

Umweltbeobachtung

# Bilanzbericht Bruchsal 2003

Umweltbilanz und Umweltprognose Forstwirtschaft und Verkehr  
- Ergebnisse vom Intensiv-Monitoring Bruchsal, Gemeinde Forst  
(Baden-Württemberg). Stand Januar 2004

**UMEG Zentrum für Umweltmessungen,  
Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-  
Württemberg\***



Im Jahr 1992 wurde von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) die Intensiv-Bodendauerbeobachtungsfläche Forst bei Bruchsal (BDF II Forst) zur Bodenüberwachung eingerichtet. Ein Schwerpunkt lag zunächst bei Bodenuntersuchungen und Entwicklung von Methoden zur ergänzenden Stoffflussbeobachtung. Seit 2001 betreibt die UMEG die Fläche in Kooperation mit der LfU und durch Einbezug weiterer Messdaten (z.B. Luftmessstelle Bruchsal) als Intensiv-Messstelle für die Umweltbeobachtung (siehe LfU 2003). Die UMEG strebt den weiteren Ausbau der Messstelle sowohl im landesweiten als auch im europäischen Verbund an (z.B. Kooperationsprogramm UN ECE „Integrated Monitoring“), um Synergieeffekte sphärenübergreifender Umweltbeobachtungen zu nutzen.

Die von der LfU erstmals 1992 beprobte Bodendauerbeobachtungsfläche einschließlich der durchgeführten Arteninventuren bilden den Grundstein der Umweltbeobachtung am Standort Bruchsal, denn über das „Langzeitgedächtnis Boden“ lassen sich die modellgestützten Stoffflussbilanzen langfristig, d.h. über Dekadenzeiträume, kalibrieren. Die Qualität künftiger Umweltprognosen wird hierdurch maßgeblich verbessert.

Im folgenden wird für die Intensiv-Messstelle Bruchsal eine erste und in Teilen grobe Umweltbilanz vorgelegt.

Ausgangspunkt waren und sind Stoffbilanzen. Um diese sinnvoll zu interpretieren und Prognosen für Veränderungen bestimmter Medien abzuleiten hat sich herausgestellt,

## Inhalt

Material und Methoden	2
Grobheit der ersten Bilanz	4
Erläuterungen Bilanztabelle	4
<b>1 Phasen</b>	<b>5</b>
1.1 Feststoffe	5
1.2 Wasser	6
1.3 Gas	7
1.4 Energie	7
1.5 Biota	7
<b>2 Hauptstoffe</b>	<b>9</b>
2.1 C Kohlenstoff	9
2.2 N Stickstoff	10
2.3 P Phosphor	12
2.4 S Schwefel	13
2.5 Cl Chlorid	14
2.6 Si-Al-Fe-Mn	15
2.7 Ca-Mg-K-Na	16
<b>3 Säuren</b>	<b>18</b>
<b>4 Anorganische Spurenstoffe</b>	<b>22</b>
4.1 As Arsen	22
4.2 Cd Cadmium	23
4.3 Co Cobalt	25
4.4 Cr Chrom	26
4.5 Cu Kupfer	26
4.6 Hg Quecksilber	28
4.7 Ni Nickel	29
4.8 Pb Blei	30
4.9 Sb Antimon	31
4.10 Tl Thallium	32
4.11 Zn Zink	33
4.12 PGE Platingruppenelemente (Rh, Pd, Pt)	34
<b>5 Organische Spurenstoffe</b>	<b>35</b>
5.1 PAK Polyzyklische aromatische Kohlenw.	35
5.2 PCB Polychlorierte Biphenyle	37
5.3 PCDD/F Polychl. Dibenzo-p-dioxine u. -furane	38
5.4 MTBE Methyltertiärbutylether	39
5.5 BTX Benzol, Toluol und Xylol	39
5.6 Phthalate	40
5.7 Pestizide	40
<b>6 Umweltprognosen</b>	<b>41</b>
6.1 Außenbereich	41
6.2 Verkehrsbereich	44
<b>7 Fortschreibung der Umweltbeobachtung</b>	<b>45</b>
7.1 Landesweit	45
7.2 Bruchsal	45
<b>7 Literatur</b>	<b>46</b>

\* Die UMEG dankt dem AK N-Bilanz und AK Säurebilanz i.G. (Stand 2003) für wertvolle Hinweise und Kommentare.

dass 1. ein medienübergreifender Ansatz notwendig ist und 2. der Feststoff-, Wasser-, Gas- und Energiehaushalt sowie der Artenbestand mit berücksichtigt werden müssen. Diese Zusammenschau wird im folgenden als **Umweltbilanz** verstanden. Die daraus abgeleitete Umweltprognose dient auch als wissenschaftliche Grundlage für die Fortschreibung der Umweltbeobachtung.

Der Schwerpunkt des Bilanzberichts Bruchsal 2003 liegt bei Feststoff-, Wasser- sowie ca. 30 Stoffflussbilanzen und stützt sich auf Messdaten von Klima-, Luft-, Depositions-, Pflanzen-, Boden- und Wasserbeobachtungen. Dabei gehen die Arteninventur sowie die über 10 Jahre erhobenen Messdaten des Standorts selbst sowie Messdaten sektoraler Messnetze und Kataster des Landes Baden-Württemberg ein [siehe Onlinejournal]. Die Bilanz zielt auf mehrjährige durchschnittliche Verhältnisse ab (Dekade). Der Bilanzbericht dient der

- (1) Beschreibung der forstwirtschafts- und autobahnbetriebsbedingten langfristigen Stoffflüsse und Umweltveränderungen,
- (2) Herleitung von Umweltprognosen und der
- (3) Fortschreibung der Umweltbeobachtung.

### Material und Methoden

Der Bilanzraum liegt neben der A5 (100.000 Kfz/Tag) und teilt sich horizontal in den Randstreifen 0-10 m (Bilanzraum 1: begrünter Seitenstreifen) und 15-20 m (Bilanzraum 2: forstwirtschaftliche Nutzung; im Bereich 10-15 m liegt ein Wirtschaftsweg).

Die messtechnischen Methoden, die Chronik der Messeinrichtungen sowie die sektoralen Messergebnisse von Einzeljahren sind in den

### Eckdaten Intensiv-Messstelle Bruchsal

**Ziel** Umweltbilanz an einer Autobahn mit 100.000 Kfz/Tag

**Lage** Gemarkung Forst, R-Wert 3469860, H-Wert 5450255

**Raumeinheit** Nördlicher Oberrhein; schwach podsolige Braunerde aus Sand, mäßig trocken, GW 1-3 m u. GOK; Nutzung Forst

**Verkehrseinfluss** Bau der A5 1936/37; 1965 Erweiterung um dritte Spur; zusätzlicher Standstreifen 1974/75; Ausbau mit Zementbeton; Verkehrszählung 04.1992 93.000 Kfz/Tag, davon 18.000 Lkw

**Beteiligte** LfU: Ersteinrichtung 1992, Betrieb bis 1996; UMEG Betrieb im Auftrag seit 1996; seit 2001 gesetzliche Aufgabe; F&E-Projekte, Uni Karlsruhe, Uni Tübingen, LfU

**Ausstattung** (Stand 2003)

Atmosphäre: Klimamessstelle, Adsorbersammler (PAK), Trichter-Flasche-Sammler, Passivsammler (zeitweise)  
 Biosphäre: Streusammler; Bestandsdaten von Ökol. Dauerbeobachtung (LfU)  
 Hydrosphäre: Glassaugkerzen in 4 Tiefen, Bestandsniederschlagsrinne, Wasserhaushaltssonden; Grundwasserdaten aus Messnetz (LfU)  
 Pedosphäre: Profilgrube; Transektflächen 0-100 m und Wiederholbeprobungsfläche 14-18 m, Bodendauerbeobachtungsdaten von LfU übernommen

**Chronik** 1992 Erste Inbetriebnahme, 1. Bodeninventur; 1995 2. Bodeninventur; 1996 Betriebsübernahme durch die UMEG; 1998 3. Bodeninventur, Umstellung der Datenerfassung, Grundwasser-Pegel; 2001 Erweiterungen, 4. Bodeninventur; 2003 Rückbau des Betonschachtes von 2,5 auf 1 m Tiefe wg. ansteigendem Grundwasser



jeweiligen Journalbeiträgen dargestellt. Für die vorliegende erste Umweltbilanz wurden folgende Vereinfachungen und Konventionen getroffen:

