

ZUSAMMENFASSUNG

F 7039

**Bewertung der Umweltverträglichkeit von
Abdichtungs- und Injektionsstoffen**

Projekt Nr. ZP 52-5-20.47-1212/06

Beim Einsatz von Baustoffen wird deren Umweltverträglichkeit zunehmend Beachtung geschenkt. Daher wird auch in den Zulassungsprüfungen der Nachweis der Verträglichkeit für Boden und Grundwasser gefordert. Das DIBt hat hierzu ein Grundsatzpapier herausgegeben (s. /DIB09a/), das die Geringfügigkeitsschwellen (GFS) für das Grundwasser aus /LAW04/ als Bewertungsmaßstab heranzieht. Der Teil I gibt jedoch nur das generelle Nachweiskonzept wieder. Im Teil II sollen die Auslaugversuche und die Bewertung für die einzelnen Baustoffe festgelegt werden. Dieser Teil befindet sich noch in Bearbeitung. Zum Zeitpunkt der Beantragung dieses Forschungsprojekts lag nur für Beton und zementgebundene Baustoffe ein Bewertungskonzept vor, das gerade überarbeitet wurde. In der Zwischenzeit sind Kapitel für Kanalsanierungsmittel und Schleierinjektionen erarbeitet worden /DIB07/, /DIB09b/. Die Bewertung erfolgt bei diesen Stoffen über ökotoxikologische Wirkungstests. Dies ist erforderlich, da die organischen Baustoffe eine Vielzahl von Verbindungen freisetzen können, die z. T. nicht identifiziert sind und deren Wirkungen nicht bekannt sind. Es gibt allerdings auch toxische Verbindungen, die bekanntermaßen ausgelaugt werden und für die z. T. auch eine Geringfügigkeitsschwelle definiert wurde. Bei diesen Stoffen kann die Einhaltung der GFS oder eines äquivalent abgeleiteten Schwellenwerts überprüft werden, wenn ein geeignetes Bewertungskonzept vorliegt. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, für unterschiedliche Bauprodukte und Anwendungsfälle solche Konzepte zu erarbeiten.

Die vorgeschlagenen Bewertungskonzepte basieren auf zwei unterschiedlichen Laborversuchen: einem mehrstufigen Trogversuch für Abdichtungsstoffe (s. Bild 1) und einem inversen Säulenversuch für Injektionsstoffe (s. Bild 2).

