007: Rheinüberwachungs-Station Weil am Rhein. Jahresbericht 2006: Basel.

2 Bor-Quellen, Bindungsformen und Anwendungen

Elementares Bor und Bor-Verbindungen werden in zahlreichen Prozessen sowie in Verbrauchsmaterialien verwendet. Beispielsweise wird das Element Bor als Reduktionsmittel von Kupfer verwendet, während borhaltige Mineralien wie Borate (Salze mit BO_3^{3-} bzw. einer kondensierten Form davon als Anion) in Holzschutzmitteln verwendet werden. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Anwendungen von Bor und deren Bindungsformen, welche für das Abfall-Inventar bei Deponien relevant sind, zusammengestellt. Zudem wird abgeklärt, welche Bindungsformen dominant sind, um Aussagen bezüglich der Umweltrelevanz dieser Verbindungen machen zu können.

Tabelle 1 stellt das Vorkommen sowie die am häufigsten Verwendungen von elementarem Bor und seinen häufigsten Bindungsformen zusammen. Diese Zusammenstellung basiert auf den Referenzen [1-14]. Die Tabelle beinhaltet sowohl die relevantesten industriellen und gewerblichen Anwendungen, als auch Verwendungen von Borverbindungen im Haushalt.

2.1 Natürliches Vorkommen

Bor kommt in der Natur wegen seiner grossen Affinität zu Sauerstoff nie in freiem, sondern nur in sauerstoffgebundenem Zustand (Oxide), in Form von Borsäure $\text{B}(\text{OH})_3$ und zahlreichen Mineralien (Salze von Borsäuren, Borate $\text{B}_x\text{O}_{2x-1}$) vor. Das wichtigste Bormineral ist Kernit ($\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_6(\text{OH})_2] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), welcher zusammen mit dem weltweit angewendeten Borax (Tinkal, $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) - insbesondere in Kalifornien, aber auch in der Türkei und in Argentinien - in grossen Lagerstätten vorkommt. Die weiteren wichtigsten Gesteine, in welchen Bor vorkommt, sind u. a. Ulexit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) und Colemanite ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Ausserdem ist Bor in Schiefer und lehmreichem Gestein zu finden [2].

Kernit bildet das relevanteste Ausgangsmaterial in der Industrie für die Herstellung der Borsäure und deren Salze. Daraus wird die grösste Menge des Borax gewonnen [2].

2.2 Anwendungen von elementarem Bor

Elementares Bor wird durch die Reduktion von Bortrioxid (B_2O_3) mit Magnesium gewonnen. Als pures Element wird es in der Industrie selten verwendet, ausser in der Stahlindustrie (Herstellung von Metallboriden oder zur Verbesserung der Leitfähigkeit von Aluminium oder der Fliesseigenschaften von Eisen), der Spitzentechnologie (u.a. bei der Halbleiterindustrie zur Dotierung) bzw. der Nuklearindustrie (Steuerstäbe in Kernreaktoren, Detektion von Neutronen, Strahlenschutzbekleidung und -Wände, Stähle für Lagergefässe von Kernbrennstoffen, etc.). Ferner dient es

bei der organischen Synthese und der chemischen Industrie im Allgemeinen als Reduktionsmittel.

2.3 Anwendungen von Borverbindungen

Die grösste Menge an Bor wird in Form von Boraten (v.a. Borax), Borsäure und Perboraten u.a. in Holzschutzmitteln, Waschmitteln, Bleichmitteln, Düngemitteln sowie in Glas und Emaille verwendet.

2.3.1 Borax

Borax (oder Tinkal) ist die wirtschaftlich wichtigste Verbindung von Bor und wird jährlich weltweit im Megatonnenbereich produziert. Grosse Mengen Borax werden in der Keramik-, Emaille-, Porzellan- und Glasindustrie, z.B. zur Herstellung leichtschmelzender Glasuren (Pyrex®) oder besonderer Glassorten mit geringem Ausdehnungskoeffizienten (für Laborgeräte, optische Gläser), verwendet. In der Wäscherei dient es zur Enthärtung des Wassers und wird zu diesem Zweck als Zusatz in Waschmitteln und als Ausgangsmaterial für die Gewinnung von Perboraten sowie weiteren Borverbindungen verwendet. Man nutzt es ferner zur Herstellung von Dünge-, Flammschutz- und Holzschutzmitteln sowie in der Metallurgie als Fluss-, Schweiss- und Lötmittel. Darüber hinaus findet Borax Anwendungen sowohl im Haushalt in zahlreichen Konsumgütern wie z.B. Seife, Insektiziden, Spielzeugen, Desinfektionsmitteln, Lebensmitteln (Bezeichnung E285), Kosmetikprodukten. Ferner relevant ist die Verwendung von Borax als Zuschlagsstoff für Baumaterialien wie z.B. Zement und Isolierstoffe.

2.3.2 Borsäure und Perborate

Die Weltjahresproduktion von Borsäure beträgt über 2'000'000 Tonnen. Borsäure lässt sich hauptsächlich in Spülmitteln als Bleichmittel, in Insektiziden/Fungiziden und weiteren häuslichen Anwendungen wie Desinfektionsmitteln finden. In der Lebensmittelindustrie wird Borsäure als Konservierungsmittel (E 284) verwendet. Ferner dient Borsäure in der Nuklearindustrie zum Absorbieren von überschüssigen Neutronen.

Perborate werden u.a. als Bleichmittel (u.a. früher auch in Waschmitteln) und als Desinfektionsmittel eingesetzt. Die Silbe *Per* in Natriumperborat $[\text{NaBO}_2(\text{OH})_2]_2$ ist Teil des Markennamens Persil® (Perborat-Silikat). Gemäss einer 1999 durchgeführten Studie [12] hat der Einsatzrückgang von Perboraten in Detergentien und Waschmitteln zu einer Verminderung der Borkonzentration im Abwasser geführt.

2.4 Fazit

Die prominenteste Bindungsform von Bor sind Borate $\text{B}_x\text{O}_{2x-1}$. Ferner relevant sind Borsäure $\text{B}(\text{OH})_3$ und Natriumperborat. Im Haushalt finden Borverbindungen Anwendung in zahlreichen Konsumgütern wie Waschmitteln oder Seifen. In Industrie und Gewerbe ist die Anwendung in Baustoffen relevant.

Durch diese vielfältigen Verwendungen in Haushalt und Industrie kann Bor via Abwasser und Kläranlage in Gewässer gelangen. Durch die früher praktizierte Ablagerung von Siedlungsabfällen in Deponien sowie die Deponierung von Bauabfällen in

Inertstoffdeponien findet sich Bor in Sickerwässer sämtlicher Deponietypen. Via den Sickerwasser-Pfad kann so Bor ins Grundwasser gelangen.