- (1) Hauptbilanzziel ist der Boden in 0-1 m Tiefe.
- (2) Soweit mehrjährige, methodisch vergleichbare Zeitreihen von Stoffflussmessungen vorhanden sind, werden hier Mittelwerte dargestellt. In einigen Fällen sind Stichproben aus Einzeljahren oder nur die Messdaten der verlässlichsten Methode zu Grunde gelegt. Die jeweilige Grundlage ist über den Journalverweis nachvollziehbar. Für sektoral spezifische Trends wird auf die Journalbeiträge verwiesen.
- (3) Die Historie des Bodens im Randstreifen 0-10 m ist nicht vollständig rekonstruierbar. Für überschlägige Abschätzungen der jährlichen historischen Anreicherungsmassen wird eine rechnerische Emissionsdauer von 25 Jahren angesetzt. Dies ist eine grobe Näherung unter Berücksichtigung der diversen Fahrbahnerweiterungen (siehe Eckdaten) und nicht rekonstruierbaren Bodenumlagerungen, des geringen Verkehrsaufkommens in den Anfangsjahren und sinkenden Emissionen in den letzten 10 Jahren. Die Mehrzahl der geschätzten Emissionsmassen ist zwischenzeitlich durch Boden-Wiederholbehebungen abgesichert, so dass die „25-Jahre-Annahme“ keine maßgeblichen Effekte auf die Umweltprognosen hat.
- (4) Der Gesamteintrag in den Wald wurde nach dem „Ulrichmodell“ berechnet (hier: Atmosphärische Freiland-Deposition mal „Na-Faktor“ 3 für alle Stoffe). Der Modellierungsansatz ist noch unbefriedigend.
- (5) Die metergenaue Entfernungsabhängigkeit der verkehrsbedingten Stoffanreicherung im Boden ist in der U72 dargestellt. Die Entfernungen wurden hier der Übersicht halber grob den 2 Entfernungsklassen 0-10 m (hier entspricht 1 km einem ha; Ort der maßgeblichen Stoffanreicherung, vgl. Reutter 1992/2004) und 15-20 m zugeordnet.
- (6) Die forstwirtschaftlichen und pflanzenphysiologischen Bilanzierungsgrößen (z.B. Ernteentzug, Wurzelaufnahme) wurden in dieser Bilanzausgabe grob aus Literaturangaben geschätzt.
- (7) Bedingt durch die Waldrandlage sind die Ergebnisse nur eingeschränkt auf ganze Forstflächen übertragbar (aerodynamische Rauigkeit).
- (8) Für die Beurteilung der atmosphärischen Stoffeinträge wird ein pedogener bzw. geogener Stau-beintrag von 100-200 kg Staubniederschlag/ha a angenommen. Dies entspricht in etwa den ländlichen Hintergrundverhältnissen. Die Annahme, dass dies weitgehend Boden-Feinstaub ist, beruht auf der Erkenntnis, dass die typischen Stoffkonzentrationen im Staubniederschlag in diesen Proben den Stoffkonzentrationen von Boden-Staub sehr ähnlich sind [U12].

IDs Umweltbeobachtung (Auszug)\*

	U13	Beurteilungsgrundlagen
Standort	U31	Beobachtungsziel & Raumbeschreibung
	U32	Messchronik
	U33	Messplanung
Methoden	U21	Methoden Atmosphäre
	U22	Methoden Biosphäre
	U23	Methoden Hydrosphäre
	U24	Methoden Pedosphäre
	U25	Methoden Technosphäre
	U26	Methoden Bilanzen
Atmosphäre	U41	Klima & Verdunstung
	U42	Niederschlagsbeschaffenheit
	U43	Luftbeschaffenheit
	U45	Frachten in die Atmosphäre
Biosphäre	U51	Inventuren
	U52	Beschaffenheit chemisch
	U55	Frachten in/der Biosphäre
Hydrosphäre	U61	Wasserhaushalt
	U62	Wasserbeschaffenheit
Pedosphäre	U71	Bodenphysik
	U72	Bodenchemische Beschaffenheit
Bilanzen	U93	Stoffhaushalt und Umwelt

\* geändert nach Katalog der LUBW (Stand Juni 2009) siehe

ID Umweltbeobachtung unter

<http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/5121/>

**Grobheit der ersten Bilanz**

Die erste Umweltbilanz ist im Hinblick auf folgende Punkte vorläufig bzw. grob:

- (1) Die Depositionsdaten für anorganische Spurenstoffe werden wg. Methodenumstellung geändert (Neuer Bezug hier: Messjahr 2003).
- (2) Die Herkunft des Staubbiederschlages wird durch eine Reihe von Indizien begründet und nicht durch echte Belege.
- (3) Der Stofftransport durch Pflanzen und Tiere (Biotransport) wurde nur grob berücksichtigt.
- (4) Der Stofftransport über die Gasphase wurde nicht ausreichend berücksichtigt (z.B. PAK, Hg).
- (5) Präferentielles Fließen beim Sickerwasser wurde nicht berücksichtigt.
- (6) Die Bilanzdaten im Raum 0-10 m, dem maßgeblichem Raum der Anreicherung verkehrsbedingter Schadstoffe, stützt sich nahezu ausschließlic auf Bodenmessungen, die nur sehr grobe Schlussfolgerungen zulassen.

**Erläuterungen Bilanztabelle**

Tiefe [cm]	Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung
	Pool <sub>...</sub> [t/km a]	Change [t/km a]	Change % vP/a	Pool <sub>...</sub> [t/ha]	Pool <sub>...</sub> [t/ha]	Input [t/ha a]	Output [t/ha a]	Change [t/ha a]	
XX [g/...]									
Atmosphäre Luft >0,1 m	-	-	-	67.000	-	-	2,1	-	-
Biosphäre Blätter 15-0,1 m	-	-	-	23	-	3,3	-	-	-
Biosphäre Holz 15-0,1 m	-	-	-	667	-	-	2,5	0,8	-
Pedosphäre Auflage 0,1-0 m	-	-	-	66	-	2,5	14,5	-12,0	-18,8%
Ah-Hor 0-0,1 m	6.510	220	3,4%	3.095	9	14,5	5,9	8,6	0,3%
Al 0,1-0,3 m	13.950	-	-	4.604	23	5,9	4,0	1,9	<0,1%
fGo-Al 0,3-0,6 m	-	-	-	7.690	18	4,0	5,1	-1,1	<0,1%
fGo-Bt 0,6-1,1 m	-	-	-	34.355	180	5,1	1,4	3,7	<0,1%
Hydrosphäre >1,1 m	-	-	-	-	-	1,4	-	-	14
Summe	20.460			49.810				1,9	<0,1%

Abkürzungen

- A Oberboden
- G Grundwasserbeeinflusster Mineralboden
- h humos
- l tonverarmt
- t tonangereichert
- f fossil/reliktisch
- o oxidiert/rostfleckig
- r reduziert/grau-grün gefärbt

Liste der Anmerkungen (rechte Spalte)

- 1 keine Bilanz, da die Wurzelaufnahme noch nicht berücksichtigt wurde
- 2 Streufallfracht (UBA 2003a; 90.P) plus Bestandsfracht NO<sub>3</sub>-N plus NH<sub>4</sub>-N
- 3 nur Daten 1996
- 4 Gesamteintrag nicht berechnet, da gasförmige Deposition (nicht gemessen) maßgebliche Bilanzgröße
- 5 Streufallfracht (UBA 2003a; 90.P) plus Bestandsfracht Sulfat-S
- 6 NH<sub>3</sub>-Adsorption kann zu deutlich höheren Einträgen führen; als N-Gehalt der Streu wurden 10 kg N/ha a angesetzt.
- 7 keine Streudaten berücksichtigt
- 8 BZE-Daten für Blätter und Nadeln (UBA 2003a; 90.P)
- 9 Pflanzenentzug führt zu zusätzlichem Entzug -> tatsächliche Vorratszunahme fällt geringer aus und Vorratsabnahme fällt stärker aus
- 10 Bergerhoff-Daten 2003 verwendet
- 11 nur Streufracht mal 1,5 Zuschlag für nicht erfassten Bestandsniederschlag
- 12 ermittelt über Messung 1996 mal Sickerung von ca. 100 l/m<sup>2</sup>
- 13 Eintrag Kehl 1998 (vergleichbare Immissionsituation): 0,14 g PCB/ha a mal Na-Faktor 3 zuzügl. Streufallfracht 0,06 g/ha a

# 1 Phasen

Eine Umweltbilanz muss neben den Stoffflüssen auch die Veränderungen und Umsetzungen der Phasen Feststoffe, Wasser, Gas, Energie und Biota berücksichtigen. Der thematische Schwerpunkt dieser Ausgabe liegt bei den Feststoff- und Wasserbilanzen.

## 1.1 Feststoffe

### Vorbemerkung

Ackerbaubedingte Bodenstäube, Wüstenstäube, Abriebe von Gebäuden und Wegen oder andere Feststoffe, die der mittleren geochemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Erdkruste ähneln (geogene/pedogene Stäube) werden am Sedimentationsort nicht zu einer Aufkonzentrierung führen. Diese Stoffeinträge wirken praktisch „bodenbildend“ (vgl. Lößbildung).

Eine verschmutzungsbedingte Stoffanreicherung an Pflanzen wird eine gewisse Umweltrelevanz beigemessen. Geochemisch natürliche Stäube können über die inhalative direkte Aufnahme gesundheitlich relevant sein (z.B. Ablagerungen in den Bronchien, Co-Transport von Krankheitserregern).

Trockene Gebiete, durch Ackerbau geprägte Gebiete oder Räume ohne befestigte Straßen dürften eher durch Winderosion betroffen sein und trockene Jahre dürften erhöhte Schwebstaub und Staubniederschlagsfrachten verursachen.

Bei der Verwehung von pedogenen Stäuben werden die ehemals angereicherten Stoffe (z.B. Pb, PCB) auch Jahrzehnte nach einem etwaigen Verbot in die Atmosphäre eingetragen, die Oberböden wirken als Zwischenlagerstätte. Mit sinkenden industriellen Emissionen gewinnt damit die nutzungsbedingte Stoffumlagerung und Reemission zunehmend an Bedeutung.

### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 4,2 kg Gesamtstaub/ha a emittiert (ohne Ackerbau, Feldwege), hiervon entfallen 3,3 kg auf die Fraktion < 10 µm (PM10) [U45]. Die bodennahe Luft weist einen mittleren PM10-Vorrat von ca. 1 - 6 kg/ha auf (Annahmen: 20-30 µg/m<sup>3</sup> in einer Luftschicht von 0-5 bis 0-20 m) (Da der Staub sich nur wenige Tage in der Luft hält, sind nur wenige % des PM10-Vorrates in der Atmosphäre durch anthropogene Quellen erklärbar).

Die Staubniederschlagsdepositionen betragen in Baden-Württemberg ca. 100 bis 200 kg/ha a im ländlichen Raum und bis ca. 600 kg/ha a in Siedlungsgebieten [U12].

