

## Verlagerung straßenbedingter Stoffe mit dem Sickerwasser

FA 5.118

Forschungsstelle: Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie und Biologie (Prof. Dr. G. Wes-solek)

Bearbeiter: Kocher, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Mai 2002

### 1. Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens war die Bestimmung und Bewertung von Sickerwasserkonzentrationsprofilen an stark belasteten, pufferschwachen Straßenstandorten sowie die Erarbeitung und der Test von Verfahren zur Prognose von Schadstoffkonzentrationen und -frachten im Sickerwasser für die spezifische Situation in straßennahen Böden.

Dabei sollte eine einfach zu handhabende Methode zur Abschätzung der Sickerwasser- und Grundwasserbelastung an pufferschwachen verkehrsbelasteten Standorten und ggf. eine Anpassung des Modells SISIM [1] für Untersuchungen nach der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) und zukünftige UVP-Verfahren im Straßenbau erarbeitet werden.

Nach den bisherigen Erkenntnissen in der Literatur führt die Belastung durch straßenverkehrsbedingte Immissionen bei filter- und sorptionsstarken Böden unter Grünland und Acker kaum zu einer Gefährdung des Grundwassers, die Gefahr des Erreichens der Sickerwasserprüfwerte nach der BBodSchV ist eher gering. Dagegen liegen für saure Böden und Böden unter Wald nur wenige Untersuchungen zu verkehrsbedingten Sickerwasserkonzentrationen vor. Auch über die Menge (Fracht) der mit dem Sickerwasser in das Grundwasser transportierten Schadstoffe konnten bislang aus den vorhandenen Informationen keine allgemein gültigen Aussagen abgeleitet werden.

### 2. Untersuchungsmethodik

An acht Standorten wurden über zwei Jahre umfangreiche Gelände- und Laboruntersuchungen durchgeführt. Mit den Messergebnissen wurde ein Vergleich des im Freiland untersuchten Schadstofftransportes im Boden mit dem Stofftransportmodell SISIM durchgeführt.

Die Standortsuche wurde in Absprache mit der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt. Dabei sollten die Standorte folgende Bedingungen erfüllen:

- Die Böden sollten eher humusarm und der Straßenrandbereich ohne kalkeinbringende Baumaßnahmen wie Kalkschotter, Beton oder Ähnliches ausgebildet sein. Die gleiche Lage zur Hauptwindrichtung (Leelage) und ein relativ hoher Grundwasserstand wurden angestrebt.
- Die Hälfte der Standorte sollte auf stark bis sehr stark sauren, sandigen Böden unter Wald liegen, die andere Hälfte auf schwach bis mittel sauren, sandigen Böden unter extensiver Gras- oder Heidevegetation.
- Jeweils die Hälfte der Standorte sollte an Bundesautobahnen und an Bundesstraßen liegen. Die Verkehrsbelastung in den letzten 15 bis 20 Jahren sollte dauerhaft hoch gewesen sein, und es sollten in dieser Zeit keine größeren Umbaumaßnahmen an den Standorten stattgefunden haben.

Die aktuellen Verkehrsstärken sollten ebenfalls hoch sein und mindestens die folgenden Werte aufweisen:

- Autobahn: Verkehrsstärke ca. 50–70000 Kfz/d, vierspurig mit Standstreifen,
- Bundesstraße: Verkehrsstärke 14–20000 Kfz/d, zweispurig ohne Standstreifen.

Untersuchte Stoffe:

- Schwermetalle: *Blei Pb, Cadmium Cd, Kupfer Cu, Zink Zn, Nickel Ni, Chrom Cr,*
- Organische Stoffe: *Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (15 PAK nach EPA und Naphtalin), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Methyl-Tertiär-Butylether (MTBE), Benzol.*

Nachfolgend werden kurz die Untersuchungsansätze und die im Gelände durchgeführten Messungen vorgestellt:

