

**Zeitschrift:** Tec21  
**Herausgeber:** Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein  
**Band:** 128 (2002)  
**Heft:** 13: Werkstoffe aufgerollt

**Artikel:** Umweltverträglichkeit von zementverfestigtem Baugrund: das Auswaschverhalten von Zusatzmitteln bei Tiefbauten im Kontakt mit Grundwasser  
**Autor:** Ruckstuhl, Sabine  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-80399>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

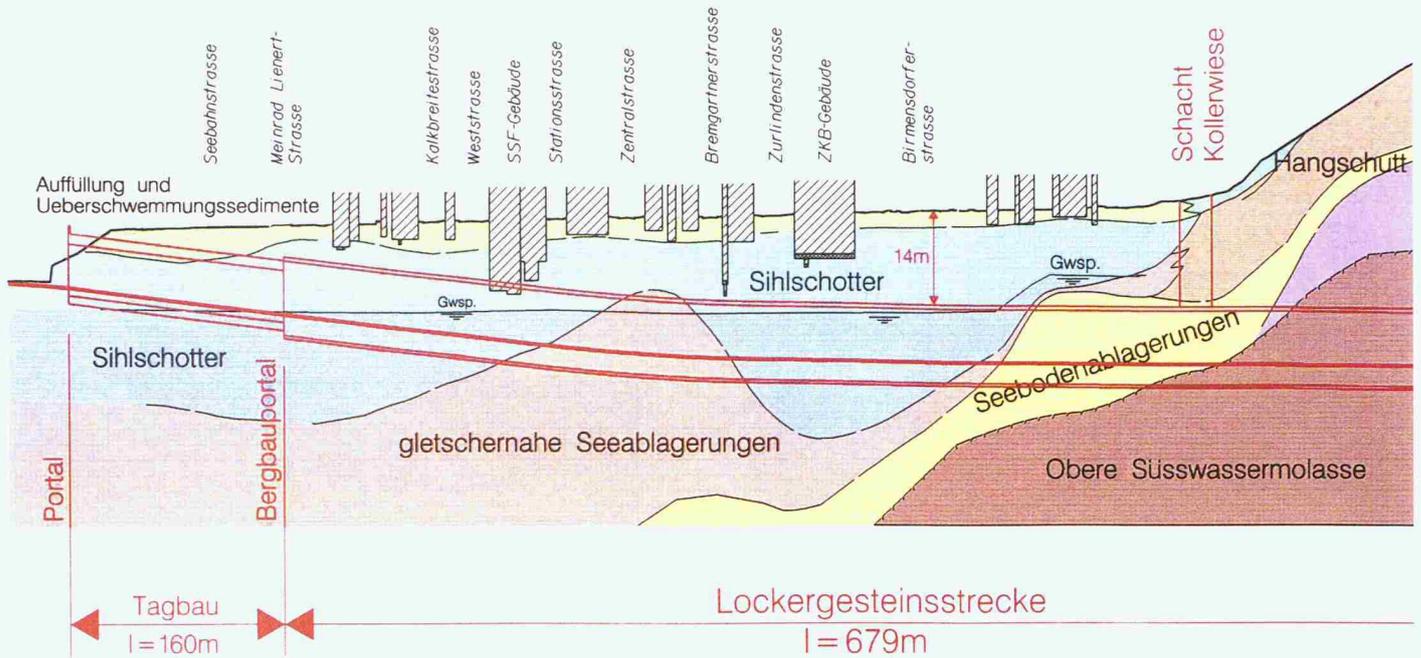
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



1  
 Geologisches Profil der Lockergesteinsstrecke des  
 SBB-Tunnels 2. Doppelspur Zürich-Thalwil (Bild SBB)

Sabine Ruckstuhl

# Umweltverträglichkeit von zementverfestigtem Baugrund

Das Auswaschverhalten von Zusatzmitteln bei Tiefbauten im Kontakt mit Grundwasser

**Moderne zementgebundene Werkstoffe beinhalten meistens chemische Zusätze, welche die Betoneigenschaften gezielt beeinflussen. Diese Zusatzmittel können bei der Herstellung und Nutzung von Bauwerken auf verschiedenen Wegen in die Umwelt gelangen. Bei Baugrundverfestigungen mittels Zementinjektionen in grundwasserführendem Lockergestein ist vor allem der Austrag von Zusatzmitteln aus dem noch nicht erhärteten Zementstein zu beachten. Zur quantitativen Erfassung der potenziellen Gefährdung des Grundwassers wurde an der Eawag das Auswaschverhalten einer repräsentativen Gruppe von Zusatzmitteln für Baugrundverfestigungen untersucht.**