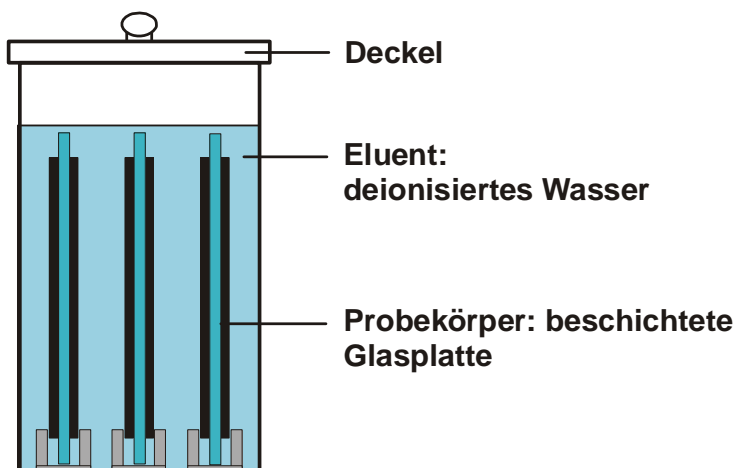


Bild 1: Schematische Darstellung des Trogversuchs

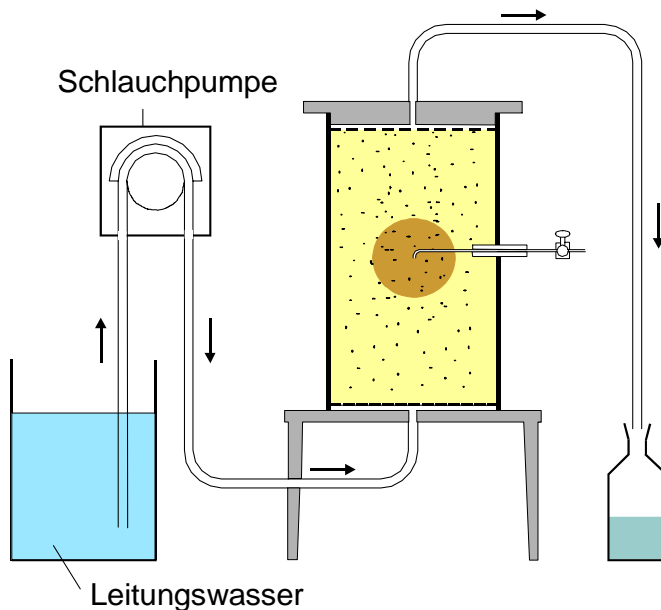


Bild 2: Schematischer Aufbau des inversen Säulenversuchs

In beiden Auslaugversuchen werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Schadstoffkonzentrationen im Eluenten ermittelt. Diese Konzentrationen stimmen jedoch nicht mit den Werten überein, die sich beim Einbau im Grundwasser einstellen. Die Geringfügigkeitsschwellen, die den Maßstab der Bewertung darstellen, gelten jedoch für das Grundwasser, nicht für einen speziellen Auslaugversuch. Daher ist es erforderlich, aus den Versuchsdaten einen Freisetzungsverlauf zu bestimmen und die Konzentration im Grundwasser, das mit dem Baustoff in Kontakt steht, numerisch zu simulieren. Die Grundwasserkonzentration ist von zahlreichen Parametern, wie der Fließgeschwindigkeit und Zusammensetzung des Grundwassers, der Bodenbeschaffenheit, der Temperatur, aber auch von der Bauteilgeometrie, der Größe der Kontaktfläche, der Entfernung zum Bauteil und dem Bewertungszeitpunkt abhängig. Bei der Entwicklung des Bewertungskonzepts für Beton hat man sich darauf verständigt, Adsorptions-, Fällungs- und Abbauprozesse sowie die Retardierung zu vernachlässigen. Es wird jedoch eine zeitliche und räumliche Mittelung der Kontaktgrundwasserkonzentrationen durchgeführt. Für die zeitliche Mittelung werden 6 Monate und für die räumliche Mittelung eine Entfernung von 0 bis 2 m von der Baustoffoberfläche herangezogen. Dieses Vorgehen sollte auch für Abdichtungs- und Injektionsstoffe beibehalten werden.

Betrachtet wurden Bitumenbeschichtungen, ungesättigte Polyesterharze, Acrylatgele, Zementsuspensionen und Polyurethane. Die ersten beiden Baustoffe werden im Trogversuch, die letzten drei im Säulenversuch ausgelaugt. Die Baustoffe werden in der Praxis für unterschiedliche Anwendungsfälle eingesetzt. Dies sollte sich in den Bewertungskonzepten widerspiegeln. Daher wurden unterschiedliche Modellszenarien für die Simulation der Grundwasserkonzentration entwickelt. In Tabelle 1 sind die Szenarien zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Modellszenarien für die Bewertung der unterschiedlichen Abdichtungs- und Injektionsstoffe

Abdichtungs-/ Injektionsstoff	Bauwerk			Kontakt zum Grundwasser
	Art	Größe	abgedichteter Bereich	
1	2	3	4	5
Bitumenbe- schichtungen	Gebäude	Grundfläche: 10 x 10 m ²	Außenwände	Eintauchtiefe: 2 m
Ungesättigte Polyesterharze	Abwasserkanal	Durchmesser: 1,2 m Länge: 100 m	Gesamter Kanal (Inliner)	defekte Fugen
Acrylatgele	Gebäude	Grundfläche: 20 x 40 m ²	Außenwände	Eintauchtiefe: 10 m
Zementsus- pensionen	Injektionssohle	20 x 40 m ²	Sohle	20 x 40 m ²
Polyurethane	Abwasserkanal	Durchmesser: 1,2 m Länge: 40 m	Fugen / Muffen- verbindungen	Injizierte Fugen

Die Bodenbeschaffenheit und das Grundwassergefälle wurden aus dem Bewertungskonzept für Beton übernommen und sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Als Dispersionslänge (longitudinal) wurden i. d. R. 3 m gewählt, nur beim Bitumen-Modell wurde aufgrund der kleineren Abmessungen 1 m angesetzt. Die Diffusionskoeffizienten im Boden wurden parameterspezifisch gewählt.