Tab. 1 Zusammenstellung Bindungsformen von Bor und deren Anwendungen (Bor-Quellen)

		Borverbindungen							
		Elementares Bor (B)	Borsäure B(OH) ₃	Borax (Borat) Na ₂ B ₄ O ₇ · 10 H ₂ O	Borsalz Na ₂ B ₆ O ₁₃ · 4 H ₂ O	Weitere Borate X ₂ B ₃ O _{2x-1} · n H ₂ O	Natriumperborat [NaBO ₂ (OH) ₂] ₂	Bortrioxid B ₂ O ₃	
Natur	Natürliches Vorkommen	- (nur in O-haltigen Verbindungen)	++ (aus Vulkanen)	++++ (aus Lagerstätten)		++++ (aus Lagerstätten)	(+)	(+)	
	Betriebe / Industrie	Organische Synthese im allgemeinen	+	+					+
		Chemische Industrie im allgemeinen als Oxidationsmittel	+	+	++++		++++	+	+
		Stahlindustrie	+		+		+		
		Galvanoplastik		++					
		Spitzentechnologie / Nuklearindustrie	++++	+					
		Glasindustrie (z.B. feuerfestes Borosilikatglas)		++	+++		+++		++
		Flussmittel zum Löten		+					
		Verbundwerkstoffe	+						
		Beizen		+					
		geochemische Wissenschaft		+					
		Pyrotechnik		+					
		Vergällungsmittel			+				
Anwendungen bzw. Vorkommen	Haushalt	Dünge- und Pflanzenschutzmittel	++		+		+		
		Insektizid / Fungizid		+++	++	++			
		Spülmittel		+++					
		Zement / Beton			+				
		Leder / Textilbeizen		+					
		Medizinisches Desinfektionsmittel / Antiseptikum		+++	++	+		++	
		Arzneimittel		++		+			
		Lebensmittel (Konservierungsmittel)		+	+				
		Kosmetik			+				
		Photographie		+					
	Betriebe / Industrie	Materialien (Porzellan, Emaille, Keramik...)		++	++		+		++
		Flammschutzmittel		+	++	++			+
		Isolierstoffen (z.B. Glaswolle)			+++		+++		++
		Bleichmittel			+++			++++	
		Holzschutzmittel			++++	++++	++		
		Antioxidationsmittel / Korrosionsschutzmittel			+		+		
		Spielzeug Slime (Schleim)		+	+				
		Seife			+++				
		Wasserenthärter			+++				
		Waschmittel			++++			++++	
Natur	Bleichen von Zähnen						+		
	medizinisches Konservierungsmittel				+		+		

(+) Anwendungsgrad

3 Hintergrundbelastung

Im vorhergehenden Kapitel wurden mögliche anthropogene Borquellen identifiziert. Da Bor jedoch auch ein natürlicher Bestandteil zahlreicher Gesteine bzw. Mineralien (z.B. Turmalin, Glimmer, Amphibole) ist, hängen die Bor-Konzentrationen in den schweizerischen Gewässern auch von der lokalen geologischen und hydrogeologischen Situation ab.

Im vorliegenden Kapitel wird die Bor-Hintergrundbelastung in (schweizerischen) unbeeinflussten Grundwässern bzw. Oberflächengewässern untersucht. Hierzu wurden vorhandene Analyseresultate aus unterschiedlichen Quellen zusammengestellt und ausgewertet.

Hinweis: In gelöstem Zustand liegt Bor meist als $B(OH)_3(aq)$, $B(OH)_4^-(aq)$ bzw. BO_3^{3-} (Borat) vor. Borsalze sind in der Regel gut wasserlöslich. Borax und Borsäure weisen eine ähnliche Wasserlöslichkeit von ca. 60 g/l bei 20°C auf. Im Wasser wird der Borgehalt in der Regel mittels Atomspektroskopie (z.B. ICP-OES) bestimmt.

3.1 Grundwasser

3.1.1 Allgemeines

Laut einer 2001 durchgeführten Studie liegen die Bor-Konzentrationen in anthropogen unbeeinflussten, rezenten Grundwässern in Kristallin-, Karbonat-, Molasse- und Flyschgesteinen typischerweise unter 35 µg/l [15]. Bei diesen Grundwasserleitertypen weisen die Grundwässer aus granitischen Gesteinen die höchsten geogenen Gehalte auf: ein Viertel dieser Messstellen weist Konzentrationen über 32 µg/l auf. In hochmineralisierten Grundwässern in Kontakt mit Evaporitgesteinen können auch höhere Hintergrundkonzentrationen auftreten; hier weisen ein Viertel der Messstellen Konzentrationen über 40 µg/l auf.

In Thermalwässern können die Konzentrationen deutlich höher sein; beispielsweise liegen die Bor-Konzentrationen in Baden (AG) bei rund 3 mg/l [16]. Nach einer WHO-Studie (2009) können stellenweise je nach geologischem Borgehalt des Muttergesteins Bor-Konzentrationen bis 0.6 mg/l (Niederlande) bzw. 1.5 mg/l (Spanien) im Grundwasser vorkommen [17].

In der Wegleitung Grundwasserschutz des BAFU [18] werden Indikatorwerte für die Grundwasser-Qualität in Ergänzung zu den Anforderungen der Gewässerschutzverordnung definiert. Es handelt sich dabei um Werte, deren Überschreitung auf eine anthropogene Beeinflussung hinweist. Der Indikatorwert für Bor liegt bei 50 µg/l über dem naturnahen Zustand [18]. Im Vollzug bedeutet dies nun, dass eine Hintergrundbelastung – der naturnahe Zustand – am zu beurteilenden Standort bekannt sein muss. Deshalb werden in den Kap. 3.1.2 und 3.1.3 die für die Schweiz sowie im Speziellen für den Kanton Aargau im schweizweiten Grundwasser-Beobachtungsprogramm NAQUA erhobenen Grundwasser-Konzentrationen von Bor diskutiert.

3.1.2 Messresultate NAQUA Schweiz (2004-2006)

Gemäss den Messresultaten des schweizweiten Grundwasser-Beobachtungsprogramms NAQUA wurde Bor im Zeitraum 2004-2006 an 49 der 50 untersuchten Messstellen nachgewiesen (Bestimmungsgrenze 2 µg/l). Die höchste Konzentration lag bei 111 µg/l, der maximale Messstellenmittelwert bei 83 µg/l und die Median-Konzentration bei 18 µg/l. Die höchsten Konzentrationen wurden bei Messstellen mit der Hauptbodennutzung Siedlung & Verkehr angetroffen; sie wiesen einen Median-Wert von 47 µg/l auf [19].

3.1.3 Messresultate NAQUA, Messstellen Kanton Aargau (2000-2012)

Messresultate Grundwasser-Beobachtung NAQUA für fünf Aargauer Fassungen im Zeitraum 2002-2010 sind in Abbildung 1 graphisch dargestellt. Bei allen Messstellen wurde jeweils Bor nachgewiesen, d.h. die Konzentrationen liegen alle oberhalb der Bestimmungsgrenze. Die höchste Konzentration liegt bei 33 µg/l (Fassung 1, Messung 2004). Die Fassung 1 weist auch die höchste durchschnittliche Konzentration auf, welche bei 27 µg/l liegt; wobei ein Abnahmetrend beobachtet werden kann.