Die vorliegende Untersuchung betrachtet einen typischen Vertreter der chemischen Produkte, die grösstenteils als Zusatzmittel für Beton eingesetzt werden, um Eigenschaften wie beispielsweise Fliessverhalten, Transportierbarkeit, Druckfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit gezielt zu beeinflussen. In der Schweiz enthalten mittlerweile rund ein Drittel aller Betone solche Beton-zusatzmittel, was zu einem jährlichen Beton-zusatzmittelverbrauch in der Grössenordnung von 15 000 Tonnen führt (1996)<sup>1</sup>.

Die breite Anwendung und die grosse Menge eingesetzter Beton-zusatzmittel liessen in den letzten beiden Jahrzehnten die Frage aktuell werden, ob ein Eintrag in die Umwelt möglich ist. Tatsächlich können seit den 90er-Jahren Spuren dieser meist gut wasserlöslichen Chemikalien, welche sowohl in der Bauindustrie als auch in anderen Industriezweigen eingesetzt werden, in natürlichen Gewässern nachgewiesen werden<sup>2</sup>. Grosse Aufmerksamkeit erlangte die mögliche Umweltrele-

## Baugrundverfestigung

Für Tunnelbaustellen im Lockergestein kann der Baugrund im Hinblick auf den Tunnelvortrieb mit Injektionen verbessert werden. Die Injektionen dienen der Herabsetzung der Durchlässigkeit und der Verfestigung des Lockergesteins. In den hier geschilderten Fällen wurde dazu ein Pilotstollen entlang der projektierten Tunnelröhre erstellt. Durch Bohrlöcher wurde vom Pilotstollen aus u. a. eine Feinstzementsuspension mit Druck ins Lockergestein injiziert. Damit die Zementsuspension möglichst weit in die Hohlräume des Lockergesteins eindringen kann, wird Hochleistungsbetonverflüssiger beigemischt.

## Hochleistungsbetonverflüssiger

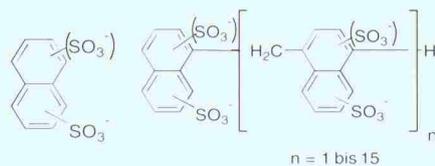
Die Druckfestigkeit von Beton hängt in erster Linie vom Massenverhältnis Wasser zu Zement ab (Abrams Gesetz von 1918). Je weniger Wasser verwendet wird, desto härter wird der Beton. Der Einbau von Beton setzt aber eine gewisse Fließfähigkeit voraus. Damit die Fließfähigkeit ohne weitere Zugabe von Wasser verbessert werden kann, kommen Hochleistungsbetonverflüssiger (HBV) zum Einsatz. Als Faustregel gilt, dass die Zugabe von 1 % HBV den gleichen Effekt hat wie eine Erhöhung der Anmachwassermenge um 20 % (beide bezogen auf Zementmasse). Die Zugabemenge von HBV hängt von der Mahlfeinheit (spezifische Oberfläche des Zements nach Blaine) ab. Weil HBV an die Oberflächen des Zements sorbieren und dort ihre Wirkung entfalten (s. unten), ist der Verbrauch an HBV bei Feinstzement, wie er bei Baugrundverfestigungen angewendet wird, höher als bei herkömmlichen Anwendungen.

Die Wirksubstanz im HBV sind organische langkettige Oligomere mit geladenen Gruppen, wie z. B. Naphthalinsulfonatformaldehyd-Kondensate (NSFK, s. Bild 2), Melaminsulfonatformaldehyd-Kondensate und Ligninsulfonate sowie Polycarboxylate und Vinyl-Copolymere in der neueren Generation. Die Funktionsweise der HBV basiert auf der Dispersion der Zementkörner: Die Zementkörner stossen sich gegenseitig aufgrund der Oberflächenladung oder der sterischen Hinderung der adsorbierten HBV-Oligomere ab und verringern somit den inneren Widerstand (s. Bild 3).