Tabelle 2: Bodenbeschaffenheit und Grundwassergefälle

Parameter	Bauwerk
1	2
Durchlässigkeitsbeiwert k_f	10^{-4} m/s
Effektive Porosität des Bodens n_e	0,1
Grundwassergefälle i	$1 \cdot 10^{-3}$

Die Schadstoffeinträge aus den Auslaugversuchen wurden an der Oberfläche der Baustoffe in das jeweilige Modellgebiet eingetragen. Dazu wurden anhand der Daten aus dem Trogversuch Zeitfunktionen für die Auslaugrate ermittelt, während die sehr kurzzeitigen Freisetzungen im Säulenversuch durch einen einmaligen Eintrag abgebildet wurden. Da die Abdichtungsstoffe im Trogversuch bei direktem Wasserkontakt ausgelaugt werden, erfolgte hier eine Umrechnung auf die Verhältnisse im wassergesättigten Boden. Analog zum Bewertungskonzept für Beton wurde hierfür die effektive Porosität des Bodens als Umrechnungsfaktor herangezogen. Im Säulenversuch werden die Injektionsstoffe dagegen wie in der Baupraxis in den wassergesättigten Boden injiziert. Eine Umrechnung ist daher nicht erforderlich, die Freisetzung kann direkt als Schadstoffeintrag für die Simulation verwendet werden. Es wurden ausschließlich vorliegende Daten aus der Literatur und aus

Materialprüfaufträgen für die Modellsimulationen verwendet. Insgesamt wurden 41 Transportsimulationen für Bitumenbeschichtungen, 11 für ungesättigte Polyesterharze, 9 für Acrylatgele, 30 für Zementsuspensionen und 7 für Polyurethane durchgeführt.

Das Transportprogramm FEFLOW 5.1 berechnet die Konzentrationen an definierten Beobachtungspunkten im Verlauf der Zeit. Diese lokalen Konzentrationen wurden räumlich gemittelt. Hierfür wurde bei den Modellgebieten für die Bitumenbeschichtungen und die Zementsuspensionen ein Bereich von 2 x 2 m² Größe jeweils an der Stelle der höchsten Konzentrationen im Modellgebiet gewählt. Bei der Fugenabdichtung eines Abwasserkanals (Modelle für ungesättigte Polyesterharze und Polyurethane) erfolgt die Schadstoffausbreitung rotationssymmetrisch. Daher wurde hier die mittlere Konzentration radial über eine Entfernung von 0 bis 2 m an der jeweils letzten Fuge im Modellgebiet bestimmt. Bei dem Modell für die Acrylatgele handelt es sich um ein zweidimensionales Modell, d. h. die Konzentration ist über die Höhe des Grundwasserleiters konstant. Hier wird daher wie im Betonkonzept an der ungünstigsten Stelle über eine Entfernung von 0 bis 2 m gemittelt. Diese räumlich gemittelten Kontaktgrundwasserkonzentrationen wurden anschließend wie im Bewertungskonzept für Beton über einen Zeitraum von 6 Monaten gemittelt. Die so bestimmten mittleren Kontaktgrundwasserkonzentrationen müssen die Geringfügigkeitsschwellen /LAW04/ oder ggf. äquivalent abgeleitete Schwellenwerte einhalten.

Da nicht für jede bauaufsichtliche Zulassung eine Transportmodellierung durchgeführt werden soll, müssen Grenzwerte, d. h. zulässige Freisetzungen, für die Auslaugversuche abgeleitet werden. Zu diesem Zweck wurden die mittleren Kontaktgrundwasserkonzentrationen in Abhängigkeit der Gesamtfreisetzungen im Laborversuch aufgetragen. Dabei ergaben sich Geraden, die durch den Ursprung gehen. Die Steigung der Geraden ist in erster Linie charakteristisch für das Modellgebiet. In Tabelle 3 sind die Gleichungen für die hier betrachteten Auslaugszenarien zusammengestellt.