Von der Autobahn A5 werden jährlich 7 t/km Partikel, Brems- und Reifenabrieb emittiert [U45; Kraftstoff und Gase nicht berücksichtigt -> Gas-Bilanz]. Über das Streusalz werden im Mittel 0,123 t schwerlösliche Feststoffe/km a ausgebracht [U45; NaCl und CaCl<sub>2</sub> nicht berücksichtigt -> schneller Übergang in die Hydrosphäre].

(Das Abfallaufkommen im Bereich der Messstelle Bruchsal wurde bislang nicht quantifiziert, ist jedoch dem Augenschein nach keine Bagatellmasse; verkehrsbedingter Hausmüll findet sich bis in über 50 m Entfernung.)

#### Bilanzschätzung 0-10 m

Die allein aufgrund der Katasterangaben anzunehmende, durchschnittliche Stoffdeposition von 7 t/ha a (Annahme: 100% der Partikel werden im 10 m Randstreifen deponiert; 1 km mal 10 m = 1 ha) verursacht eine durchschnittliche „Bodenbildung“ von ca. 0,7 mm/a (Annahme: Dichte 1 kg/l; kein Nettoabbau des Reifenabrieb-C). Die partikelförmigen Emissionen an der A5 können demnach zu messbarer Bodenbildung von ca. 7 mm in 10 Jahren führen. Beobachtungsdaten liegen hierzu noch nicht vor.

#### Bilanzschätzung 15-20 m

Da die Stoffdepositionen im Bilanzraum 15-20 m weitgehend den oberen Hintergrundverhältnissen entsprechen [hier Kap. 2 ff] werden auch für die Feststoff-Bilanz und die staubbedingte Bodenbildung Hintergrundverhältnisse angenommen.

An der Intensiv-Messstelle Bruchsal beträgt die Trockenmasse der Pedosphäre bis 1,1 m Tiefe ca. 14.000 t/ha und die Biosphäre ca. 190 t/ha. Jährlich entsteht ein Zuwachs von 6,3 t TrS Holz/ha a.

Im Bruchsal sind ca. 18% des Bodens aeolischen Ursprungs: 2.500 t/ha (Schwebstaub bzw. Schluff: 2 bis 60 µm).

Durch die verwitterungsbedingte Bodenbildung sind in Bruchsal 1.100 t Ton (PM2-Bodenfraktion)/ha entstanden (110 kg/m<sup>2</sup>), wobei hiervon 70% durch Tonverlagerung im Bt (0,6 bis 1,1 m Tiefe) angereichert ist. Die Tonvorräte entsprechen den klima- und gesteinsaltersbedingten Erwartungen. Die Tonbildung dürfte in Bruchsal derzeit in der gleichen Größenordnung anhalten (0,1 t/ha a).

#### Folgerungen

Im Bereich des Randstreifens 0-10 m wirkt der Feststoffeintrag deutlich bodenbildend (ob dies umweltrelevant ist bleibt offen).

Hinsichtlich der Hintergrundverhältnisse im Bilanzraum 15-20 m bleibt folgendes festzuhalten: Der für heutige Verhältnisse geschätzte Staubniederschlag von ca. 200 kg/ha a führt nach Abzug der Verluste durch Verwitterung zu einer Bodenbildung von rund 0,01 mm/Jahr (bzw. 2.000 t/ha in 10.000 a; entspricht in etwa dem aeolischen Pool in Bruchsal). Diese Schätzung muss durch Staubuntersuchungen überprüft werden.

## 1.2 Wasser

#### Vorbemerkung

Für die Intensiv-Messstelle Bruchsal wird jährlich die Wasserhaushaltsbilanz zum Zwecke der Stoffflussbilanzierung ermittelt [U69]. Die Wasserbilanzen können auch für Fragen der Wasserrückhaltung und Grundwasserneubildung herangezogen werden.

#### Eckdaten

Bruchsal liegt im nördlichen Oberrhein und ist durch einen mittleren Niederschlag von 700 mm/a gekennzeichnet [U41].

#### Bilanzdaten 0-10 m

Innerhalb des Bilanzraumes 0-10 m versickert ein Großteil des Oberflächenabflusses der Straße im Nahbereich 0-1 m (ca. 5.000 bis 10.000 l/m<sup>2</sup>), um sich dann auf dem Weg zum Grundwasser weiter zu verteilen. Die Verdunstung ist hier zu vernachlässigen.

#### Bilanzdaten 15 bis 20 m

Die Wasserbilanz wird beispielhaft für das Jahr 2002 dargestellt [U69: 2002]. Bei 863 l/m<sup>2</sup> Jahresniederschlag und 127 l/m<sup>2</sup> Verdunstung durch Interzeption im Kronenraum auf sowie 73 l/m<sup>2</sup> über die Humusaufgabe wurden 453 l/m<sup>2</sup> durch Pflanzenwurzeln entzogen. Die verbleibenden 210 l/m<sup>2</sup> entsprechen der Grundwasserneubildung an der Messstelle. In der Summe ergab sich ein Grundwasseranstieg von 400 mm. Die Niederschläge des Jahres 2002 lagen 30% über dem langjährigen Mittel [U41].

#### Ausblick

Bei (künftigen) Stoffflussbilanzen im Randstreifen 0-10 m muss berücksichtigt werden, dass aufgrund fehlender Kanalisation die linienförmige Stoffverlagerung in das Grundwasser erheblich ist. Im Wald findet demgegenüber eine geringe Grundwasserneubildung statt.

### 1.3 Gas

An der A5 werden jährlich 3.000 t Kraftstoff/km a verbrannt. Einige Spurenstoffe aus der Gasphase sind unter Umständen über den Gasaustausch der Vegetation für die HydroBioPedosphäre stoffflussrelevant. (Der Gashaushalt wurde an der Intensiv-Messstelle Bruchsal bislang - mit Ausnahme von MTBE - nicht weiter untersucht, da das Stoffspektrum der ersten Umweltbilanz an persistenten, partikelgebundenen und daher vorwiegend im Nahbereich akkumulierenden Stoffen orientiert ist.)

### 1.4 Energie

#### Vorbemerkung

Das Klima wirkt sich auf den Wasserhaushalt, die Wachstumsbedingungen und die Gesteinsverwitterung aus. Das Klima ist daher für die Typisierung und Regionalisierung von Stoffflüssen sowie für Biota-Bilanzen wichtig.

Die mittlere Lufttemperatur liegt in Bruchsal bei 10,3 Grad, die Globalstrahlung bei 116 W/m<sup>2</sup> [U41]. Die vorherrschende Windrichtung ist Süd-West mit Windstärken im Sommer im Bereich von 0,4 bis 3 m/s (im Winter auch höher). Die vorherrschende Windrichtung läuft weitgehend parallel zur Autobahn A5. Für den betrachteten 10-Jahreszeitraum wurden die Temperatur-Schwankungen von Jahr zu Jahr für Zwecke der Wasserhaushaltsberechnung berücksichtigt.

(Lärm wurde nicht berücksichtigt.)

### 1.5 Biota

#### Vorbemerkung

Bedingt durch die Stickstoff-, Streusalz- und Spurenelement-Emissionen des Verkehrs wäre eine stoffflussbedingte Veränderung der Vegetation am Straßen- und Waldrand zu erwarten. Gleichzeitig ist beachtenswert, dass beim Bau der

Autobahn durch die künstlich geschaffene Waldrandlage eine neue Biosphäre geschaffen wurde, die durch die Pflege des Autobahnbetriebsamtes auch weiterhin in diesem Zustand gehalten wird.

#### Bilanzdaten 0-10 m

Hier ist eine bewirtschaftete Wiesenvegetation vorhanden. Der Zustandsgröße Artenzusammensetzung wird im Randstreifen keine Umweltrelevanz beigemessen.

(auf eine Erhebung der Artenzusammensetzung wird daher verzichtet; bedingt durch die Spurenelement Einträge des Verkehrs ist eine Hemmung der biologischen Aktivität und ein Einfluss auf die Artenzusammensetzung wahrscheinlich, die jedoch auch durch Bewirtschaftung übergeprägt wird).

#### Bilanzdaten 15-20 m

Im Waldsaumbereich wurde im Jahr 1992 die folgende grobe Bestandsaufnahme durchgeführt (r selten, + einzelne Exemplare, 1 bis 5 Deckungsgradklassen wobei 5 = > 60%): Himbeere (+), Brombeere (+), Tüpfel-Johanniskraut (+), Goldrute (1), Besenginster (2), Zypressenwolfsmilch, Waldgamander, Gemeines Straußgras (+) und Landreitgras (5) anzutreffen. Im angrenzenden Waldbereich ab ca. 17 m sind Buche (3), Apfel (r), Waldkiefer (3), Hainbuche (1), Zweiblättrige Schattenblume (+), Maiglöckchen (1), Drahtschmiele (+), Haar-Hainsimse (+), Einblütiges Perlgras (+) und Gemeiner Wurmfarne (+) vorhanden. Baumschlag- oder Windwurfereignisse fanden bislang nicht statt.

(Eine erneute Inventur der Pflanzenarten wird noch durchgeführt.)

#### Ausblick

Die Sukzession dürfte 50 Jahre nach dem Autobahnbau soweit abgeschlossen sein, dass eine erneute, ggf verbesserte Bestandsaufnahme lohnt.



## 2 Hauptstoffe

### 2.1 C Kohlenstoff

#### Vorbemerkung

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden als wichtige Ursache für mögliche anthropogene Klimaveränderungen diskutiert. Als CO<sub>2</sub>-Senken wirken die Hydrosphäre (Weltmeere), die Biosphäre (Photosynthese) und die Pedo-/Lithosphäre (Carbonatgesteins- und Humusbildung). Der in der Biosphäre organisch gebundene Kohlenstoff (C<sub>org</sub>) bildet wiederum wichtige Adsorberflächen für Schadstoffe (z.B. Blattnadeln). Die Flüsse zahlreicher Spurenstoffe (z.B. Cu, Hg, PAK) sind daher bis in das Grundwasser an die C<sub>org</sub>-Flüsse gebunden. Aus diesem Grund ist C<sub>org</sub> ein Leitparameter für Spurenstoffbilanzen.

#### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen durchschnittlich 6 t CO<sub>2</sub>-C/ha a emittiert [U45]. Von der A5 werden im Streckenabschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich 2.600 t CO<sub>2</sub>-C/km emittiert. Hinzu kommen noch ca. 3 t Reifenabrieb-C/km [U45: 2000].

#### Bilanzdaten 0-10 m

Im Randstreifen 0-10 m ist im Boden eine nutzungstypische C-Menge von 50 t C/ha gespeichert. Es gibt bislang keine Hinweise, dass das natürliche Gleichgewicht zwischen Humusnachlieferung und -abbau im Boden durch das erhöhte CO<sub>2</sub>-Angebot der Autobahn beeinflusst ist. Ob der Reifenabrieb-C zu einer Humusanreicherung führt wurde bislang nicht untersucht.

#### Bilanzdaten 15-20 m

Für den Waldbereich in 15-20 m wurden folgende C-Vorräte geschätzt (siehe C-Bilanztafel): In der Biosphäre sind ca. 126 t C/ha und in der Pedosphäre ca. 58 t C/ha gebunden. (Zum Vergleich: in der Atmosphäre sind ca. 15 t CO<sub>2</sub>-C/ha gebunden; Berechnung: 100 kt/ha Gewicht der Luftsäule mal 0,015 Gewichts-% CO<sub>2</sub>-C). Durch das Wachstum der Bäume werden aus der Atmosphäre jährlich ca. 1,9 t C/ha a bis zur Baumernte im Holz gespeichert. 1,4 t C/ha a werden dem Boden über den Streufall zugeführt. Das Streufall-C wird bilanztechnisch nahezu vollständig wieder zu CO<sub>2</sub> veratmet, denn es gibt nur Hinweise auf eine geringe C<sub>org</sub>-Akkumulation im Boden. Die C-Freilanddeposition liegt in Bruchsal bei 0,02 bis 0,04 t C/ha a, die Bestandsdeposition bei 0,1 bis 0,2 t C/ha a. Der

	Tiefe [cm]	Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung (Seite 4)			
		Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]		Change [.../ha a]	Change % vP/ a	
<b>C gesamt [t/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	15,4	-	6,0	1,9	+4,1	26,7%	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	1,0	-	1,4	1,4	0,0	-	
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	125,0	-	1,9	-	1,9	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	9,2	-	1,4	-	0,0	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	27,7	-	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	21,4	-	-	0,017	-	-	12
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	0,017	0,017	-	-	12
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	0,017	0,012	-	-	12
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	0,012	-	-	-	
	Summe					184						

C-Fluss im Boden und der Austrag aus dem Boden beträgt ca. 0,015 t C<sub>org</sub>/ha a. In der Bodentiefe 1,1 m wurden im Sickerwasser mit 12 mg TOC-C/l [U62: 1996] im Verhältnis zu typischem Grundwasser erhöhte C-Gehalte ermittelt [U62].

#### Folgerungen

Die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs haben sicher nur einen geringen Einfluss auf die biologische C-Fixierung am Straßenrand, da CO<sub>2</sub> in der Regel kein dominierend wachstumsfördernder Faktor ist.

Unter vergleichsweise guten Wachstumsbedingungen werden in Bruchsal nur 32% (1,9 von 6 t C/ha a) des landesweit durchschnittlich emittierten CO<sub>2</sub> biologisch fixiert. Damit verbleiben in Bruchsal 4,1 t C/ha a als atmosphärischer Überschuss (Landesdurchschnitt). Um in Bruchsal die Verkehrsemission der A5 von 2.600 t C/km biologisch zu fixieren, müsste eigens hierfür in einem 13,7 km breiten Waldstreifen entlang der A5 das Holz abbausicher „endgelagert“ werden.

An dem vorangegangenen Rechenbeispiel kann die Bedeutung von CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Industrie- und Verkehrsregion wie Baden-Württemberg veranschaulicht werden. Das Beispiel zeigt auch, dass atmosphärische C-Bilanzen global betrachtet werden müssen.

Die C<sub>org</sub>-Bilanz wird in Bruchsal mit Blick auf die Leitparameterfunktion beim Transport von Spurenstoffen weiter verfolgt.

## 2.2 N Stickstoff

#### Vorbemerkung

Die hier vorgelegte N-Bilanz basiert auf NO<sub>3</sub>-N und NH<sub>4</sub>-N Messungen im Niederschlag (von 1996 bis 2002), eine Screeninguntersuchung im Sickerwasser (1996) sowie die N<sub>ges</sub>-Bestimmungen im Boden (2001). Die N-Vorräte in der Vegetation wurden geschätzt. (Weitere N-Flussdaten (z.B. Gasaustausch der Vegetation [z.B. NH<sub>3</sub>], Sickerwasser [NO<sub>2</sub>], N-Entzug über die Pflanze) sollen zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt werden.)

#### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden derzeit über alle Quellen 37 kg N/ha a emittiert [U45]. Von der A5 werden derzeit im Streckenabschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich 15.000 kg N/km emittiert (davon 93% als NO<sub>2</sub>), Trend: Reduzierung um 50% bis 2010 [U45].

#### Bilanzdaten 0-10 m

Die N-Vorräte liegen im Oberboden des Bilanzraumes 0-10 m in einer für Wiesenutzungen eher unterdurchschnittlichen Größenordnung von ca. 2.500 kg/ha (Bezogen auf 0-10 cm Bodentiefe). N-Flussmessungen und Bodenwiederholuntersuchungen liegen hier noch nicht vor.

#### Bilanzdaten 15-20 m

Die N-Vorräte im Bilanzraum 15-20 m liegen bei 3.900 kg/ha (BioPedosphäre), wobei hiervon ca. 80% auf die Pedo- und 20% auf die Biosphäre entfallen. (Zum Vergleich: In der Atmosphäre sind ca. 76,7 kt N/ha gespeichert; Berechnung: 100 kt/ha Luft mal 76,7 Gewichts-% N). Der N-Eintrag in den Wald wurde zu 45 kg N/ha a berechnet (hiervon 21 kg NH<sub>4</sub>-N und 24 kg NO<sub>3</sub>-N; Interceptionsfaktor = 3). Die Fracht in den Untergrund liegt am Standort Bruchsal gemäß der Scree-

ninguntersuchung aus dem Jahr 1996 bei 1 kg N/ha a auf niedrigem Niveau. Im Bilanzraum findet eine jährliche Anreicherung von 1,1 % vom N-Vorrat statt (43 kg N/ha a). Davon entfallen ca. 11 kg auf die Biosphäre und 32 kg auf die Pedosphäre (Der genaue Akkumulationsort wurde noch nicht ermittelt, da die Sickerwasserstiefen 0 und 10 cm zum Screeningzeitpunkt noch nicht installiert waren).

Das C/N-Verhältnis in der Streuauflage liegt bei 1:24 und ist damit sehr eng (= relativ hoher N-Gehalt im Humus). Vergleichszahlen liegen noch nicht vor, verkehrsbedingt erhöhte N-Gehalte sind nicht auszuschließen. Ein bedeutender N-Entzug in Höhe von 11 kg N/ha a ist über die Baumernte zu erwarten (Berechnung: 800 kg Vorrat / 50 Jahre; die derzeitige N-Festlegung im Holz liegt altersbedingt bei ca. 11 kg N/ha a).

### Raumübertragbarkeit

Die N-Depositionen sind im Bilanzraum 15-20 m gegenüber den anderen Intensiv-Messstellen erhöht [NH<sub>4</sub>-N stärker als NO<sub>3</sub>-N; vgl. U42; Messungen im Bilanzraum 0-10 m liegen noch nicht vor]. Ob dies verkehrsbedingt ist, kann

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m					Anmerkung (Seite 4)		
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]		Change % vP/ a	
<b>N gesamt [kg/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	76.700.000	-	37,0	45,0	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	30	-	44,0	44,0	0	-	1, 6
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	800	-	11,0	-	11	-	2, 8
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	376	-	44,0	-	-	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	1.804	-	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	877	-	-	2,9	-	-	3
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	2,9	0,9	2,0	-	3
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	0,9	1,0	-0,1	-	3
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	1,0	-	-	-	3
	Summe					3.887				43,0	1,1%	
<b>NH<sub>4</sub>-N [kg/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	21,0	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	21,0	:	-	-	
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	:	17,0	-	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	-	-	17,0	-	-	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	-	-	-	0,7	-	-	12
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	0,7	0,2	-	-	12
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	0,2	0,2	-	-	12
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	0,2	-	-	-	
	Summe					0						
<b>NO<sub>3</sub>-N [kg/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	24,0	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	24,0	:	:	:	
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	:	-	-	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	-	-	17	-	-	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	-	-	-	2,2	-	-	12
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	2,2	0,7	-	-	12
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	0,7	0,8	-	-	12
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	0,8	-	-	-	
	Summe					0						

derzeit noch nicht sicher beurteilt werden (fehlende Vergleichswerte für den Forstbestandestyp und die Waldrandlage).

### Folgerungen

Ein Einfluss des Verkehrs auf den N-Haushalt in Bruchsal ist nicht auszuschließen. Gleichwohl ist hervorzuheben, dass die N-Auswaschung in den Untergrund im Jahr 1996 sehr gering war. Angesichts der anhaltenden N-Akkumulation im Boden wird dies weiter beobachtet. Es ist zu erwarten, dass pflanzenbauliche Eingriffe in den Forstbestand (z.B. Windwurf) zu einer erhöhten N-Auswaschung führen, wenn auch die Ausprägung in Bruchsal aufgrund der tiefen Durchwurzelung, der guten Wachstumsbedingungen und geringen Niederschläge weniger stark als beispielsweise in Schwarzwaldhöhenlagen ausfallen dürfte. Allgemein fraglich ist, wie sicher die N-Überschüsse in der Streuauflage und im Oberboden fixiert werden. Aus dieser Überlegung heraus lohnt in Bruchsal eine weitere Beobachtung.