## Toxizität von Bauchemikalien

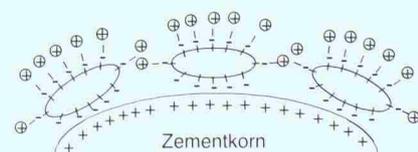
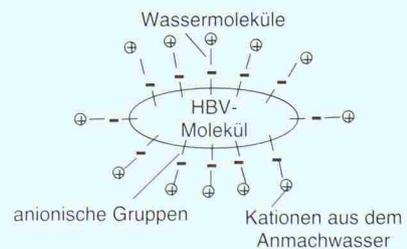
Im Baugewerbe wird ein breites Spektrum von Chemikalien verwendet. Diese Chemikalien weisen verschiedene Toxizitäten und in der Folge auch verschiedene Umweltverträglichkeiten auf. Die Toxizität wird meist als  $LC_{50}$  (lethal concentration) oder  $LD_{50}$  (lethal dose) angegeben. Dieser Wert bezeichnet die Konzentration einer Substanz z.B. im Wasser, bei welcher 50 % der Versuchstiere (z.B. Fische) sterben, oder die Dosis, welche einem Versuchstier (z.B. Ratte) verabreicht, ebenfalls den Tod der Hälfte der Versuchstiere zur Folge hat. Das Abdichtungsmittel Acrylamid, welches bei den erwähnten Fällen in Norwegen und Schweden verwendet wurde, hat einen  $LC_{50}$ -Wert für Fische von ca. 100 mg/L. Der entsprechende Wert des von der Eawag untersuchten NSFK liegt bei 100–500 mg/L. Der  $LC_{50}$ -Wert des sehr toxischen Zyanids beispielsweise ist um 3 Grössenordnungen kleiner, nämlich ca. 0,5 mg/L. Bei Langzeitbelastungen reichen aber meist schon ein bis zwei Grössenordnungen kleinere Konzentrationen aus, um chronische Effekte in Organismen zu beobachten.

Die Untersuchungen der Eawag haben gezeigt, dass bei der SBB-Baustelle 20 kg NSFK ausgewaschen wurden. Diese 20 kg könnten 200 m<sup>3</sup> Wasser für Fische vergiften. Bei einer toxischen Substanz wären es entsprechend mehr.



2

Einfach oder zweifach sulfonierte Naphthalinsulfonat-Monomere (links) und Naphthalinsulfonatformaldehyd-Kondensat-Oligomere (NSFK) mit 2 bis 15 Naphthalinsulfonat-Einheiten (rechts).



3

Schematisierte Funktionsweise eines Hochleistungsbetonverflüssigers (HBV) (Bild adaptiert von «The Cement Admixtures Association»)

vanz von Bauchemikalien 1997 im Zusammenhang mit zwei Vorkommnissen in Skandinavien: Der Einsatz von Abdichtungsmitteln auf der Basis von Acrylamid bei zwei Tunnelbauprojekten in Norwegen und Schweden führte zur Vergiftung des Trinkwassers von mehreren hunderttausend Menschen<sup>3</sup>. Die Exfiltration von Grundwasser in Oberflächengewässer brachte zudem ein Fischsterben mit sich. Aufgrund dieser Ereignisse gewann die Frage nach dem Auswaschverhalten von Betonzusatzmitteln an Tragweite und Dringlichkeit.

Bisherige Untersuchungen des Auswaschverhaltens beschränkten sich vor allem auf Laborversuche mit ausgehärtetem Zementstein<sup>4-6</sup>. Diese Untersuchungen zeigten, dass nur kleine Mengen an Betonzusatzmitteln aus den Prüfkörpern ausgewaschen werden können und dass das Auslaugen auf deren Oberfläche begrenzt ist. Die Situation ist jedoch anders, wenn nicht ausgehärtete zementgebundene Werkstoffe mit Wasser in Berührung kommen. Dies ist oft der Fall bei Baugrundverfestigungen im Lockergestein (s. blauen Kasten). Die Untersuchungen der Eawag (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) über das Auswaschverhalten von Betonzusatzmitteln wurden deshalb auf zwei Tunnelgrossbaustellen durchgeführt, wo u. a. Baugrundverfestigungen im Bereich von grundwasserführendem Lockergestein ausgeführt wurden. Auf diesen Baustellen kamen Hochleistungsbetonverflüssiger (HBV, s. grünen Kasten) auf der Basis von Naphthalinsulfonatfomaldehyd-Kondensat (NSFK) zum Einsatz. Diese mengenmässig am häufigsten eingesetzten Betonzusatzmittel bestehen aus einer 12%igen wässrigen Lösung monomerer und oligomerer Naphthalinsulfonate und dienen in den Untersuchungen der Eawag als Modellsubstanzen.