- Beprobung der Bodenlösung in der ungesättigten Zone an allen Standorten in vier Entfernungen vom Fahrbahnrand und zwei Tiefen (im Wurzelraum und unterhalb des Wurzelraums) mit Hilfe von Saugkerzen;
- Beprobung des Wassers im Kapillarsaum mit Hilfe von Schlitzsonden an allen grundwassernahen Standorten; mit diesen Sonden kann das Sickerwasser bei seinem Eintritt in das Grundwasser erfasst werden. Auch die Anpassung an im Jahresverlauf schwankende Grundwasserspiegel ist möglich;
- Wasserhaushaltsuntersuchungen zur Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate durch Messung von Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, sowie im Boden Wasserspannung und Wassergehalt;
- Bromidtracerversuch an einem Standort zur Quantifizierung der räumlichen Verteilung und Infiltrationstiefe des Straßenabflusswassers in Abhängigkeit von Niederschlags- und Abflussmengen;
- Abflusssammlung und Beprobung der Inhaltsstoffe an einem Standort: exemplarische Messungen zur Situation unter heutigen Emissionsbedingungen;
- Ermittlung der bodennahen Gesamtdosition mit Bergerhoffgefäßen, deren Rand 10 cm über der Geländeoberfläche liegt, an einem Standort in vier Entfernungen.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Bodeneigenschaften und Schwermetallgehalte im Bodenfeststoff

Die pH-Werte im Boden nehmen an allen Standorten in den ersten zehn Metern vom Fahrbahnrand ab. Das Spektrum reicht von Werten um pH 7.5 in 1 m Entfernung bis zu Werten unter pH 4.0 in 10 m Entfernung. Die Verteilung des organischen Kohlenstoffs ist teilweise mit den bodenbildenden Prozessen verknüpft, zeigt aber durch die baubedingte Ablagerung humosen Materials an den verschiedenen Standorten keine einheitliche Tendenz.

Das Vorhandensein erhöhter Schwermetallkonzentrationen in Straßenrandböden ist in der Literatur umfassend dokumentiert. Im Allgemeinen sind die Konzentrationen auch in dieser Untersuchung im Oberboden in Fahrbahnnähe am Höchsten und fallen im untersuchten Bereich bis 10 m relativ schnell ab. Nur im Unterboden (100 bis 200 cm Tiefe) ist gewährleistet, dass nicht mehr als zehn Prozent der Schwermetallgehalte aller untersuchten Bodenhorizonte die Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung überschreiten. Dagegen liegen in 0 bis 10 cm Tiefe die Konzentrationen von Cu, Cd, Zn und Pb in Fahr-

bahnnahe meist um oder über dem Vorsorgewert, bei Nickel sind es etwa 30 % aller Messwerte, ebenfalls meist in 1 m Entfernung von der Fahrbahn, bei Chrom keiner. Die Maßnahmenwerte der BBodSchV (Pb, Cd, Cu und Ni im Königswasser-Extrakt aus 0 bis 10 cm Bodentiefe) für den Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität werden trotz der hohen Verkehrsbelastungen an keinem der Standorte und Bodenprofile erreicht.

### 3.2 Schwermetalle in Sickerwasserproben

Anhand der Verteilung der pH-Werte zum Fahrbahnrand und des Verhaltens der Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser zum pH-Wert zeigt sich, dass in Straßennähe (1 bis 2,5 m) auch bei sauren Böden der pH-erhöhende Einfluss der Straße groß genug ist, um die Lösungskonzentrationen der Schwermetalle gering zu halten. Dies stimmt mit Ergebnissen anderer Untersuchungen überein [4]. Nur für die 90-Perzentile der Stoffe Cd, Cu, Zn und Ni sind Werte in der Nähe oder oberhalb der Prüfwerte der Bodenschutzverordnung festzustellen. Das heißt, dass bei den Feldmessungen i. A. über 90 % der Messwerte unterhalb der Prüfwerte liegen.

In größerer Entfernung kann die gegenläufige Tendenz von pH-Wert und Schwermetallkonzentrationen im Bodenfeststoff zu teilweise weit über dem Prüfwert liegenden Sickerwasserkonzentrationen führen. Dies trifft insbesondere für die Metalle Cadmium, Kupfer und Zink an mehreren Messstellen zu. Dort liegen die Sickerwasserkonzentrationen direkt hinter dem Waldrand weit über denjenigen an den nicht verkehrsbelasteten Referenzmessstellen Fuhrberger Feld und Grunewald.

### 3.3 Schwermetallfrachten

Problematischer als die Konzentrationen der Schwermetalle zeigen sich die berechneten Sch w e r m e t a l l a u s t r ä g e, die mit der Bodenlösung transportiert werden. Auf Grund der in Straßennähe sehr hohen Versickerungsraten mit 13- bis 18-fach höherer Grundwasserneubildungsrate im ersten Meter neben der Fahrbahn (BAB) werden dort trotz relativ niedriger Konzentrationen teilweise hohe Frachten in den Untergrund transportiert. Durch die niedrigeren pH-Werte und damit relativ hohe Lösungskonzentrationen weist auch der Vergleichspunkt in 10 m Entfernung an einigen Standorten hohe ausgetragene Frachten auf, vor allem für Cadmium und Zink an Waldstandorten.