## 2.3 P Phosphor

Die P-Vorräte im Boden liegen im Bilanzraum 0-10 m mit 630 kg P/ha (0-30 cm) über den Vorräten im Wald (380 kg P/ha) (Tab 2). Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich autobahnbetriebsbedingte Einträge von 250 kg P/km, bezogen auf die Betriebsdauer ca. 5 bis 10 kg P/km a. Die ermittelten P-Einträge sind wachstumsförderlich. Für die allgemeine Eutrophierung sind die Einträge jedoch angesichts der üblichen P-Düngung im Ackerbau Bagatellfrachten.

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m						
	Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
	[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	(Seite 4)
<b>P gesamt [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	2	-	-	-	-	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	16	-	-	-	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	264	-	-	136	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	366	-	-	245	-	-	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Summe		630			398					

## 2.4 S Schwefel

### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen über alle Quellen 7 kg SO<sub>2</sub>-S/ha a emittiert, zu 10% vom Verkehr [U45: 1998].

Von der A5 werden im Streckenabschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich 600 kg SO<sub>2</sub>-S/km emittiert [U45: 2000; Tendenz: Abnahme bis 2010 um ca. 95%). SO<sub>2</sub> reagiert größtenteils schon in der Atmosphäre zu Schwefelsäure und ist vorwiegend für den Säurehaushalt (Kap. 3) von Bedeutung. Ca. 6 kg SO<sub>4</sub>-S/km gelangen über Streusalz in den Bilanzraum [U85].

### Bilanzdaten 0-10 m

Die S-Vorräte im Oberboden liegen in der Zone 0-10 m mit 620 kg S/ha (0-30 cm) über den Vorräten im Wald. Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich autobahnbetriebsbedingte Anreicherungen im Boden von 230 kg S/km, bezogen auf die Betriebsdauer ca. 10 kg S/km a (die verkehrsbedingten Gesamt-S-Einträge dürften auswaschungsbedingt darüber liegen).

### Bilanzdaten 15-20 m

31 kg S/ha a werden im Bilanzraum 15-20 m insgesamt über die Interzeption in die Pedosphäre eingetragen. (weitere S-Flussdaten konnten noch nicht erhoben werden). Für SO<sub>4</sub>-S wurde ein Überschuss von +20 kg SO<sub>4</sub>-S/ha a in der BioPedosphäre berechnet.

Die S-Einträge liegen im Bestand Bruchsal 2 bis 3 mal höher als in Baltmannsweiler oder Wilhelmsfeld [U42]. Im Freiland wurde im Dekadenmittel ein S-Eintrag von ca. 9 kg/ha a ermittelt [U75].

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m					
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]	Change % vP/ a	Anmerkung (Seite 4)
<b>S gesamt [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	3	-	:	-	-	4
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	:	31	-	5
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	41	-	31	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	320	10	-	192	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	300	-	-	199	-	-	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Summe		620			435				(4,6%)	
<b>SO<sub>4</sub>-S [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	27	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	27	:	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	:	25	+2	7
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	-	-	25	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	-	-	18	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	18	20	-2	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	20	7	+13	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	7	-	-	-
	Summe									+20	

### Ausblick

Der Auskämmeffekt der Vegetation und der Verkehrseinfluss im Bilanzraum 15-20 m ist bei S deutlich. Im Boden dürfte der dominierende verkehrsbedingte S-Vorrat im Bt-Horizont liegen (Pool bislang nicht untersucht). Eine Anreicherung als schwer lösliches Al-Hydroxy-Sulfat ist hier anzunehmen. Das Hauptaugenmerk des S-Haushalts für die Fortschreibung der Umweltbeobachtung liegt im Säurehaushalt (Kap. 3).

Die SO<sub>4</sub>-S-Einträge im Freiland Bruchsal decken sich mit den durchschnittlichen anthropogenen Emissionen.

## 2.5 Cl Chlorid

### Eckdaten

Im Bilanzraum werden 5.200 kg Cl/km a durch Streusalz eingetragen [U85].

### Bilanzdaten 0-10 m

(Im Bilanzraum 0-10 m liegen keine Cl-Daten vor.)

### Bilanzdaten 15-20 m

Im Bilanzraum 15 - 20 m wird ein jährlicher Cl-Überschuss von 68 kg Cl/ha a ermittelt (ca. 1% des Streusalzes). Die Cl-Einträge liegen ca. 5 bis 10-fach über den ländlichen Hintergrundwerten [U42].

### Folgerung

Entgegen den Erwartungen aufgrund seiner guten Löslichkeit wird Cl im Bilanzraum 15-20 m in beträchtlichen Mengen angereichert. (Die Umweltrelevanz kann derzeit nicht beurteilt werden. Cl wird als konservativer Tracer für den Bodenwasserfluss genutzt, da es nur in geringem Maß am internen Stoffkreislauf der Biosphäre teilnimmt und wenig adsorbiert wird.)

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m						
	Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
	[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	
<b>Cl [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	1	-	78	:			
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	:	81	-3		8
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	-	-	97	-		
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	97	21	+76		
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	21	10	+11		
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	10	-	-		
	Summe				1				+68		

## 2.6 Si-Al-Fe-Mn Silizium, Aluminium, Eisen & Mangan

### Vorbemerkung

Silizium, Aluminium, Eisen und Mangan sind als kationische Hauptbestandteile von Stäuben und Böden zur Charakterisierung der in der Atmosphäre und Pedosphäre ablaufenden Sorptions-, Fällungs- und Pufferreaktionen von Interesse (siehe Kap. 3). Aluminium ist als Inhaltsstoff im Trinkwasser umweltrelevant.

### Eckdaten

-

### Bilanzdaten 0-10 m

Die Fe-Vorräte im Boden liegen im Bilanzraum 0-10 m mit 23.100 kg Fe/ha (0-30 cm) geringfügig über den Vorräten im Wald. Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich autobahnbetriebsbedingte Einträge von 140 kg Fe/km a.

Die Mn-Vorräte im Boden liegen im Bilanzraum 0-10 m mit 790 kg Mn/ha (0-30 cm) über den Vorräten im Wald. Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich autobahnbetriebsbedingte Einträge von 8,2 kg Mn/km a.

(Si- und Al-Daten liegen nicht vor.)

### Bilanzdaten 15-20 m

(Si, Al, Fe-Stoffflussmessungen liegen noch nicht vor).

Für Mn wird eine jährliche Abreicherung der BioPedosphäre von 4,4 kg Mn/ha a ermittelt.

Die Mn-Freiland-Depositionen liegen in Bruchsal mit 91 g/ha a im üblichen landesweiten Hintergrund [U42; U75]. Die Mn-Bestands-Depositionen liegen mit 1,9 kg/ha a auf einem leicht erhöhten Niveau, was durch den Bestandstyp, die

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung	
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]		Change % vP/ a
<b>Fe [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	1	-	-	:	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	:	-	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	130	-	-	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	8.100	140	1,7%	4.800	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	15.000	-	-	12.000	-	-	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Summe		23.100			16.930					
<b>Mn [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	2	-	0,3	:	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	:	3,6	-	1
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	16	-	3,6	1,7	+1,9	11,9%
	Ah-Hor	0-0,1 m	270	8,2	3,0%	65	-	1,7	1,3	+0,4	0,6%
	Al	0,1-0,3 m	520	-	-	298	-	1,3	1,4	-0,1	<0,1%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	1,4	3,8	-2,4	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	3,8	4,7	-0,9	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	4,7	-	-	-
	Summe		790			381				-4,4	

Waldrandlage oder auch den Verkehr verursacht sein kann [U75].

#### Folgerungen

Der verkehrsbedingte Eintrag von Fe und Mn in den Randstreifen ist aus Sicht des Grundwasserschutzes vorteilhaft. Eisen- und Manganoxide werden beispielsweise zur Immobilisierung von Schwermetallen in Böden eingesetzt. Ergänzende, periodische Flussmessungen für Si, Al und Fe sind zur Charakterisierung der Stäube und der Verwitterungsintensität vorteilhaft.

Die Mn-Verarmung im Bilanzraum 15-20 m ist voraussichtlich verwitterungsbedingt und unterliegt nicht dem Verkehrseinfluss.

## 2.7 Ca-Mg-K-Na Calcium, Magnesium, Kalium & Natrium

#### Vorbemerkung

Ca, Mg und K sind über den Säurehaushalt (Kap. 3) sowie als pflanzennährstoff umweltrelevant. (Na ist ein Tracer für die Modellansätze.)

#### Eckdaten

Über den Streusalzeinsatz gelangen 150 kg Ca/km a sowie 3.200 kg Na/km a in den Bilanzraum [U85; Mg- und K-Daten noch nicht vollständig]. Normale Boden-Stäube können Ca-Depositionen von ca. 3 - 60 kg Ca/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Boden-Staub/ha a; 30 - 300 g Ca/kg Bodenstaub; Löß - Carbonatgestein; z.B. auch für „Mineralbeton“-Feldwege). (Der Betonabrieb der Autobahn wurde noch nicht ausreichend quantifiziert; Emissionsdaten liegen nicht vor.)

#### Bilanzdaten 0-10 m

Die Ca-, Mg und K-Vorräte im Boden liegen in der Zone 0-10 m mit 25.700 kg Ca/ha (0-30 cm), 5.300 kg Mg/ha und 2.700 kg K/ha über den Vorräten im Wald (Bilanztafel). Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich autobahnbetriebsbedingte Einträge von 320 kg Ca/km a, 51 kg Mg/km a und 19 kg K/km a. (Na-Daten liegen nicht vor.)