### Untersuchungsobjekte

#### *SBB-Tunnelbaustelle 2. Doppelspur Zürich–Thalwil*

Der ca. 10 km lange SBB-Tunnel zwischen Zürich und Thalwil führt im Bereich Zürich Wiedikon über 500 m durch Grundwasser führendes Lockergestein (Bild 1). Für einen sicheren Tunnelvortrieb wurden auf diesem Abschnitt nebst Weichgelinjektionen auf Silikatbasis auch 1700 m<sup>3</sup> Zementsuspension mit 17 t HBV auf der Basis von NSFK injiziert.

Eine Beeinträchtigung des Grundwassers konnte vor Baubeginn im Hinblick auf die vorgesehenen Injektionen nicht ausgeschlossen werden. Zum Schutze des Grundwassers, welches im Zusammenhang mit der Trinkwassergewinnung eine besonders schützenswerte Ressource ist, wurden 10 chemische Parameter im Abstrombereich der Baustelle überwacht. Erstmals in der Schweiz wurde in Absprache mit dem Buwal (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) auch ein Interventionswert für NSFK definiert und der Parameter NSFK ins Überwachungsprogramm aufgenommen. Anhand des Toxizitätswertes von NSFK (s. gelben Kasten) wurde ein relativ hoher Interventionswert von 1 mg/l NSFK festgelegt.

Für den Fall einer Überschreitung der Interventionswerte eines der 10 chemischen Parameter wurden in ca. 100 m Fliessdistanz von der Baustelle 5 Sanie-

rungsbrunnen mit einer Kapazität von 1500 l/min zum Abpumpen des verschmutzten Grundwassers installiert.

#### *Autobahntunnel 3. Röhre am Baregg*

Über dem First der 3. Baregg-Tunnelröhre befindet sich eine mit Lockergestein gefüllte trogartige Schotterrinne (Grundwassersee). Mittels Baugrundverfestigung mussten die Baurisiken minimiert werden. Dazu waren Injektionen (1100 m<sup>3</sup> Zementsuspension mit HBV auf der Basis von NSFK) über einen Bereich von 150 m Länge nötig. Das Grundwasser der Schotterrinne unterliegt keiner Nutzung. Daher führte einzig die Eawag Grundwassermessungen durch, um das Auswaschverhalten von NSFK zu untersuchen.

### Auswaschverhalten von NSFK

Der erste Schritt zur Untersuchung des Auswaschverhaltens von NSFK umfasste die Entwicklung einer Methode auf der Basis von Fluoreszenzspektroskopie zum schnellen und einfachen Nachweis von NSFK in Grundwasserproben<sup>7,8</sup>. Die Anwendung von HPLC (High performance liquid chromatography) erlaubte zudem die Analyse der einzelnen NSFK-Komponenten. Die Grundwassermessungen bei den zwei Untersuchungsobjekten zeigten bald, dass die Injektionsaktivitäten einen direkten Einfluss auf die Wasserqualität ausübten. Die Schadstofffahne kam jeweils mit einer Zeitverschiebung gegenüber den Injektionsaktivitäten, die mit der Grundwasserfliessgeschwindigkeit korrespondierte, bei den Probenahmestellen im Abstrombereich der Baustelle an.

Die Grundwasserkonzentrationen von NSFK stiegen in einer Entfernung von 10 m zur Baustelle bis auf einen Maximalwert von 230 µg/l (Baregg) an. Bei der SBB-Baustelle wurden Werte bis zu 56 µg/l gemessen. Der Interventionswert von 1 mg/l wurde also bei beiden Baustellen nie überschritten. Aufgrund der Einhaltung des Interventionswertes konnte davon ausgegangen werden, dass die Umwelt in den untersuchten Fällen nicht beeinträchtigt wurde. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass bei der Trinkwasseraufbereitung unerwünschte Ozonierungsprodukte aus NSFK entstehen.