Eine Betrachtung von Einträgen, die im Rahmen der Waldschadensforschung ermittelt wurden, zeigt, dass in Waldbeständen die Deposition auf Grund der Filterwirkung der Bäume gegenüber dem Freiland stark erhöht ist. In [3] wird etwa eine Verdoppelung der Frachten von Schwermetallen je Flächeneinheit und Jahr ausgewiesen. An exponierten Stellen wie Waldrändern, die leewärts von Emissionsquellen liegen, können noch höhere Werte erreicht werden. Dies trifft hier auf einen Waldstandort zu, wo die hohen Boden- und Bodenlösungskonzentrationen auch zu hohen Austragsraten in 10 m Entfernung vom Fahrbahnrand beitragen. Trotzdem sind die Austräge dort bei weitem nicht so hoch wie in der Infiltrationszone am Fahrbahnrand.

An einem Autobahnstandort wurden die Sch w e r m e t a l l e i n t r ä g e durch Deposition und Straßenablaufwasser untersucht. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Einträge an den anderen Autobahnstandorten etwa in derselben Größenordnung liegen wie an diesem. Da an allen BAB-Standorten und auch manchen untersuchten Bundesstraßen die Bodenkonzentrationen in 0-10 cm Tiefe die Vorsorgewerte für Pb, Cd, Cu, Ni und Zn in Fahrbahnnahe, zum Teil bis über 10 m Entfernung, überschreiten, sind nach der BBodSchV die Frachtgrenzwerte für Einträge gültig. Dies bedeutet eine Verpflichtung zur M i n d e r u n g der Einträge von Pb, Cd, Cu und Zn, da die Fracht-

grenzwerte für diese Schwermetalle in der Infiltrationszone, für Cd und Zn auch in größerer Entfernung überschritten werden. Für Stoffausträge aus Böden bestehen keine Frachtgrenzwerte.

Im § 7 des Bodenschutzgesetzes werden Grundstückseigentümer und -nutzer verpflichtet, Vorsorge zu treffen, dass auf ihrem Grundstück, aber auch in dessen Einwirkungsbereich, keine schädliche Bodenveränderung entsteht: "Zur Erfüllung der Vorsorgepflicht sind Bodeneinwirkungen zu vermeiden oder zu vermindern, soweit dies auch im Hinblick auf den Zweck des Grundstückes verhältnismäßig ist". Dazu schreibt das Bundesumweltministerium in der Begründung zur Bodenschutzverordnung: "Im Fall des Überschreitens von festgesetzten Vorsorgewerten hat der Verpflichtete Vermeidungs- oder wirksame Verminderungsmaßnahmen zu ergreifen. Die Erfüllung dieser Pflicht ist allerdings durch den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz begrenzt... So müssen z. B. bei Verkehrswegen bestimmte Schadstoffeinträge und -gehalte als unvermeidlich hingenommen werden, ohne dass eine Überschreitung von Vorsorgewerten entsprechende Minderungsmaßnahmen auslösen könnte." (BMU 1998)

Eine umfassende europäische Studie [5] kommt zu ähnlichen Mess- und Berechnungsergebnissen wie diese Arbeit. Dort wird der Schluss gezogen, dass eine Minderung der Emissionen ("source control") die einzige Möglichkeit zur Reduzierung der Verbreitung und der Einträge der Schadstoffe sei.

### 3.4 Beprobung organischer Schadstoffe im oberflächennahen Grundwasser und im Boden

Außer den alle drei Monate durchgeführten MKW-Analysen wurden orientierende Beprobungen des Wassers aus dem Kapillarsaum auf PAK, Benzol und MTBE an mehreren Terminen durchgeführt. Bei Benzol und MTBE traten keine Werte über der Nachweisgrenze auf, bei den PAK nur wenige. Die einzige Substanzgruppe, die einige Male den Prüfwert überschritt, sind Mineralölkohlenwasserstoffe. Die Zahl der Überschreitungen der Sickerwasserprüfwerte war jedoch gering, 90 % der Messwerte blieben unterhalb der Prüfwerte. An den betroffenen Standorten scheint vor allem das Auftreten von Staus eine Rolle zu spielen.