#### Bilanzdaten 15-20 m

Für Ca wurde eine Nettoverarmung der BioPedosphäre von -36 kg/Ca ha a berechnet. Die Ca-Verluste treten überwiegend in der Tiefe 0,6-1,1 m (Bt-Horizont) auf und stammen aus der Verwitterung des Gesteins. Auch für Na wurden Netto-Verluste berechnet (-41 kg Na/ha a), die jedoch aus den Schichttiefen 0-0,6 m (Ah/Al-Horizont) entstammen. Es ist anzunehmen, dass hier der streusalzbedingte Na-Pool (bisher nicht gemessen) ausgewaschen wird. Die Na-Konzentrationen im Sickerwasser liegen mit 54 mg/l [U62: Median 2002] über den üblichen Gehalten im Grundwasser [U62]. (Der K- und Mg-Haushalt wird deutlich durch die Pflanzentransporte dominiert und hier mangels Daten nicht weiter interpretiert.)

#### Raumübertragbarkeit und Plausibilität

Die Freilandeinträge an Na (und die Sickerwasserfrachten) liegen streusalzbedingt im Bilanzraum 15-20 m mit 19 kg/ha a [U75] über den landesweiten Hintergrundverhältnissen [U42]. Bei Ca (10 kg/ha a) und K (3 kg/ha a) sind kaum erhöhte Einträge erkennbar (Mg nicht ausreichend bestimmt).

Eine Gesamtabreicherung von Na steht im Widerspruch zum Cl-Fluss. Bedingt durch hohe Bestimmungsgrenzen bei Na im Niederschlag [U42] dürften die Ein-



träge unterschätzt werden. Der Gesamtstofffluss von Na dürfte daher eher dem des Cl entsprechen (anhaltende Anreicherung).

### Folgerungen

(Säurehaushalt siehe Kap. 3)

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m					
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]	Change % vP/ a	Anmerkung
<b>Ca [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	6	-	30	57		
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	700	-			10	- 1, 2
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	130	-	57	47	10	7,3% 9
	Ah-Hor	0-0,1 m	10.700	320	3,0%	700	-	47	32	15	2,1% 9
	Al	0,1-0,3 m	15.000	-	-	1.660	-	32	42	-10	-0,6% 9
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	42	31	11	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	31	66	-35	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	66	-	-	-
	Summe		25.700			3.196				-36	
<b>K [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	10	-	9	47	-38	
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	378	-			5	- 1, 8
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	21	-	47	37	10	49,1% 9
	Ah-Hor	0-0,1 m	1.000	19	2,0%	425	-	37	12	25	5,9% 9
	Al	0,1-0,3 m	1.700	-	-	1.093	-	12	18	-6	-0,5% 9
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	18	12	6	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	12	3	9	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	3	-	-	-
	Summe		2.700			1.927				6	
<b>Mg [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	2	-	-			
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	80	-			1	- 1, 8
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	18	-	-	10	-	- 9
	Ah-Hor	0-0,1 m	2.000	51	2,5%	717	-	10	10	0	<0,1% 9
	Al	0,1-0,3 m	3.300	-	-	2.172	-	10	11	-1	<0,1% 9
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	11	18	-7	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	18	18	0	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	18	-	-	-
	Summe		5.300			2.989				-8	
<b>Na [kg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	1	-	(57)			
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-		(48)	9	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	-	-	(48)	19	29	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	-	-	-	-	-	19	81	-62	-
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	-	-	81	72	9	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	72	155	-83	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	155	98	57	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	98	-	-	-
	Summe					1				-41	

### 3 Säuren

#### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche belaufen sich die Emissionen an Säurebildnern in Baden-Württemberg auf 3,0 kmol<sub>e</sub>/ha a (c Ladungsäquivalent, z.B. 1 kmol Ca<sup>2+</sup> entspricht 2 kmol<sub>e</sub>) [U45, Bezug 2000: 1,5 kmol<sub>e</sub>/ha a aus NO<sub>x</sub> bzw. N<sub>2</sub>O und 0,44 kmol<sub>e</sub>/ha a aus SO<sub>2</sub>, 1,1 kmol<sub>e</sub>/ha a aus NH<sub>3</sub>). Demgegenüber ist die anthropogene Emission pufferwirksamer Stäube aus Industrie und Gewerbe mit 0,0005 kmol<sub>e</sub>/ha a für die Säurebilanz unbedeutend [U45: 2000].

Normale Boden-Stäube können eine Pufferkapazität von 0,14-0,6 kmol<sub>e</sub>/ha a aufweisen (Annahme: 100-200 kg Boden-Staub/ha a; 0,2-5 % Karbonatgehalt; Summe aus Austauscher-, Silikat- und Karbonatpuffer).

Die historische anthropogene Versauerung wird auf 500 bis 700 kmol<sub>e</sub>/ha und die Versauerung durch Ernteentzug seit dem 14. Jahrhundert auf 480 kmol<sub>e</sub>/ha geschätzt (LfU 1997).

#### Bilanzdaten 0-10 m

Im Bilanzraum 0-10 m beträgt der mittlere Boden-pH bedingt durch Emissionen und Bautätigkeit 7,4. Aufgrund dieser hydrogeologisch und pflanzenphysiologisch günstigen Situation wurde hier auf eine Säurebilanz verzichtet.

#### Bilanzdaten 15-20 m

Die atmosphärische Säurebilanz bezogen auf den Bilanzraum 15-20 m ergibt folgendes Bild: der Eintrag von direkten Säurebildnern stammt zu je 0,6 kmol<sub>e</sub>/ha a aus NO<sub>x</sub>/N<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> sowie zu 0,4 kmol<sub>e</sub>/ha a aus organischen Säuren. Atmosphärisch gepuffert werden davon 0,5 kmol<sub>e</sub>/ha a durch NH<sub>3</sub> und 0,5 kmol<sub>e</sub>/ha a durch Austausch von Ca sowie 0,4 kmol<sub>e</sub>/ha a durch Mg, so dass der direkte Säureeintrag über Protonen (pH) gering bleibt. NaCl stammt zu 90 % aus dem Streusalz, zu 10 % aus dem ubiquitären anthropogenen Eintrag sowie dem Eintrag durch Seesalz und bleibt deshalb bei der atmosphärischen Säurebilanz unberücksichtigt.

Durch Interzeptionsdeposition im Kronenraum verdreifachen sich die Freilandwerte zu den Gesamteinträgen in das System. Träger nahezu des gesamten Säureintrags in das System ist jetzt das NH<sub>4</sub>, dessen Beitrag von 1,5 kmol<sub>e</sub>/ha a x 2 die potentielle Säure dominiert.

Vom Gesamteintrag potentieller Säure von 1,83 kmol<sub>e</sub>/ha a verlassen nur noch ca. 1 kmol<sub>e</sub>/ha a den Kronenraum, bedingt überwiegend durch Aufnahme von NH<sub>4</sub> aber auch durch direkte Protonenpufferung.

Für den Boden lassen die Daten keine Differenzierung nach Horizonten zu. Insgesamt betrachtet lässt sich aber sagen, dass nahezu keine pot. Säure mehr den Boden verläßt, d. h. sie wird nahezu vollständig im System in Form von N<sub>org</sub> gebunden bzw. durch Austausch im wesentlichen gegen Ca gepuffert (allein Ca erfährt eine nennenswerte Zunahme mit der Bodentiefe).

Unter der Annahme eines Kationenüberschusses von 1 kmol<sub>e</sub>/ha a im Baumbestand ergibt sich eine äquivalente zusätzliche Säurebelastung des Systems durch den Aufwuchs selbst. Die Pflanzen nehmen 1,95 kmol<sub>e</sub>/ha a pot. Säure auf, was in etwa dem Gesamteintrag an potentieller Säure entspricht, der Rest von 1 kmol<sub>e</sub>/ha a wird vom Boden gepuffert.

Dem Boden im Bilanzraum 15-20 m bis 110 cm Tiefe steht ca. 300-400 kmol<sub>e</sub>/

ha schnelle Pufferkapazität (berechnet aus  $KAK_{eff}$ ) sowie eine Gesamtpufferkapazität von rund 18.000  $kmol_e/ha$  zur Verfügung, die bei weitergehendem Export der organisch gebundenen pot. Säure ( $N_{org}$  - Kationenüberschuss) gegenwärtig mit 1  $kmol_e/ha$  a belastet werden. Bei Verbleib der Biomasse im Bestand beliefe sich die Belastung auf den Wert der eingetragenen pot. Säure von 1,83  $kmol_e/ha$  a. Das Fließgleichgewicht zwischen den Puffersystemen berücksichtigend,

Säurebilanz Inteniv-Messstelle Bruchsal (Angaben in  $kmol_e/ha$  a basierend auf den mittleren Stoffflüssen der Jahre 1996-2002)