Im Allgemeinen liegen die im Kanton Aargau gemessenen Bor-Konzentrationen im Bereich der national ermittelten Werte.

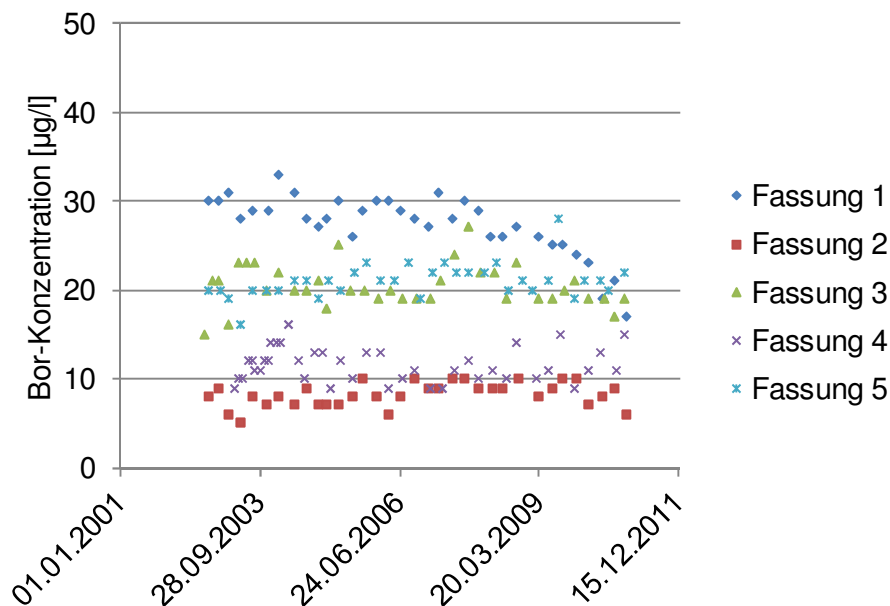


Abb. 1 Messresultate Grundwasser-Beobachtung NAQUA für fünf Aargauer Fassungen im Zeitraum 2002-2010

3.1.4 Abgrenzung von Borbelastungen geogenen Ursprung

Welche Bor-Konzentrationen geogen bedingt sind bzw. ab wann von einer anthropogenen Beeinflussung auszugehen ist, kann im Quervergleich mit dem Auftreten von anderen abwassergebundenen Stoffen abgeschätzt werden. Im Rahmen der nationalen Überwachung [19] wurde eine eindeutige Korrelation zwischen Bor-Konzentrationen und denen anderer Stoffe wie EDTA (Ethyldiamintetraacetat) und Arzneimitteln gefunden:

- Bei den Messstellen ohne EDTA-Nachweis (n = 31 von 50) lag die maximale Bor-Konzentration bei 35 µg/l. Hier dürfte Bor, in Übereinstimmung mit den in der Einführung zitierten Werten, im Wesentlichen geogenen Ursprungs sein.
- Bei allen Messstellen mit Konzentrationen über 35 µg/l Bor bestätigten neben den Nachweisen von EDTA die Nachweise von Arzneimitteln in 7 von 9 Fällen den Abwassereinfluss. Bei manchen Messstellen dürfte daher zumindest ein Teil des Bors aus anthropogenen Quellen stammen.

Die Resultate bekräftigten somit die Aussage von Kilchmann [15], dass unterhalb eines bestimmten Konzentrationslevels (35 µg/l), kein anthropogener Einfluss vorliegen sollte. Gemäss Angaben des Kantons Aargau würde dieser Wert bei ca. 40 µg/l liegen, welcher somit sehr sinnvoll gewählt ist.

3.2 Oberflächengewässer

Im Flusswasser sind im Allgemeinen nur etwa 10 µg/l Bor anzutreffen. Im Meerwasser ist Bor zu 4-5 mg/l enthalten.

Im Jahresbericht EAWAG 1990 wurden einige im Rahmen des „Nationalen Programms für die analytische Daueruntersuchung der schweizerischen Fließgewässern“ (NADUF) gesammelte Bor-Analysenresultate aus schweizerischen Gewässern (Flusswässern, Trinkwässern, Regenwasser) rapportiert [20]. Diese befinden sich im Bereich von <BG (Regenwasser Dübendorf und Lago Cristallina) bis 260 µg/l (Glatt, Rheinsfelden), vgl. Tabelle 2.

Tab. 2 Resultate einiger Borbestimmungen in Oberflächengewässern

Probenahmestelle	Bor-Konzentration [µg B/l]
Rhein, Diepoldsau (SG)	20
Rhein, (Elsass, F)	60
Glatt, Rheinsfelden (ZH)	260
Thur, Andelfingen (ZH)	70
Regenwasser, Dübendorf (ZH)	<BG
Lago Cristallina (Tessiner Alpen) (TI)	<BG

Ferner wurden in demselben Bericht [20] einige Bestimmungen vom Greifensee (als Funktion der Tiefe) und seinen wichtigsten Zuflüssen graphisch dargestellt (keine Rohdaten vorhanden). Im Greifensee lagen die Bor-Konzentrationen (auf Bor normiert) zwischen ca. 120 (an der Oberfläche) und 95 µg/l (in 30 m Tiefe) im Winter (Jan. 1991) bzw. zwischen ca. 165 und ca. 145 µg/l im Herbst (Okt. 1990). Die Konzentrationsprofile als Funktion der Tiefe zeigten keine ausgeprägten Gradienten. Die allgemein tieferen Konzentrationen im Winter wurden auf einen Eliminationsmechanismus zurückgeführt. Bormessungen vom Sommer 1984 ergaben für den Greifensee ähnlich hohe Konzentrationen [21]. In einigen Seezuflüssen beträgt die Totalborkonzentration über 200 µg/l. Dies erklärt auch die hohen Konzentrationen in der Glatt (Tab. 2), welche aus dem Greifensee fliesst und auf ihrem Weg in den Rhein durch Klärabwässer aus dem Grossraum Zürich beeinflusst wird.

3.3 Trinkwasser

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden vom Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau Bor-Konzentrationen im Aargauer Trinkwasser zur Verfügung gestellt (Zeitraum 2008-2009). Diese sind in Abbildung 2 graphisch dargestellt. Der Mittelwert liegt bei 17 µg/l. Die höchste Konzentration liegt bei 58 µg/l (Messdatum: 2009). Ein eventueller Einfluss der bestehenden Abwasserreinigungsanlage (ARA) in derselben Gemeinde kann nicht ausgeschlossen werden; dies wäre dann möglich, wenn der Vorfluter der ARA die gefassten Grundwässer beeinflusst.

Im Allgemeinen liegen die Konzentrationen im Bereich der national ermittelten Werte für Grundwasser.