In der vorliegenden Arbeit überschritten nur wenige Bodenproben die Bestimmungsgrenze von 25 mg/kg MKW, der höchste gemessene Wert war 62 mg/kg. Für Bodenkonzentrationen von MKW existiert in der Bodenschutzverordnung kein Vorsorge- oder Prüfwert. Nur zwei der Werte überschreiten knapp den Referenzwert S für Bodenqualität der Niederländischen Liste (50 mg/kg) und sind weit vom Interventionswert I (5 000 mg/kg) entfernt.

### 3.5 Vergleich der Prognosemöglichkeit durch Abschätzungen aus Feldmessungen und Berechnungen mit SISIM

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Übereinstimmung von gemessenen und mit SISIM berechneten Konzentrationen in der Bodenlösung nicht gut getestet werden konnte. Ein wichtiger Grund dafür war, dass die berechnete Bodenlösungskonzentration zum Zeitpunkt  $t = \text{null}$  nicht verfügbar ist. Da das Modell außerdem keine ausreichende Berücksichtigung der ständigen Stoffeinträge an Straßenrändern erlaubt, lässt sich die Entwicklung der längerfristigen Grundwasserbelastung mit SISIM für Kupfer nicht sehr gut abschätzen. Für Cadmium erscheint der Unterschied zwischen der einfachen Abschätzung aus den aktuell gemessenen Konzentrationen in der Bodenlösung und den mit SISIM berechneten Frachten weniger gravierend.

### 3.6 Wirkung des Systems Straße auf den Wasser- und Stofftransport

#### Wasserhaushalt

Die versiegelten Bereiche der Straßen verursachen einen starken Anstieg des Oberflächenabflusses und Spritzwassers. Der Oberflächenabfluss versickert i.d.R. in einer ca. 1 m breiten Infiltrationszone und erhöht die natürliche, bodenbürtige Grundwasserneubildung um das 13- bis 18-fache. Das Spritzwasser beeinflusst eine ca. 4 m breite Zone neben dem Fahrbahnrand und erhöht dort die Grundwasserneubildung um ca. 30–35 %.

#### Deposition

Direkt am Fahrbahnrand tritt sehr hohe bodennahe Deposition auf, vor allem an Cd, Cu, Zn. Mit zunehmender Entfernung von der Straße nimmt die trockene und nasse Deposition ab.

#### Bodenfeststoffkonzentration

Verkehrsreiche Straßen verursachen linienförmige Bodenkontaminationen entlang der Straße. Wie schon aus der Literatur gut dokumentiert, überschreiten die Bodenfeststoffgehalte vor allem in direkter Straßennähe häufig die Vorsorgewerte nach dem Bundesbodenschutzgesetz. Das betrifft Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Zink im Oberboden an Autobahnen, selten an Bundesstraßen. Im Unterboden (1 bis 2 m Tiefe) sind Blei, Nickel und Zink nur an wenigen Stellen betroffen. Es handelt sich dabei um Standorte mit sehr alter Kontamination oder mit etwas stärker sorbierenden Böden.

#### Bodenlösungskonzentration

Die Lösungskonzentrationen der Schwermetalle sind auch auf sauren Sandböden in Straßennähe (in der Infiltrationszone) als verhältnismäßig unproblematisch nach dem Bundesbodenschutzgesetz einzustufen. Dort treten meist niedrige Konzentrationen auf Grund der hohen pH-Werte im Oberflächenabfluss der Straße auf. Als kritische Elemente für erhöhte Konzentrationen in der Bodenlösung haben sich Kupfer, Cadmium und Zink herausgestellt, dabei treten die erhöhten Werte in 5 bis 10 m Entfernung vom Fahrbahnrand auf (im Spritzwasserbereich und vor allem außerhalb des Spritzwasserbereiches). Die Belastung mit organischen Schadstoffen ist als unproblematisch anzusehen.

#### Stofffrachten

Trotz langjähriger Belastung haben die Austräge an Schwermetallen noch nicht die Menge der Einträge erreicht. Durch die hohen Wasser- und Stoffeinträge findet in Fahrbahnnähe allerdings ein höherer Transport statt. Die Simulationsergebnisse von SISIM für Cd und Cu weisen in dieselbe Richtung. Im Vergleich zu den Referenz-Waldstandorten ist der Austrag von Ni praktisch nicht erhöht. Der Austrag von Cd, Zn, und Cr ist in der Infiltrationszone, an drei bis vier Standorten auch in größerer Entfernung, deutlich erhöht. Pb sowie insbesondere Cu wiesen fast flächendeckend höhere Austräge auf als an den Referenzstandorten.