Die NSFK-Konzentrationen im Abstrombereich der SBB-Baustelle sind stark von der Verdünnung mit Grundwasser abhängig. Um Voraussagen für andere Baustellen zu machen, ist daher vor allem die totale Menge an ausgewaschenem NSFK von Interesse. Dazu sind Stoffflussberechnungen notwendig. Bild 4 zeigt die Stoffflüsse der SBB-Tunnelbaustelle, berechnet anhand der eingesetzten Mengen an NSFK und den bestimmten NSFK-Grund- und Abwasserkonzentrationen. Von den eingesetzten 17t HBV sind 2t NSFK, wovon der Hauptanteil im Zementstein verbleibt. Etwa 3% des NSFK verlässt die Baustelle über das Abwasser, welches in die kommunale Abwasserreinigungsanlage fliesst. Weiterführende Untersuchungen über das Verhalten der NSFK-Komponenten in der Kläranlage haben ergeben, dass die wichtigsten Eliminationsmechanismen von NSFK aus dem Abwasser die Fällung

und der biologische Abbau sind. Trotzdem werden nicht alle NSFK-Komponenten eliminiert. Es muss damit gerechnet werden, dass ein Teil des NSFK via Kläranlage in die Umwelt gelangt.

Wesentlich ist, dass ca. 5 % des eingesetzten NSFK während der Injektionen ins umliegende Grundwasser gelangt. Dabei handelt es sich vor allem um die Monomere und die Oligomere mit kurzen Kettenlängen. Die Oligomere mit mehr als vier Einheiten scheinen so stark an die Zementsteinoberflächen zu adsorbieren, dass sie gar nicht erst ausgewaschen werden.

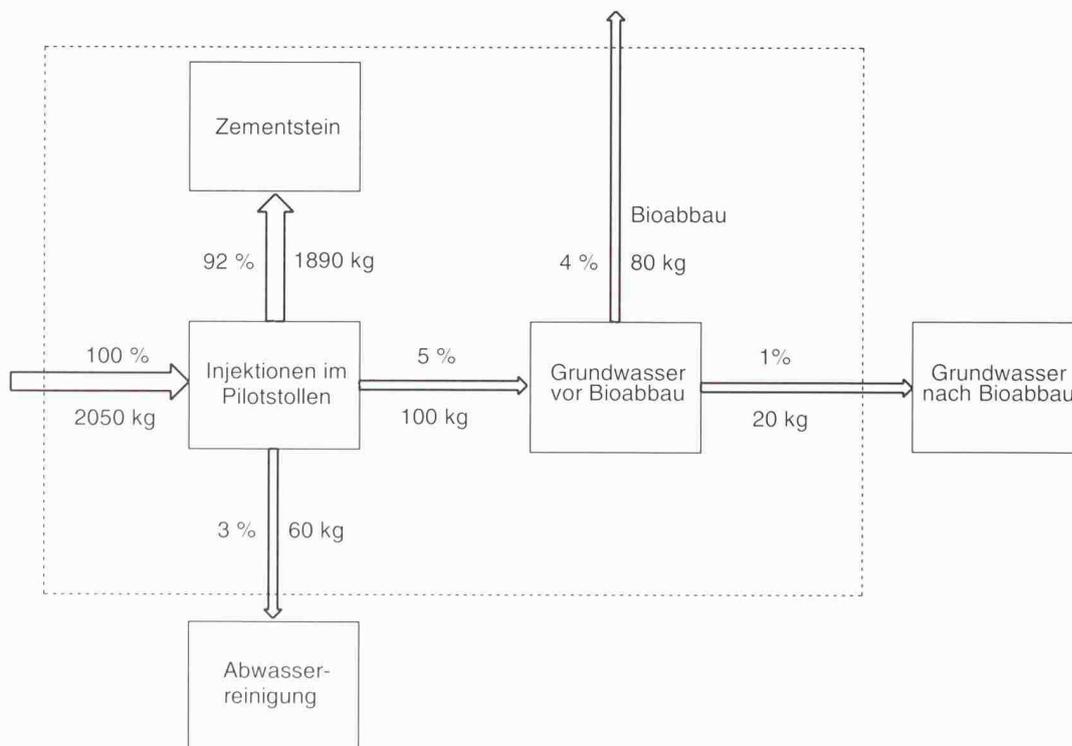
Bei der Baustelle am Baregg wurde NSFK in der gleichen Grössenordnung ausgewaschen, nämlich im Bereich von ca. 1 % der ursprünglich eingesetzten Menge.