Tabelle 3: Funktionale Zusammenhänge zwischen mittlerer Kontaktgrundwasserkonzentration und Freisetzung im Auslaugversuch

Modellszenario	Gradengleichung
1	2
Bitumen-Modell	$c_m = 0,27 \cdot E_{56d}$
Modell für die ungesättigten Polyesterharze	$c_m = 0,000213 \cdot E_{56d}$
Modell für die Zementsuspensionen	$c_m = 154 \cdot E_{\text{Säule}}$
Modell für die Polyurethane	$c_m = 2,25 \cdot E_{\text{Säule}}$

c_m : zeitlich und räumlich gemittelte Kontaktgrundwasserkonzentration in µg/l
 E_{56d} : Gesamtfreisetzung über einen Zeitraum von 56 Tagen im Trogversuch in mg/m²
 $E_{\text{Säule}}$: Gesamtfreisetzung im Säulenversuch in mg/kg Injektionsstoff

Für die Acrylatgele wurde keine Gradengleichung abgeleitet, da die Ergebnisse zeigten, dass eine Bewertung der Acrylatgele mit dem vorgeschlagenen Modellszenario nicht sinnvoll ist. Es wurden Überschreitungen der Geringfügigkeitsschwelle für den Parameter Sulfat festgestellt. Daher muss darüber entschieden werden, ob diese Überschreitung toleriert werden kann, und wie dann ggf. die Bewertung erfolgen kann. Des Weiteren wurden

sehr hohe TOC-Konzentrationen berechnet. Für TOC gibt es keinen Grenzwert, es muss jedoch damit gerechnet werden, dass umweltrelevante organische Substanzen (z. B. Triethanolamin) in umweltrelevanten Konzentrationen im Grundwasser auftreten. Bei dem ausgewählten Modellgebiet handelt es sich um einen sehr ungünstigen und unwahrscheinlichen Anwendungsfall. Daher wurde eine Beispielsimulation mit einem realistischeren Szenario durchgeführt: Das Hauptanwendungsgebiet von Acrylatgelen ist die Verpressung einer einzelnen Außenwand eines Wohngebäudes mit schadhafter bituminöser Abdichtung. Für diese Simulation wurde daher das Modellgebiet für Bitumen ausgewählt. Der TOC-Eintrag erfolgte an der im Fließschatten gelegenen Wand. Für den TOC-Eintrag wurde das Acrylatgel mit der höchsten TOC-Freisetzung ausgewählt. Es zeigte sich, dass die zeitlich und räumlich gemittelte TOC-Konzentration in diesem Modellszenario um den Faktor 7,4 geringer ausfällt. Es wurde jedoch immer noch eine mittlere Kontaktgrundwasserkonzentration von über 500 mg/l berechnet. Die Geringfügigkeitsschwelle für Sulfat wird in diesem Modellgebiet eingehalten. Es muss abgewogen werden, ob die bisherige Vorgehensweise bei der Modellierung beibehalten werden soll, oder ob doch biologische und chemische Abbauprozesse für die organischen Stoffe Berücksichtigung finden sollen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der nachgewiesenermaßen guten biologischen Abbaubarkeit der Inhaltsstoffe des Acrylatgels zu sehen. Werden die Abbauprozesse vernachlässigt, so ist es absehbar, dass Acrylatgele die strengen Vorgaben zum Grundwasserschutz nicht erfüllen werden.

Für die Bitumenbeschichtungen, die ungesättigten Polyesterharze, die Zementsuspensionen und die Polyurethane können anhand der Gradengleichungen aus Tabelle 3 zulässige Freisetzungen für beliebige Schadstoffe berechnet werden:

zul E = GFS / m

zul E: zulässige Gesamtfreisetzung im Versuch
(zul E_{56d} in mg/m² bzw. $E_{Säule}$ in mg/kg)

GFS: Geringfügigkeitsschwelle in µg/l

m: Steigung der Gradengleichung aus Tabelle 3

Für die betrachteten umweltrelevanten Stoffe wurden die zulässigen Freisetzungen ermittelt und den maximalen Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Bei den Polyurethanen lagen nur Daten für den TOC und für aromatische Amine vor. Die anderen untersuchten Stoffe (Phenole, Kohlenwasserstoffe und LHKW) waren im Säulenversuch nicht nachweisbar. Da für TOC und für aromatische Amine keine GFS existieren, kann die Kontaktgrundwasserkonzentration nicht bewertet werden.