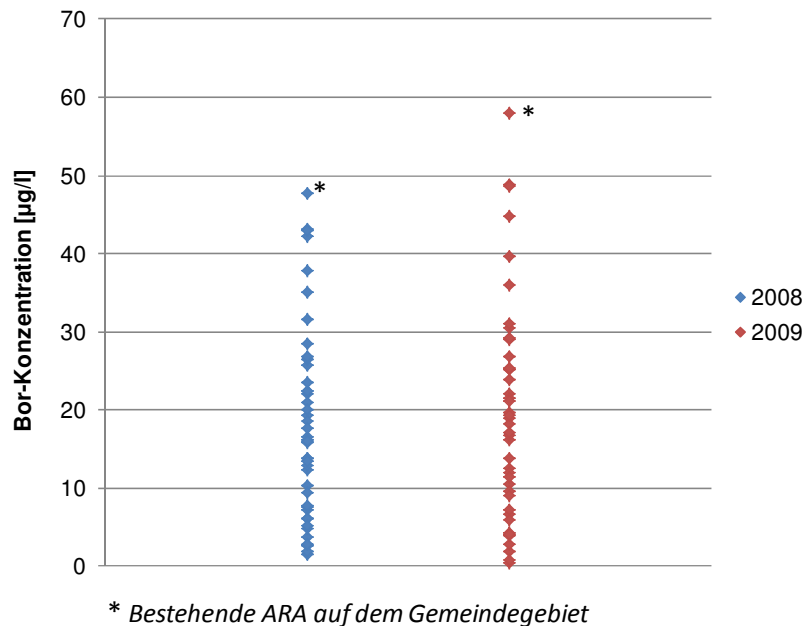


Abb. 2 Bor-Konzentrationen in Trinkwasser für verschiedene Aargauer Gemeinden (Jahre 2008 und 2009)

3.4 Fazit

Sowohl in Grundwässern als auch Oberflächengewässern weist Bor Hintergrundkonzentrationen auf. Gemäss vorhandenen Daten ist ab einer Bor-Konzentration von 35 bis 40 µg/l im Grundwasser der anthropogene Einfluss von Siedlungsdeponien u/o kommunalen Abwässern wahrscheinlich. Ob eine Gefährdung unter dem (öko)-toxikologischen Aspekt besteht wird in den nachstehenden Abschnitten abgeklärt.

4 Human- und Ökotoxikologie

4.1 Humantoxizität

4.1.1 Menschliche Bor-Aufnahme

Der menschliche Körper enthält etwa 0.7 ppm Bor, welches wahrscheinlich nicht essentiell für unsere Körperfunktionen ist. Da das Element jedoch für Pflanzen essentiell ist (Pflanzen enthalten trockenmassenbezogen 30-75 ppm Bor), wird es vom Menschen über die Nahrung aufgenommen. Ferner wird es auch über Trinkwasser (geogener Background, vgl. Kapitel 3) aufgenommen.

4.1.1.1 Nahrung

Nahrungsmittel, die am meisten Bor enthalten, sind Obst, Gemüse und Nüsse. Ferner weisen Molkereiprodukte, Fisch und Fleisch nicht vernachlässigbare Borgehalte auf. Im Rahmen einer von der World Health Organization (WHO) 1998 durchgeführten Studie wurde die tägliche menschenbezogene Aufnahme von Bor über die Nahrung als Funktion des Alters und des Geschlechts abgeschätzt [22]: Es ergab sich ein durchschnittlicher Wert von 1 bis 2 mg Bor pro Tag.

4.1.1.2 Trinkwasser

Die WHO empfiehlt einen Guideline Value von 2.4 mg/l in Trinkwasser (Körpergewicht 60 kg und Aufnahme 2 Liter/Tag Trinkwasser) [17]. Die im Rahmen der vorliegenden Studie zur Verfügung gestellten Bor-Konzentrationen im Aargauer Trinkwasser liegen deutlich unterhalb dieses Wertes (Zeitraum 2008-2009, vgl. Abbildung 2). Der Mittelwert liegt bei 17 µg/l, die höchste Konzentration bei 58 µg/l (vgl. Kapitel 3).

4.1.1.3 Regulation Gemäss FIV

Bis 2012 legte die Fremd- und Inhaltsstoff-Verordnung (FIV) keinen Toleranz- oder Grenzwert für Bor in Trinkwasser fest. Das Bundesamt für Gesundheit (BAG) plant jedoch in der nächsten Revision der FIV, einen Grenzwert von 1 mg/l für Bor einzuführen [22]. Die im Rahmen der vorliegenden Studie zur Verfügung gestellten Bor-Konzentrationen (Kap. 3) in Aargauer Trinkwasser liegen deutlich unterhalb dieses Wertes.

4.1.2 Konzentrationswert nach Altlastenverordnung

4.1.2.1 Grundlage

Die Altlastenverordnung (AltIV) legt für Bor keinen Konzentrationswert (K-Wert) fest. Der K-Wert beruht auf humantoxikologisch hergeleiteten Trinkwasser-Werten. Je kleiner der K-Wert, desto toxischer ist der Stoff.

Bei der Human-Toxikologie wird zwischen Noxen mit Schwellenwert und solchen ohne Schwellenwert (Karzinogenität) unterschieden. Die Toxizität von Stoffen bezüglich dieser zwei Wirkungsmechanismen ist die Basis für die Herleitung von Konzentrationswerten in Anlehnung an die AltIV. Das BAFU plant, demnächst eine Vollzugshilfe zur Herleitung von Konzentrationswerten nach AltIV zu publizieren. Die

BMG Engineering AG unterstützt das BAFU bei der Ausarbeitung dieser Vollzugshilfe. Das im Folgenden gewählte Vorgehen zur Herleitung eines K-Werts nach AltIV entspricht der vom BAFU definierten Prozedur.

4.1.2.2 Toxikologische Basisdaten und Herleitung des Konzentrationswerts nach AltIV

Der RfD-Wert (Reference Dose) definiert die tägliche Dosis eines Schadstoffes, die ein Mensch ein Leben lang aufnehmen kann, ohne dass er dadurch nachteilige Wirkungen auf seine Gesundheit zu erwarten hat. Die Einheiten des Parameters RfD sind $[\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}]$ und je kleiner der Wert, desto toxischer ist eine Verbindung. Die Bezeichnung RfD wird von der U.S. EPA verwendet. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) verwendet für den gleichen Wert den Begriff TDI (Tolerable Daily Intake). Für Bor und Borate liegt von der U.S. EPA ein RfD_0 von $0.2 (\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ vor. Nach dem vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) vorgeschriebenen Vorgehen beträgt der K-Wert nach AltIV für Bor auf Basis des RfD_0 demnach:

$$\text{K-Wert} = 0.2 (\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}) \cdot 70 \text{ kg} / 2 (\text{l/d}) = \mathbf{7 \text{ mg/l}}$$

Für Bor und Borverbindungen ist kein Slope Factor definiert; diese Verbindungen sind somit nicht karzinogen.