### Verbleib von NSFK im Grundwasserleiter

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf dem Verbleib von NSFK im Grundwasserleiter. Da sich ein gewisser Eintrag von HBV ins Grundwasser offenbar nicht vermeiden lässt, ist für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit in erster Linie die Bioabbaubarkeit der einzelnen Komponenten von Interesse. Im Grundwasser des Baregg konnten nach Abschluss der Injektionsarbeiten tatsächlich biologische Abbauprozesse verfolgt werden: Die Konzentrationen der meisten monomeren NSFK-Komponenten nahmen schneller ab, als es aufgrund der Verdünnung mit

Grundwasser zu erwarten war (Bild 5). Auch bei der SBB-Baustelle, wo die Probenahmen 20–100 m von der Baustelle entfernt stattfanden und das Grundwasser eine Woche bis drei Monate brauchte, um die Piezometer zu erreichen, konnte festgestellt werden, dass die monomeren NSFK-Komponenten zum grossen Teil auf der Fließstrecke eliminiert wurden. Das beobachtete Abbauverhalten der NSFK-Komponenten stimmt nicht nur in den zwei Feldstudien überein. Auch kontrollierte Abbauprozesse im Labor bestätigten, dass die meisten monomeren NSFK-Komponenten abbaubar sind, wohingegen die Oligomere nicht abgebaut werden (Bild 5). Aufgrund wissenschaftlicher Publikationen über den biologischen Abbau von monomeren NSFK-Komponenten kann angenommen werden, dass der biologische Abbau vollständig ist, d. h. die monomeren NSFK-Verbindungen werden vollständig zu Kohlendioxid, Wasser und Sulfat abgebaut.

Die Information über den Bioabbau ergänzt die Stoffflussberechnungen in Bild 4. 80 % der ausgewaschenen NSFK-Komponenten können biologisch abgebaut werden, 20 % verbleiben jedoch im Grundwasser. Im Falle der Baustelle Zürich–Thalwil sind das ca. 20 kg NSFK. Diese 20 kg sind im Grundwasser mobil und persistent. Sie beeinträchtigen die Qualität des Grundwassers und damit die Trinkwasserressourcen nachhaltig.



4

NSFK-Massenflüsse der SBB-Tunnelbaustelle 2. Doppelspur Zürich–Thalwil in absoluten Mengen und in Prozent der total eingesetzten Menge an NSFK (Bild Sabine Ruckstuhl)

## Folgerungen

Die Resultate dieser Studie zeigen an praktischen Beispielen auf, dass Zusatzmittel bei Anwendungen in grundwasserführendem Lockergestein in relevanten Mengen ausgewaschen werden und dass das Verhalten der Komponenten im Grundwasser verschieden ist. Das Beispiel der SBB-Tunnelbaustelle zeigt, dass in der Schweiz die Problematik erkannt wurde und die Gewässerschutzbestimmungen<sup>9,10</sup> Massnahmen in diesem Bereich vorsehen: Die Definition eines Interventionswertes kombiniert mit einem umfangreichen Überwachungsprogramm ermöglichen den Schutz des Grundwassers.