Bei den Bitumenbeschichtungen lagen die Freisetzungen an PAK, BTEX-Aromaten, Chlorid und Sulfat deutlich unter den zulässigen Werten liegen, allerdings wurde für Phenole der zulässige Wert in drei Fällen überschritten.

Bei den ungesättigten Polyesterharzen wurden die zulässigen Freisetzungen der BTEX-Aromaten um einen Faktor von 50 unterschritten. Die Beeinflussung der Grundwasserqualität durch PAK war noch wesentlich geringer. Dieser Parameter muss bei Kanalsanierungsmitteln aus Polyesterharzen nicht untersucht werden. Bei den BTEX-Aromaten und

bei Styrol ist in den zugrunde liegenden Trogversuchen eine Ausgasung vor Versuchsbeginn und während des Trogversuchs aufgetreten. Dies ist beim Einsatz des Baustoffs als Kanalsanierungsmittel nicht der Fall, da das Produkt im Kontakt mit dem Grundwasser aushärtet. Es ist davon auszugehen, dass bei realistischen Randbedingungen höhere Styrol- und BTEX-Freisetzen auftreten werden. Dies ist im Rahmen weiterführender Forschungsarbeiten zu überprüfen. Weiterhin ist beim Umgang mit ungesättigten Polyesterharzen zu beachten, dass in Einsatzgebieten mit großflächigerem Kontakt zum Grundwasser deutlich höhere BTEX- und Styrol-Konzentrationen auftreten werden.

Bei den Zementsuspensionen wurden die zulässigen Freisetzen für Sulfat, Chrom, Kupfer und Vanadium überschritten. Nur die zulässigen Chlorid- und Molybdän-Freisetzen wurden eingehalten. Hierbei ist zu beachten, dass die Versuche i. d. R. direkt nach der Injektion gestartet wurden. Die Fließgeschwindigkeit im Versuch gibt die Bedingungen in der Praxis nicht wieder. Daher sollte für den Versuch eine Aushärtezeit vorgegeben werden. Eine Zementsuspension wurde zusätzlich nach 24 Stunden Aushärtezeit geprüft. Hier lagen die Freisetzen bei allen Parametern unterhalb der zulässigen Werte. Weiterhin muss eine Konvention für den für die Auslaugung wirksamen Bereich der Injektionssole getroffen werden. Hier wurden 100 mm angenommen, dies ist möglicherweise zu hoch gewählt. Grundsätzlich ist anzumerken, dass eine Injektionssole aus Zementsuspension ein anderes Auslaugverhalten aufweist als die Suspension im Säulenversuch. Die Freisetzung wird ähnlich wie bei Beton über einen längeren Zeitraum erfolgen und mit einer deutlich geringeren Auswaschung zu Beginn der Auslaugung verbunden sein. Insofern stellt das hier beschriebene Bewertungskonzept auf Basis des Säulenversuchs eine Konvention dar und bildet nicht die realen Verhältnisse ab.

LITERATUR

- /DIB07/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser; Teil II: Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte – Kapitel: Kanalsanierungsmittel. Entwurf September 2007, unveröffentlicht
- /DIB08/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser; Teil II: Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte – Kapitel: Betonausgangsstoffe und Beton. Mai 2008
- /DIB09a/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser; Teil I: Allgemeines Bewertungskonzept. In: DIBt Mitteilungen 40 (2009), Nr. 4, S. 116-134
- /DIB09b/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser; Teil II: Bewertungskonzept für spezielle Bauprodukte – Kapitel: Schleierinjektionen. Entwurf April 2009, unveröffentlicht
- /LAW04/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Unterausschuss „Geringfügigkeitsschwellen“: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser. Dez.2004 (verfügbar unter www.lawa.de)