4.1.3 Kurzcharakterisierung der Humantoxizität

Bor und Borverbindungen wurden zahlreichen Toxizitätsstudien unterworfen [3, 4, 6, 24-32], die Toxikologie von Borax ist aufgrund seiner zahlreichen Anwendungen gut untersucht. Der LD_{50} -Wert für Borax wird mit 2 bis >6 Gramm Borax je kg Körpergewicht angegeben.

Bis jetzt gibt es keine Studien, welche auf ein genotoxisches oder karzinogenes Potential von Bor schliessen lassen. Borate werden vom Körper rasch ausgeschieden und weisen somit kein Bioakkumulationspotential auf. Die einzig potenziell relevante Wirkung ist die Reproduktionstoxizität. Beispielsweise kann Borsäure bei Nagetieren einen Einfluss auf die Fruchtbarkeit haben, wobei hohe Dosen histopathologische Veränderungen im menschlichen Geschlechtsorgan verursachen können (vgl. Studie vom HERA-Projekt [6]).

4.1.4 Fazit

Nach dem vom BAFU vorgeschriebenen Vorgehen zur Herleitung von K-Werten nach AltIV errechnet sich für Bor und Borate ein Wert von 7 mg/l. Die FIV wird bei ihrer nächsten Revision voraussichtlich einen Trinkwasser-Grenzwert für Bor von 1 mg/l definieren. Der Unterschied zwischen dem K-Wert nach AltIV und dem FIV-Wert liegt höchstwahrscheinlich bei dem gewählten Expositionsszenarium: Der Trinkwasser-Grenzwert der FIV berücksichtigt neben der Aufnahme durch Trinkwasser auch die Aufnahme von Bor durch feste Nahrungsmittel; der RfD-Wert wird deshalb durch Trinkwasser nicht zu 100% ausgeschöpft. Im Gegensatz dazu darf mit dem K-Wert der RfD-Wert zu 100% ausgeschöpft werden.

Ob durch Bor in Flüssen und Seen eine Gefährdung von aquatischen Organismen besteht, wird im folgenden Abschnitt aufgezeigt.

4.2 Ökotoxikologische Aspekte

4.2.1 Predicted No Effect Concentration (PNEC)

In der Ökotoxikologie werden verschiedene Testorganismen als Indikator verwendet, um die Toxizität von Verbindungen in natürlichen Ökosystemen abzuschätzen. In der aquatischen Ökotoxikologie sind das meistens Wasserlinsen, Algen, Daphnien und Fische. Basierend auf dem aus der Ökotoxikologie abgeleiteten PNEC (Predicted No Effect Concentration: Konzentration in der Umwelt, bei welcher keine negativen Auswirkungen zu erwarten sind) kann abgeschätzt werden, ob mit unerwünschten Nebeneffekten gerechnet werden muss.

Die Ökotoxikologie von Bor und Borverbindungen ist bezüglich der Einleitung von verunreinigtem Deponiesickerwasser bzw. Abwasser in Oberflächengewässer relevant. Zahlreiche ökotoxikologische Basisdaten sind vorhanden, insbesondere für Borsäure und Borax [6, 25, 26, 30, 31], anhand welcher PNEC-Werte für das Umweltkompartiment Wasser abgeleitet wurden.

Im Rahmen des von der HERA durchgeführten Risk Assessments (2005, Borsäure als Basis) [6] wurde ein PNEC-Wert für den aquatischen Bereich von 3.5 mg B/l verwendet. Dieser Wert wurde mittels der statistischen Verteilung von chronischen Laborstudien hergeleitet und gilt laut den Autoren als empfohlener Wert für einen $PNEC_{aquatic}$ (Borsäure und Borate).

In Risikobewertungen werden PNEC-Werte mit PEC-Werten verglichen; ein PEC-Wert (Predicted Environmental Concentration) beschreibt eine zu erwartende Konzentration in der Umwelt, welche z.B. durch eine Modellierung von Emissionen berechnet werden kann. Ein PEC-Wert kann natürlich auch einfach ein gemessener Wert sein, im vorliegenden Fall eine Wasserkonzentration. In der Risikobewertung wird somit der Wert, bei welchem keine negativen Auswirkungen zu erwarten sind (PNEC) mit der Konzentration im Umweltsystem (PEC) verglichen.

In europäischen Gewässern sind zahlreiche Bor-Messkampagnen durchgeführt und statistisch ausgewertet worden. Aus diesen Daten lässt sich ein 90% PEC-Wert von 0.35 mg/l B ableiten lässt (90% PEC-Wert: 90% der Messwerte liegen unterhalb von diesem Wert). Vergleicht man diesen Wert mit dem hergeleiteten PNEC von 3.5 mg/l Bor, so kann eine Gefährdung von Oberflächengewässern durch Bor-Einträge aus Abwasser und Deponien praktisch ausgeschlossen werden.

4.2.2 Zu erwartende aquatische PEC-Werte durch Sickerwässer von Deponien

Durch die Untersuchung bzw. Überwachung von Sickerwasser aus Deponien werden Ausgangsdaten zur Beurteilung von Schadstoffemissionen der Deponien ermittelt. Sickerwasser ist als Transportmedium für Schadstoffe von der Deponie zum Oberflächengewässer, meist durch Einleitung von Sickerwasser (mit oder ohne Reinigung).

Für eine Standort-Bestimmung wurden Bor-Konzentrationen aus Sickerwasser von Deponien zusammengetragen und ausgewertet. Die Datenlage betreffend Sickerwasser-Konzentrationen in Deponien ist relativ schwach und kann wie folgt zusammengefasst werden:

- In den Basisdaten des BAFU zur Deponieüberwachung sind keine Analysere-sultate vorhanden (dieser Datensatz ist nicht öffentlich und wurde der BMG vom BAFU zur Verfügung gestellt).
- Im Rahmen eines von der Technischen Universität Wien durgeführten Projekts (standortbezogene Kriterien zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieemissionen unter dem Aspekt der Nachsorgedauer, SKUDENA) wurde das Emissionsverhalten von Hausmüll-, Reaktorstoff-, Reststoff- und Inertstoffdeponien analysiert und modelliert [33]. Dazu wurden einige Bor-Analyseresultate rapportiert und zeigten die folgenden Sickerwasser-Belastungen in Abhängigkeit vom Deponietype:
 - Siedlungsdeponien/Reaktordeponien: Die höchste Konzentration lag bei 9.1 mg/l, die niedrigste bei 0.2 mg/l, der Mittelwert bei 4.0 mg/l und der Median bei 3.6 mg/l. Die Grösse des verwendeten Datensatzes wurde nicht publiziert.
 - Schlackedeponien/Reststoffdeponien: Die höchste Konzentration lag bei 20.5 mg/l, die niedrigste bei 0.16 mg/l und der Mittelwert bei 5.3 mg/l. Für diese Studie wurden 96 Analysere-sultate verwendet.
 - Baurestmassendeponien/Inertstoffdeponien: Die höchste Konzentration lag bei 11.7 mg/l, die niedrigste bei 0.03 mg/l und der Mittelwert bei 3.2 mg/l. Für diese Studie wurden 35 Analysere-sultate verwendet.
- Im Rahmen der von der Bergischen Universität (D) durchgeführten Untersu-chungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien konnten auch einige Daten erhoben werden [34]. Hierbei wurde die zeitliche Entwick-lung einer Siedlungsdeponie überwacht. Die Mittelwerte, Maxima und Minima der Bor-Konzentrationen im Sickerwasser sind als Funktion der Zeit in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tab. 3 Mittelwerte, Maxima und Minima der Bor-Konzentrationen im Sickerwasser von Deponien als Funktion der Zeit [34]