Für alle untersuchten Schwermetalle liegen die ausgetragenen Frachten, gewichtet über die Fahrbahnbreite und 10 m angrenzendes Gelände, im Mittel der Autobahnstandorte höher. Der Unterschied ist sehr deutlich feststellbar bei Cd und Cu, von denen an den Autobahnen etwa die doppelte Menge in g/ha\*a ausgetragen wird wie an den Bundesstraßen. Bei Ni und Cr ist der Unterschied nur schwach ausgeprägt.

## 4. Ausblick und Empfehlungen

### 4.1 Forschungsbedarf

1. Aus den hier gemessenen Bodenlösungskonzentrationen und Abflussmengen sind unter den hiesigen Klimabedingungen Abschätzungen der zu erwartenden Frachten auch über längere Zeiträume möglich.
2. Das Modell SISIM sollte in Bezug auf die Eingabe von kontinuierlichem Eintrag, Berechnung von Sickerwassermengen und Sorptionseigenschaften durch bessere Regionalisierungsansätze und -parameter verbessert werden.
3. Minderungspotenziale für die Freisetzung von Cadmium, Kupfer und Zink durch den Straßenverkehr sollten quantifiziert werden.

### 4.2 Empfehlungen für die Praxis (Autobahnmeistereien, Planung von Bundesfernstraßen und Autobahnen)

- Bei sandigen, sauren Straßenrandböden sollten kalk- und tonhaltige Materialien zur Verbesserung der Sorptionseigenschaften oberflächlich in die Infiltrations- und Spritzwasserzone eingebracht werden. Beim Einbau von feinkörnigem Material in das Bankett könnten nichtquellende Tonminerale in Frage kommen (Vermeidung von Frostschäden). Beim Straßenbau sollte die Straßendecke bzw. der Steinanteil darin möglichst karbonathaltig sein.
- Auch eine Beimengung von karbonathaltigem Material beim Winterdienst bzw. eine getrennte Aufbringung wäre denkbar. Besonders zu beachten wäre dabei die Spritzwasserzone und der angrenzende Bereich, bei Autobahnen bis über 10 m Entfernung.
- Die Menge sollte so bemessen sein, dass a) die Infiltrationsleistung nicht merklich eingeschränkt und b) eine ausreichend lange Verbesserung der Sorption bzw. Fällung von Schwermetallen sichergestellt wird. Dazu sind Labor- und Feldversuche erforderlich, um Art und Menge von Materialien zu testen. Mit Hilfe von Simulationsmodellen kann die langfristige Wirkung abgeschätzt werden. Positive Erfahrungen dieser Art konnten bei ähnlichen Problemen mit der Sicherstellung hoch belasteter Rieselfeldflächen in Berlin/Brandenburg gemacht werden.

#### Schrifttum

- [1] ARGE Fresenius-focon (1997): UMS-System zur Altlastenbeurteilung – Instrumente für die pfadübergreifende Abschätzung und Beurteilung von altlastenverdächtigen Flächen. Abschlussbericht FE-Vorhaben 109 01 215 "Wissenschaftliche Begleitung und Fortentwicklung eines Gefährdungsabschätzungsmodells für Altlasten" (UFORPLAN) im Auftrag des Umweltbundesamtes, 123 S. m. Anhang
- [2] BMU (9/1998): Begründung zur Bodenschutzverordnung, 88 S.
- [3] Bredemeier M., Ulrich B., Schultz R. (1988): Belastung von Waldböden durch Stoffeinträge und ihre Folgewirkungen für Waldökosysteme; in: Rosenkranz, Bachmann, Einsele, Harreß (Hrsg.): Bodenschutz, ergänzbares Handbuch, Erg.Lfg. XI/88, Nr. 4160. Erich-Schmidt-Verlag
- [4] Dierkes C., Geiger W.F. (1999): Dekontaminierende Wirkung belebter Bodenzonen bei verkehrsbedingten Beeinträchtigungen der Bodenqualität. Forschungsbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen FE 5.107/1996/GGB. 174 S.
- [5] Hird et al. (2000): POLMIT – Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanisms, Pathways and Mitigation Measures. FEHRL Report 2001/1 – Executive Summaries of research completed: 1997-2000, S. 57-64. FEHRL – Forum of European National Highway Research Laboratories. □