		Anionen					Kationen								potentielle	
		NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	RCOO	H	NH <sub>4</sub>	Al	Fe	Mn	Ca	K	Mg	Na	Säure
OutAtmo	Freiland	0,57	0,56	0,73	0,01	0,4	0,04	0,50	0	0	0,003	0,5	0,08	0,4	0,8	0,58
	Freil. + Interz. <sub>part</sub>	1,71	1,69	2,28	0,03	1,3	0,13	1,50	0	0	0,010	1,5	0,23	1,1	2,5	1,83
	Interz. <sub>gas</sub>	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	0
InPedo	Kronentraufe	1,21	1,56	2,28	0,03	1,4	0,03	1,21	0	0	0,070	1,4	0,64	1,1	2,1	0,99
OutPedo	Auflage 0 cm	-	-	-	0,02	-	0,47	-	0,038	0	0,063	2,4	0,95	0,8	0,8	-
	Ah-Hor 10 cm	-	-	-	0,02	-	0,26	-	0,017	0	0,049	1,6	0,31	0,8	3,5	-
	Al 30 cm	0,16	1,1	2,73	0,04	2,7	0,06	0,05	0,001	0	0,051	2,1	0,46	0,9	3,1	-2,61
	fGo-Al 60 cm	0,05	1,25	0,59	0,01	8,4	0,12	0,01	0,003	0	0,139	1,6	0,31	1,5	6,7	-8,31
	fGo-Bt 110 cm	0,05	0,44	0,28	0	8,6	0,05	0,01	0,015	0	0,171	3,3	0,08	1,5	4,3	-8,52
	fGo-fGr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
InBio	Zuwachs gesamt	1,66	0,03	0,03	0	1,0	0	1,49	0	0,01	0,129	0,7	0,26	0,2	0,0	1,95
BalKrone	Baumkrone	-0,50	0,00	0,00	0	0,6	-0,10	-0,29	0	0,00	0,060	0,0	0,41	0,0	0,0	-1,26
BalAtmo	Freiland	0,57	0,56	-	0,01	0,4	0,14	-0,5	0	0	-0,003	-0,5	-0,08	-0,4	-	-

Anmerkungen zur Tabelle

- 0 Rechengröße
- nicht berechnet bzw. nicht von Bedeutung
- HCO<sub>3</sub> berechnet über pH und Gleichgewicht mit der Gasphase (CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft mit 2 Vol.-% angesetzt).
- RCOO berechnet als Restglied aus der Ionenbilanz. Ausnahme: Zuwachs Bio gesamt, hier RCOO = 1 vorgegeben (Schätzwert für den jährlichen Kationenüberschuss eines Buchen-Kiefernwaldes).
- H berechnet aus pH-Messungen. Ausnahme: Säurebilanz Atmo FN, hier als Restglied aus der Ionenbilanz.
- Al geschätzt als Al<sup>x</sup> in Abhängigkeit des pH nach Van der Salm und De Vries (2001) (Exponent x ebenso pH- abhängig, hier mit 2 bis 2,5 angesetzt) für Bodentyp Sand und mittlere Flussraten Forst von 700, 500, 450, 350, 250, 150 und 100 mm.
- Fe ergibt sehr kleine Werte aus Löslichkeitsprodukt und pH, deshalb gleich Null gesetzt.
- pot. Säure = NH<sub>4</sub> mal 2 + H - HCO<sub>3</sub> - RCOO
- OutAtmo Freiland + part: Austrag aus der Atmosphäre FN plus partikuläre Interzeption
- InBio Zuwachs Bio gas; bei NO<sub>3</sub> und NH<sub>4</sub> Gesamtinput minus Output 110 cm. D. h. in dieser Annahme wird nahezu der gesamte eingetragene Stickstoff in der Baumvegetation gespeichert. Die Verhältnisse der übrigen Komponenten aus BZE-Daten (Gehalte von Buchenblättern und Kiefernadeln) geschätzt mit Zielvorgabe RCOO = 1.
- BalAtmo Rechnerischer Protoneneintrag durch FN unter folgenden Annahmen: jeweils vollständige Herkunft des NO<sub>3</sub> aus gasförmigem NO<sub>x</sub>, SO<sub>4</sub> aus SO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> aus NH<sub>3</sub>, Cl aus NaCl, RCOO aus RCOOH, Mn, Ca, K, Mg aus Pufferreaktionen an Staubteilchen.
- Freil. + Interz.<sub>part</sub> = Freilandeintrag x 3 (gemäß Berechnung über Na- bzw. Cl-Faktor U...)

sind demnach pH-Änderungen der Bodenreaktion nur über sehr lange Zeiträume zu erwarten. Schnellere Änderungen können bei der sogenannten Basensättigung (Verhältnis Al/Ca, Mg, K an der Austauscherebelung) erwartet werden.

Säureneutralisationskapazität des Bodens an der Intensiv-Messstelle Bruchsal (Annahmen: Ziel-pH 3,5, Verhältnis Si/Al = 36)

	Al	Fe	Mn	Ca	K	Mg	Na	SNK ges
0-0,1 m	837	172	2	35	22	59	0	1127
0,1-0,3 m	2128	430	11	83	56	179	0	2887
0,3-0,6 m	3619	731	18	141	95	304	0	4909
0,6-1,1 m	6495	1312	33	253	171	545	0	8810
>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-
Summe								17733

### Plausibilität

Die aus der Ionenbilanz berechneten RCOO-Werte erscheinen in allen Kompartimenten zu hoch. Dies kommt ganz besonders in den erwartungswidrigen Werten für OutAtmo Freiland sowie den mit der Tiefe zunehmenden Sickerungswerten zum Ausdruck. Im RCOO-Wert addieren sich sämtliche Fehler der Gesamtmethode, so dass diese Werte als Mass für die Präzision der Säurebilanz zu werten sind. In der Konsequenz ergibt sich hieraus eine Abschwächung bei der pot. Säure und damit eine Unterschätzung in Bezug auf die Säurebelastung des Systems. Die Emission von 3 kmol<sub>c</sub>/ha a Säurebildnern bezogen auf die Landesfläche nach Pufferung durch Stäube ergäben netto 2,5 kmol<sub>c</sub>/ha a. Der errechnete Wert von 1,83 kmol<sub>c</sub>/ha a Eintrag an pot. Säure erreicht nach Korrektur des RCOO in etwa diesen Erwartungswert. Der Unschärfbereich für den Säureeintrag liegt demnach zwischen 1,83 und ca. 2,83 kmol<sub>c</sub>/ha a.

Des weiteren ist es vermutlich nicht zutreffend, die gesamte N-Speicherung dem Baumbestand allein zuzuschreiben (das wären insgesamt 45 kg/ha a). Aus Untersuchungen an Kahlschlägen ist bekannt, dass daraus resultierende N-Mobilisierungen mit pH-Absenkungen einhergehen, d. h. der N ist in reduzierter Form und demnach wohl hauptsächlich als N<sub>org</sub> gebunden. Wenn dem so ist, handelt es sich um eine N<sub>org</sub>-Speicherung, die neben der sichtbaren Vegetation auch an den C<sub>org</sub> des Bodens gekoppelt ist, der dann ebenso zunehmen müsste. Die Konsequenz für das Endergebnis wäre, dass weniger pot. Säure in der nutzbaren und damit exportierbaren Biomasse gebunden wäre und das gebundene Säurepotential sich zwangsläufig vor Ort zu irgendeinem späteren Zeitpunkt entfalten müsste, je nach Zustand des Puffersystems evtl. einhergehend mit stärkeren Schwermetallmobilisierungen.

### Lücken

Die Elementaufnahme der Bäume bzw. der Kationenüberschuss sind bislang Schätzungen und sollten durch Messungen abgesichert werden. Die Anionen- und NH<sub>4</sub>- Flüsse stützen sich auf Sickerwassermessungen des Jahres 1996 und sollten zur Absicherung wiederholt gemessen werden.

### Raumübertragbarkeit

Die Säureeinträge liegen bei NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> sehr nahe bei den aufgrund der landesweiten Emission zu erwartenden Werten, bei SO<sub>2</sub> um ca. das dreifache darüber. Die Berechnung der gasförmigen Interzeptionsdeposition über den Cl-Faktor ergab des weiteren bei allen Komponenten Null. Insgesamt zeigt sich hier eher die Unschärfe der Methode, ein direkter Verkehrseinfluss ist nicht zwingend festzustellen. Eine Übertragbarkeit ist somit im Rahmen der gegebenen Genauigkeit auf forstlich genutzte Flächen im Oberrheingebiet gegeben.

### Folgerungen

Unter den gegenwärtigen Eintragungssituation und Nutzung werden sich Änderungen im Säurestatus nur sehr langsam vollziehen. Eine sinnvolle Beobachtung muss dies durch entsprechende Auslegung des Untersuchungsgegenstands wie der Zeitintervalle berücksichtigen. Die Säurebilanz für die Messstelle Bruchsal kann jährlich aus den ermittelten Stofffrachten berechnet werden. Um vom hier verwendeten statischen Säurehaushaltsmodell in Richtung eines besser geeigneten dynamischen Modells zu gelangen, wären Messungen der Basensättigung im Abstand von mindestens 10 Jahren sinnvoll.

## 4 Anorganische Spurenstoffe

### 4.1 As Arsen

#### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen über alle Quellen 0,24 g As/ha a emittiert, zu 9% vom Verkehr [U45: 1998]. Normale Boden-Stäube können Depositionen von ca. 1-5 g As/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Boden-Staub/ha a; 10-25 mg As/kg Bodenstaub).

#### Bilanzdaten 0-10 m

Die durch Bodenmessungen errechneten, verkehrsbedingten As-Massen im Boden liegen bei ca. 12.800 g/km (bezogen auf 0-30 cm Bodentiefe und abzüglich eines natürlichen As-Vorrates von ca. 8.000 g/km, siehe U79 und As-Bilanztafel). Die jährliche As-Anreicherung wurde zu 160 g As/km a berechnet (2,5% vom Vorrat).

#### Bilanzdaten 15-20 m

Im Bilanzraum 15-20 m wurde der As-Gesamteintrag in den Wald mit 6,9 g/ha a berechnet und die Summe aus As-Bestandsdeposition und Streufracht auf diesen Wert gesetzt (Annahme: Änderung im Biopool = 0). Die Sickerwasserfrachten (2002) deuten auf einen recht hohen As-Austrag von 15 g/ha a aus der Streuauflage in den Mineralboden hin. Die Verlagerung klingt im fGo-Bt-Horizont (60-110 cm) ab und erreicht zum Grundwasser hin 1,4 g/ha a. Die Arsenkonzentration im Sickerwasser ist mit 0,6 µg/l für die Grundwasserbeschaffenheit unproblematisch [U62].