Zeit (Jahre)	Mittelwert [mg/l]	Maximum [mg/l]	Minimum [mg/l]	Anzahl der Deponien	Anzahl der Einzeldaten
1 - 5	5.9	15	0.4	5	15
6 -10	6	43	0.26	13	72
11 - 20	5.6	18	0.36	18	91
21 - 30	9.1	58	0.96	5	20

4.2.3 Fazit und Schlussfolgerungen

Der Wert von 3.5 mg B/l gilt als empfohlener Wert für den PNEC-Wert im aquatischen Bereich. Gemäss Analysere-sultaten hinsichtlich Bor-Gehalten im Sickerwas-ser von Deponien schwanken die Mittelwerte, je nach Deponietyp, zwischen 3 und 9 mg/l. Wird Sickerwasser direkt in Oberflächengewässer eingeleitet, unter Berücksichtigung eines Verdünnungsfaktors von >2.5, kann das Auftreten unerwünschter ökotoxikologischer Effekte durch die Einleitung von Bor bzw. Borverbindungen aus Deponien in ein Gewässer ausgeschlossen werden.

Die Durchschnittswerte der Bor-Belastung in den untersuchten Sickerwässern liegen zudem im Bereich des in Kapitel 4.1 hergeleiteten K-Werts nach AltIV.

5 Unterscheidung von Bor aus Sickerwässern von Deponien und Abwässern

5.1 Problemstellung

Durch die breite Verwendung von borhaltigen Materialien im Haushalt kann Bor in erhöhten Konzentrationen in Abwässern und damit auch in Gewässern festgestellt werden. Durch Uferfiltration kann Bor ins Grundwasser gelangen, da Bor weder sorbiert noch besonders gut in Kläranlagen eliminiert wird. Ziel des vorliegenden Kapitels ist die Unterscheidung zwischen Bor aus dem Eintrag von Sickerwässern von Deponien und Bor aus unseren Abwässern.

Bor ist zusammen mit anderen Stoffen (Ammonium, Natrium, EDTA) ein Indikator für menschliche Beeinflussung der Wasserqualität. Es ist aber nicht einfach, Bor aus belasteten Standorten von Bor aus Abwasser analytisch zu unterscheiden, da die Bor-Quellen in Abwasser und Abfall zum Grossteil deckungsgleich sind und auch die Speziierung von Bor sehr ähnlich ist. Eine Quellenunterscheidung Deponie/Abwasser müsste somit via eine Unterscheidung durch andere Deponie bzw. Abwasser-spezifische Parameter erfolgen.

Tab. 4 In Datenbanken erfasste Parameter bzgl. Deponiemonitoring Schweiz (Datensatz des BAFU, nicht öffentlich).

Temperatur	Chlorid	Cu gesamt	Chrom gelöst
pH-Wert	Sulfat	CN leicht freis.	Cr(VI) gelöst
Leitfähigkeit	Sulfid	Co gesamt	Cr(VI) gesamt
DOC	ges. KW	Co gelöst	As gesamt
TOC	Hg gelöst	Mo gel.	As gelöst
CSB gesamt	Hg gesamt	Mo gesamt	Tetrachlorethen
CSB gelöst	Zn gelöst	Pb gesamt	AOX gesamt
BSB5	Zn gesamt	Pb gelöst	AOX gelöst
Nitrat	Ni gelöst	Cd gelöst	Antimon
Nitrit	Ni gesamt	Cd gesamt	Bisphenol A
Ammonium	Cu gelöst	Chrom gesamt	

Wie bereits erwähnt dienen Komplexbildner wie Ethylendiamintetraacetat (EDTA) oder Nitrilotriacetat (NTA) als Abwasser-Indikator. Inwiefern diese Verbindungen in Deponiesickerwässern auftreten ist nicht abschliessend bekannt (schwache Datenbasis, in [33] gibt es keine Hinweise auf diese Verbindungen in Deponiesickerwässern), aufgrund des Einsatzes dieser Verbindungen dürften die Konzentrationen im Abwasser jedoch deutlich höher sein. Neben den Abwasser-spezifischen Verbindungen kommen auch Verbindungen zwecks Unterscheidung in Frage, welche nur in Sickerwässern von Deponien vorkommen können. Tabelle 4 zeigt die in Schweizer Deponien routinemässig erfassten Parameter (Datensatz des BAFU). Deponiesi-

ckerwasser enthalten in der Regel hohe Konzentrationen an DOC, Ammonium, Sulfat und Nitrat. Diese Verbindungen sind jedoch bekanntlich auch in Abwasser enthalten. Schwermetalle kommen nicht in Frage, da diese teilweise wenig mobil sind. Cyanid (leicht freisetzbar) könnte ein rein Deponie-spezifischer Parameter sein, welcher im Folgenden diskutiert wird.

5.1.1 Komplexbildner EDTA und NTA

Die Komplexbildner EDTA (Ethyldiamintetraacetat) und NTA (Nitrilotriacetat) sind synthetische, organische Chemikalien, die in der Umwelt natürlicherweise nicht vorkommen. Komplexbildner bilden stabile und gut wasserlösliche Komplexe mit mehrwertigen Metallkationen, wie zum Beispiel mit Calcium. Sie werden in vielen Bereichen eingesetzt: NTA kommt beispielsweise als Wasserenthärter in Waschmitteln zur Anwendung, EDTA in Wasch- und Reinigungsmitteln, Agrochemikalien und als Konservierungsstoff in Lebensmitteln (z.B. E385 Ca-EDTA). Über industrielle und häusliche Abwässer gelangen die Komplexbildner in die Kläranlagen, wo insbesondere EDTA kaum abgebaut wird [35]. Mit dem gereinigten Abwasser können die Komplexbildner in die Oberflächengewässer und von dort über Flusswasserinfiltration ins Grundwasser eingetragen werden. Gemäss dem Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt (AUE) wurde an der Rheinüberwachungsstation Weil am Rhein im Jahr 2006 eine Jahresfracht von 45.3 t EDTA und 20.7 t NTA ermittelt [36]. Dabei wurden die beiden Komplexbildner in Konzentrationen zwischen 0.61 und 2.9 µg/l quantifiziert. EDTA konnte 12 Mal (Mittelwert 1.3 µg/l; min. 0.73 µg/l, max. 2.9 µg/l) und NTA 5 Mal (Mittelwert 0.6 µg/l; min. 0.61 µg/l, max. 1.7 µg/l) nachgewiesen werden.