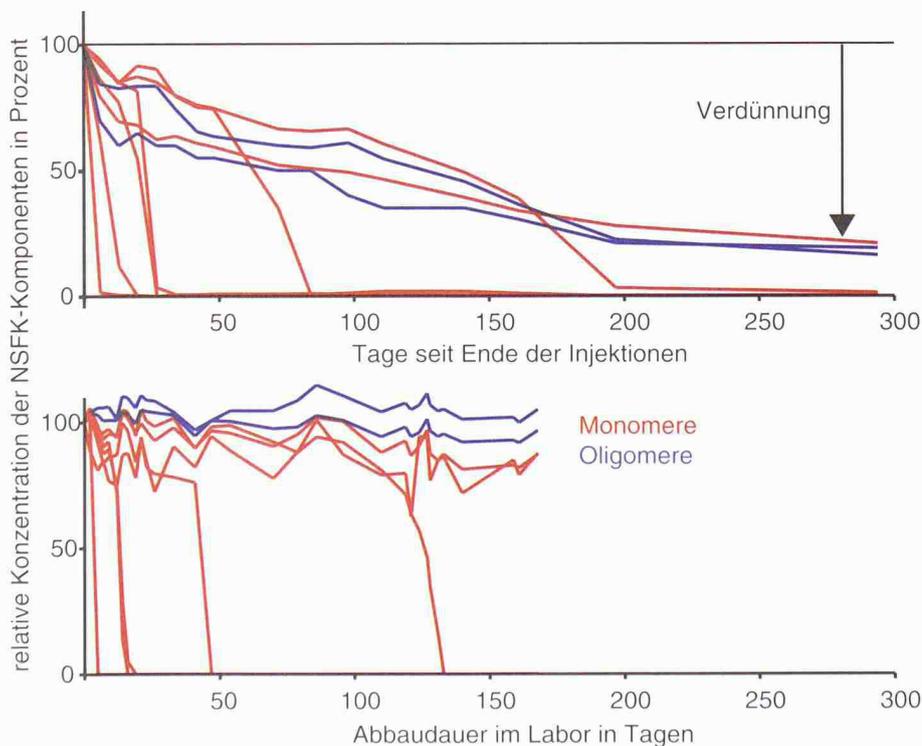
Bei der Anwendung von in kleinen Mengen toxischen Verbindungen ist eine vorgängige Einschätzung der Umweltauswirkungen unbedingt notwendig. Da es sich bei Bauchemikalien um technische Gemische handelt, muss zudem auf Nebenprodukte und Verunreinigungen geachtet werden. Dadurch muss es möglich sein, Unfälle wie jene in Norwegen und Schweden zu verhindern.

Sabine Ruckstuhl doktorte in der Gruppe von Prof. Dr. Walter Giger an der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag)  
Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf

## Literatur/Anmerkungen

- 1 Jacobs, F.: Beton – ein umweltverträglicher Baustoff, Beton- und Stahlbetonbau, S. 352–359 (2000).
- 2 Lange, F.T., Wenz, M., Brauch, H.-J.: Trace-level Determination of Aromatic Sulfonates in Water by On-line Ion-pair Extraction / Ion-pair Chromatography and Their Behavior in the Aquatic Environment. J. High Resol. Chromatogr., 18, S. 243–252 (1995).
- 3 Kaufmann, B.: Tunnelbau vergiftete Trinkwasser. Tages-Anzeiger vom 18. Oktober, S. 14 (1997).
- 4 Spanka, G., Thielen, G.: Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten. Beton, 5, S. 320–327 (1995).
- 5 BMG Engineering AG: Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln, im Auftrag des Fachverbandes Schweizerischer Hersteller von Betonzusatzmitteln (FSHBZ), Zürich (1995).
- 6 Jacobs, F., Allenspach, W., Dormenval, J., Giger, W., Haldimann, U., Mäder, U., Schenk, K., Staub, P.: Umweltaspekte von Beton – Informationen zur Umweltverträglichkeit. Im Auftrag des SIA. Zürich (1998).
- 7 Ruckstuhl, S., Suter, M.J.-F., Giger, W.: Rapid determination of sulfonated naphthalenes and their formaldehyde condensates in aqueous samples using synchronous excitation fluorimetry. Analyst, 126 (11), S. 2072–2077 (2001).
- 8 Ruckstuhl, S.: Environmental Exposure Assessment of Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates and Sulfonated Naphthalenes Applied as Concrete Superplasticizers. Ph. D. Thesis No.14477, ETH Zürich (2001).
- 9 Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer, 814.20 (1992).
- 10 Gewässerschutzverordnung, 814.201 (1992).

Die Untersuchungen der Eawag wurden von der Cemuisse-Stiftung für angewandte Forschung im Betonbau finanziell unterstützt.



5

Biologischer Abbau der NSFK-Komponenten auf der Baregg-Baustelle (oben) und im Labor unter kontrollierten Bedingungen (unten). Die Konzentrationen sind an der jeweiligen Anfangskonzentration normiert. Die fast lineare Konzentrationsabnahme der drei nicht abbaubaren NSFK-Komponenten im Bild oben ist auf die Verdünnung der Schadstofffahne mit Grundwasser zurückzuführen (Bild Sabine Ruckstuhl)