Die Wegleitung Grundwasserschutz [18] listet für EDTA einen Indikatorwert von 5 µg/l und für NTA von 3 µg/l auf. Nach der FIV gilt für EDTA ein Toleranzwert von 5 µg/l, für NTA ein Toleranzwert von 3 µg/l.

5.1.1.1 EDTA

Im Rahmen des nationalen Grundwasserbeobachtungsprogramms NAQUA (Zustand und Entwicklung 2004-2006) wurde EDTA häufig nachgewiesen [19]:

- Es wurde in 19 der 50 beprobten Messstellen (38%) in Konzentrationen bis 1.6 µg/l nachgewiesen (Bestimmungsgrenze 0.1 bis 0.5 µg/l).
- Werte über 1 µg/l wurden zeitweise an 5 Messstellen angetroffen. Der höchste Mittelwert einer Messstelle liegt bei 0.9 µg/l.

Alle Messwerte befinden sich unter dem Indikatorwert der Wegleitung Grundwasserschutz.

Ausserdem erwies sich EDTA als guter Indikator für die insbesondere durch häusliche Abwässer eingetragenen Arzneimittel: An 10 von 14 untersuchten Messstellen wurde neben EDTA mindestens ein Arzneimittelwirkstoff nachgewiesen. Darüber hinaus, wie bereits im Kapitel 3 erwähnt, wurde eine eindeutige Korrelation zwischen Bor-Konzentrationen und EDTA aufgezeigt:

- Bei den Messstellen ohne EDTA-Nachweis lagen die Bor-Konzentrationen unter dem Konzentrationswert, welcher auf einen anthropogenen Einfluss schliessen lässt (35 – 40 µg/l).
- Bei allen Messstellen mit substantziellen Bor-Konzentrationen wurde die Präsenz von EDTA auch nachgewiesen.

EDTA ist nicht Bestandteil der im Deponiemonitoring Schweiz erfassten Parameter und wurde auch nicht im Rahmen anderer deponiebezogener Studien untersucht [33,34]: Es wird daher davon ausgegangen, dass dieser Parameter nicht deponierelevant ist. Da es aber ein guter Abwasserindikator ist und zusammen mit Bor vorkommt, kann eine Quellenunterscheidung zwischen Deponie und Abwasser durch diesen Parameter erfolgen; wird EDTA neben Bor in signifikanten Konzentrationen nachgewiesen, dürfte letzteres im Wesentlichen aus Abwässern stammen. Aus denselben Gründen dürften ferner auch gewisse Pharmazeutika geeignete Indikatoren sein.

5.1.1.2 NTA

NTA ist auch kein relevanter Deponieparameter: Bei Deponieuntersuchungen steht es nicht im Vordergrund. Im NAQUA-Untersuchungszeitraum 2004-2006 [19] wurde es in keiner der 50 beprobten Messstellen nachgewiesen. Die Bestimmungsgrenze lag wie bei EDTA zwischen 0.1 und 0.5 µg/l. NTA erweist sich daher nicht als geeigneter Indikator zur Unterscheidung zwischen Bor aus Deponien und Abwasser. Dies liegt v.a. daran, dass NTA besser biologisch abgebaut wird als EDTA.

5.1.2 Cyanide

Im Gegensatz zu EDTA und NTA ist der Parameter Cyanide im Deponiemonitoring Schweiz erfasst (als leicht freisetzbare Ionen). Das Cyanid-Anion ist selber ein guter Komplexbildner. Bekannt ist insbesondere das Eisenhexacyanoferrat (Berliner Blau), das früher in grossen Mengen bei der Reinigung von Rohgas in Gaswerken anfiel. Cyanide finden bei der Herstellung von Pharmazeutika, Farbstoffen, Kunststoffen und Insektiziden Verwendung. Cyano-Komplexe werden ausserdem als Zusatzstoffe in Lebensmitteln verwendet. Grössere Mengen an Cyaniden werden bei der Oberflächenvergütung von Metallen (Galvanotechnik) benötigt. V.a. die im Haushalt verwendeten Cyanid-Komplexe sind äusserst stabil, Cyanid kann nicht freigesetzt werden. Aus diesem Grund dürfte Cyanid in Abwässern kaum nachweisbar sein. In den zur Verfügung stehenden Sickerwasser-Daten wird Cyanid teilweise im zweistelligen µg/l-Bereich nachgewiesen. Da Cyanid abgebaut und komplexiert werden kann ist jedoch fraglich, ob Cyanid aus Deponiesickerwasser überhaupt im weiteren Abstrom nachgewiesen werden kann (abgesehen von Deponien mit grossen Mengen an cyanid-haltigen Abfällen).

Im Rahmen des NAQUA-Programms wurde dieser Parameter bis 2005 untersucht. Es konnte bei einer Bestimmungsgrenze von 10 µg/l im Jahr 2004 an keiner Messstelle nachgewiesen werden und wurde deshalb ab 2005 nicht mehr analysiert [19].

5.2 Fazit

Zur Unterscheidung zwischen Bor aus Abwasser und Bor aus Deponie stehen die grundsätzlich die folgenden Verbindungen zur Verfügung: EDTA, NTA, Pharmazeutika (Abwasser-spezifisch) sowie Cyanid (Deponie-spezifisch). Weitere Deponie-spezifischen Parameter liessen sich nicht ableiten; dies liegt u.a. daran, dass Sickerwässer nicht systematisch überwacht und die Auswahl der erfassten Parameter sehr limitiert sind. Aufgrund der doch eher tiefen Konzentrationen im Sickerwasser eignet sich Cyanid nur in Fällen, bei welchen Cyanid prominent im Sickerwasser der Deponie vertreten ist, zur Unterscheidung verschiedener Bor-Quellen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass zur Unterscheidung von Abwässern durchaus aus andere Technologien wie die Analyse von (stabilen) Isotopen in Frage kommen. Solche Analysen sind – wie im Übrigen auch LC-MS-MS Screenings auf Pharmazeutika – mit relativ hohen Kosten verbunden. Solche Methoden können im Einzelfall zur Identifizierung einer Quelle dienen, eignen sich jedoch nicht für routinemässige Abklärungen.

6 Praktische Anwendung in der Altlasten-Bearbeitung

Mit dem hergeleiteten K-Wert nach AltIV besteht nun die Möglichkeit, einen Standort bezüglich Bor zu klassieren (Bemerkung: Der K-Wert wurde gemäss dem vom BAFU definierten Vorgehen berechnet; in einem konkreten Fall müsste der Wert via der Kantonalen Fachstelle dem BAFU zur Bewilligung vorgelegt werden. Ob das BAFU in der nächsten Revision der AltIV Bor als Parameter aufnimmt, ist uns nicht bekannt. Theoretisch wäre es auch möglich, dass das BAFU direkt den FIV-Wert übernimmt).

Die Schwierigkeit besteht nun darin, einen Standort gemäss Art. 9 Abs. 2a AltIV zu klassieren (Nachweis von Stoffen in Trinkwasserfassung öffentlichen Interesses, welche vom Standort stammen). Hier besteht für den Kanton Aargau im Speziellen ein Problem mit einer Deponie, welche einen substantiellen Anteil an Siedlungsabfällen beinhaltet: In einer Fassung im Abstrom der Deponie wurden Bor-Konzentrationen im Bereich von 40-50 µg/l gemessen und damit mehr als die in Abb. 1 aufgezeigten Hintergrund-Konzentration im Grundwässer von Aargauer Gemeinden. Diese Bor-Konzentrationen liegen hingegen immer noch unter dem vom BAFU definierten Indikatorwert [18] für Bor von ca. 70 µg/l (Berechnung: natürlicher Hintergrund ca. 20 µg/l (Durchschnitt Aargauer NAQUA-Messstellen, Abb. 1) + 50 µg/l als vorgegebenes Toleranzintervall zum natürlichen Zustand gemäss [18]).

Gemäss Gewässerschutzkarte des Kantons Aargau liegt die Deponie wie auch die Trinkwasserfassung Nahe an einem Fliessgewässer. Im Zustrom gibt es und gab es keine Kläranlage, jedoch eine Hochwasserentlastung. So ist eine Beeinflussung der Fassung durch Abwasser via Infiltrat aus dem Fliessgewässer weniger wahrscheinlich, falls die Hochwasserentlastung nur selten zum Einsatz kommt (eine Belastung durch die Deponierung von borhalten Partikeln aus dem Überlauf im Bereich der Bachsedimente ist jedoch grundsätzlich möglich). Gemäss der Abteilung Umwelt ist ein Einfluss der Deponie auf den Bach möglich. Die Background-Konzentration an Bor im betreffenden Fliessgewässer (vor und nach der Deponie) ist nicht bekannt.

Um den Beitrag der Deponie zur Bor-Belastung zu untersuchen wären die folgenden Massnahmen denkbar:

- Analyse von Bor im Sickerwasser: Dadurch könnte unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Gegebenheiten grob abgeschätzt werden, ob die Konzentrationen in der Fassung vom Standort stammen können (hier wären weitere Informationen zur Deponie notwendig, z.B. Sickerwasser-Anfall und auch bautechnische Facts wie Basisabdichtung)
- Analyse von Bor im Fließgewässer vor und nach der Deponie
- Abklärungen bezüglich Betriebsbedingungen des Regenüberlaufs (Volumina und Ereignisse, Partikelfrachten, Herkunft Wasser)
- Grundwasser-Probenahme Bereich Deponie (unbeeinflusster Bereich zur Abklärung des lokalen geogenen Backgrounds; klassisches Abstrom-Piezometer für die Deponie, falls dies die hydrogeologischen Bedingungen zulassen)

Falls ein Einfluss der Deponie auf die Fassung nachgewiesen werden kann, ist der Standort streng nach Art. 9 Abs. 2a sanierungsbedürftig. Im Folgenden geben wir einige Denkanstösse, wie mit dieser Situation im Sinne einer risikobasierten Beurteilung des Standortes umgegangen werden kann.

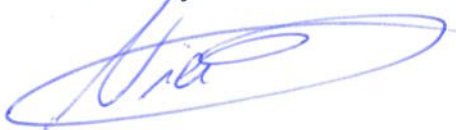
Die in der Fassung gemessenen Bor-Konzentrationen liegen ca. ein Faktor 2 oberhalb des langjährigen Durchschnitts der Aargauer NAQUA-Messstellen (Abb. 1), wobei der lokale geologische Background nicht bekannt ist. Ferner liegen die Konzentrationen einen Faktor 20 unterhalb des neuen Trinkwasser-Grenzwerts der FIV sowie unterhalb des Indikatorswerts für Grundwasser des BAFU. Eine gesundheitliche Gefährdung der Konsumenten kann somit mit Sicherheit ausgeschlossen werden, wobei noch weitere Aargauer Gemeinden in ihrem Trinkwasser Bor-Konzentrationen zwischen 40-50 µg/l messen. Im Sinne der Verhältnismässigkeit müsste hier überlegt werden, ob durch Bor tatsächlich Sanierungsmassnahmen bei der Deponie ausgelöst werden müssen. Wir regen hier weitere Abklärungen zu einer umfassenderen risikobasierten Beurteilung der Deponie an (falls diese Aspekte nicht bereits in Form einer Gefährdungsabschätzung in einer Techn. Untersuchung nach AltIV diskutiert wurden):

- Falls Bor via Sickerwasser in die Fassung gelangt, können auch problematische Schadstoffe aus dem Sickerwasser in die Fassung gelangen; gemäss neusten Abklärungen von BAFU / BMG können dies Verbindungen wie Bisphenol A, Phthalate oder auch Pharmaka sein. Hier würden weitergehende Untersuchungen im Sickerwasser das Gefährdungspotential der Deponie für die Trinkwasserfassung verlässlicher aufzeigen
- Abklärung einer möglichen Gefährdung des Fließgewässers und des Grundwassers durch Abrutschen von Deponieteilen oder durch Überschwemmung der Deponie; Beurteilung der Basisabdichtung

Entsorgungswege Bor-belasteter Abfälle

Fallen im Rahmen einer Sanierung oder eines Bauvorhabens Bor-belastete Abfälle an, so stehen in Abhängigkeit weiterer Schadstoffe die gängigen Entsorgungswege (wie z.B. Verwertung, Deponierung, thermische Behandlung) als Optionen zur Verfügung. Es sei darauf hingewiesen, dass Bor eine refraktäre und mobile Verbindung ist. Bei Ablagerung in eine andere Deponie wie auch nach einer (thermischen) Behandlung der Abfälle ist weiterhin mit Bor-Emissionen zu rechnen.

Der Projektleiter



Dr. Ludovic Vieille-Petit

BMG Engineering AG

Dr. Christian Niederer

Schlieren, 22. Januar 2013

Projekt: Bor, 61'930

Die BMG Engineering AG hat diese Untersuchung unter Einsatz ihres besten professionellen Könnens und in Übereinstimmung mit allgemein anerkannten Grundsätzen ausgeführt. Die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen im Untersuchungsbericht stützen sich auf die der BMG Engineering AG zum Zeitpunkt der Berichtverfassung vorliegenden Informationen. Diese Erkenntnisse und Schlussfolgerungen können nicht unüberprüft auf zukünftige Verhältnisse übertragen werden.