Die Arsengesamtgehalte im Oberboden sind mit 3 - 4 mg/kg auf einem niedrigen Niveau [U72]. Steigende As-Gehalte in den Ah werden aufgrund der As-Stoffflussbilanzen mit einer Rate von 8,6 g/ha a erwartet. Insgesamt deutet die As-Bilanz auf eine Anreicherung hin, wobei die Zunahme angesichts der Arsengesamtbestände von 50.000 g/ha unbedeutend ist (+ < 0,1% vom Vorrat).

#### Diskrepanzen

Auf Grundlage der Bodenwiederholbeprobung wurde ein Anstieg der As-Gehalte in 10 Jahren um 50% (von 3,0 auf 4,5 mg/kg; U72) gemessen. Wegen variierender Bestimmungsgrenzen und angesichts der Stoffflussdaten ist dieser Befund

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m							
		Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
		[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	
<b>As [g/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	6,9	-	-	-	10
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	6,9	0	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	66	-	6,9	14,5	-7,6	-11,5%	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	6.510	160	2,5%	3.095	9	14,5	5,9	8,6	0,3%	-
	Al	0,1-0,3 m	13.950	-	-	4.604	23	5,9	4,0	1,9	<0,1%	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	7.690	18	4,0	5,1	-1,1	<0,1%	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	34.355	180	5,1	1,4	3,7	<0,1%	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	1,4	-	-	-	-
	Summe		20.460			49.810				5,5	<0,1%	

wenig plausibel. Die Zunahme wird durch die Boden-Wiederholuntersuchung vermutlich überschätzt.

### Lücken

Die gemessenen Bestandsdepositionen und Streufallfrachten sowie die Streuauflagemessungen sind analysen- und sammeltechnisch bedingt noch nicht ausreichend belastbar.

### Folgerungen

Es wird eine mittlere As-Anreicherung am Straßenrand 0-10 m (2,5%/a) und eine sehr geringe Anreicherung im Wald erwartet. Am Standort Bruchsal steht die Umweltrelevanz von Arsen insgesamt im Hintergrund, da die Einträge im Oberboden fixiert werden bzw. an den (Boden-) Staubpartikeln gebunden bleiben.

## 4.2 Cd Cadmium

### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 0,06 g Cd/ha a emittiert [U45]. Normale Boden-Stäube können Depositionen von ca. 0,05 bis 0,4 g Cd/ha a verursachen (Annahmen: 100-200 kg Boden-Staub/ha a mit 0,5 - 2 mg Cd/kg Bodenstaub).

### Bilanzdaten 0-10 m

Die durch Bodenmessungen errechneten, verkehrsbedingten Cd-Massen im Boden liegen bei ca. 400 g/km (bezogen auf 0-30 cm Bodentiefe und abzüglich eines natürlichen Cd-Vorrates von ca. 200 g/km) bzw. 10 g Cd/km a [U79; Cd-Bilanztafel].

### Bilanzdaten 15-20 m

Der Cd-Gesamteintrag in den Wald wurde nach dem sog. „Ulrichmodell“ mit 2,1 g/ha a berechnet. Die Verlagerung im Boden variiert sehr stark von 3,9 bis 15,5 g/ha a. In der Tiefe 0,6 - 1,1 m findet eine Anreicherung statt (+ 12,1 g Cd/ha a).

Der Waldstandort weist mit 1.970 g Cd/ha insgesamt sehr geringe Cd-Gesamt-vorräte auf, die weiter verarmen (-0,7 g Cd/ha a). Die Cd-Konzentrationen im

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m						
	Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
	[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	
<b>Cd [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	1	-	2,1	-	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	80	-	-	2,1	0	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	17	-	2,1	3,9	-1,8	-10,6%
	Ah-Hor	0-0,1 m	580	10	1,7%	76	27	3,9	15,5	-11,6	-15,3%
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	122	29	15,5	8,3	7,2	5,9%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	440	14	8,3	14,9	-6,6	-1,5%
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	1.316	80	14,9	2,8	12,1	0,9%
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	710	63	2,8	-	-	-
	Summe		580			1.970				-0,7	<0,1%

Sickerwasser liegen in Bruchsal mit 1,2 µg/l [U62] über den üblichen Cadmiumgehalten im Grundwasser [ $< 0,2$  µg/l, vgl. U62].

#### Plausibilität

Unter Berücksichtigung des stark sauren pH-Wertes korrespondieren die Sickerwasserfrachten sehr gut mit den mobilen Cd-Gehalten im Unterboden ( $Cd_{mob}$ ) [U72].

#### Lücken

Die Bestandsdeposition und die Streufrachten sind methodisch bedingt noch unsicher und hier rechnerisch gleich dem Gesamteintrag gesetzt.

#### Raumübertragbarkeit

Der Cd-Fluss im Bereich 15-20 m scheint nicht maßgeblich vom Verkehr beeinflusst zu sein.

#### Folgerungen

Die anhaltende Cd-Anreicherung im Bilanzraum 0-10 m wird weiter beobachtet. Ob die mögliche Cd-Anreicherung des Grundwassers im Bilanzraum 15-20 m eine geogene Anomalie oder auf einen möglicherweise historischen, verkehrsbedingten Cd-Pool zurückzuführen ist, bleibt unklar. Der Cd-Austrag aus dem Oberboden ist hier in wenigen Jahren erschöpft bzw. auf den atmosphärischen Eintrag begrenzt.

Für die Ermittlung von Cd-Bilanzen scheint die Umlagerung von Bodenstäuben (z.B. bei der Saatbettbereitung) eine wichtige Rolle einzunehmen und dürfte selbst an der Autobahnmesstelle Bruchsal keine Bagatellfracht sein. Auch bei der Beurteilung von Cadmiumgehalten in Pflanzen ist dieser Aspekt wichtig.

Boden-Wiederholmessungen sind durch die insgesamt extrem niedrigen Gehalte schwierig.



### 4.3 Co Cobalt

#### Eckdaten

Über die landesweiten Cobaltemissionen liegen noch keine Vergleichszahlen vor. Normale Boden-Stäube können Depositionen von ca. 1-6 g Co/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 10-30 mg Co/kg Bodenstaub).

#### Bilanzdaten 0-10 m

Die Bodentransektuntersuchungen haben historische Co-Einträge von ca. 67 g Co/ha a erbracht. Die Wiederholmessungen ergaben keinen Hinweis auf verkehrsbedingte Cobalteinträge (< 40 g Co/ha a).

#### Bilanzdaten 15-20 m

Der Co-Gesamteintrag in den Wald wurde mit 7,2 g/ha a berechnet. Die Co-Verlagerung im Boden erreicht 89 g/ha a aus dem fGo-Al. Eine deutliche Akkumulation findet im fGo-Bt statt (52 g/ha a).

Der Waldstandort weist einen Pool von 40.000 g Co/ha auf, von dem jährlich 37 g/ha a in den Untergrund ausgetragen werden (- < 0,1 %). Die Co-Konzentration im Sickerwasser liegt mit 35 µg/l [Tiefe 1,1 m; U62] weit über den üblichen Gehalten im Grundwasser [< 1 µg/l; U62].

#### Plausibilität und Übertragbarkeit

Die Boden- und Stoffflussmessungen stimmen insgesamt recht gut überein. Beispielsweise erreichen auch die Co<sub>mob</sub>-Gehalte die höchsten Gehalte im fGo-Bt mit 83 µg/kg. Da Co im Boden versauerungsbedingt extrem leicht mobilisierbar ist, sind auch die hohen Sickerwasserkonzentrationen erklärbar. Die Co-Bilanzdaten sind unter Berücksichtigung der Anreicherung im fGo-Bt übertragbar; Verkehrseinfluss wurde bislang nicht festgestellt.

#### Folgerungen

Der Co-Fluss an der Messstelle Bruchsal wird von den Emissionen des fGo-Al gespeist; der Verkehr hat wohl keinen Einfluss. Der Atmosphärische Eintrag ist gegenüber der Mobilisierung interner Vorräte unbedeutend.

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m						Anmerkung
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]	Change % vP/ a	
<b>Co [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	7,2	0	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	86	-	7,2	8,0	-1	-0,9%
	Ah-Hor	0-0,1 m	2.730	(67)	-	2.083	22	8,0	22,0	-14	-0,7%
	Al	0,1-0,3 m	4.830	-	-	6.370	62	22,0	19,0	3	<0,1%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	6.395	76	19,0	89,0	-70	-1,1%
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	24.552	467	89,0	37,0	52	0,2%
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	24.237	327	37,0	-	-	-
	Summe		7.560			39.487				-30	<0,1%

#### 4.4 Cr Chrom

##### Eckdaten

(Über die landesweiten Cr-Emissionen liegen noch keine Vergleichszahlen vor.)  
 Normale Boden-Stäube können Depositionen von ca. 5-20 g Cr/ha a verursachen  
 (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 50-100 mg Cr/kg Bodenstaub).

##### Bilanzdaten 0-10 m

Bei vorsichtiger Schätzung aus Transektdaten ergeben sich im Randstreifen 0-10 m verkehrsbedingte Anreicherungen von 290 g Cr/km a. Die Bodenwiederholuntersuchungen haben nach 9 Jahren keine verkehrsbedingte Cr-Anreicherung belegen können (< 200 g/ha a).

##### Bilanzdaten 15-20 m

Der Cr-Gesamteintrag in den Wald wurde mit 92 g/ha a berechnet, der Cr-Fluss im Boden liegt bei 30 g/ha a aus der Auflage bis er im fGo-Bt-Horizont auf 6 g/ha a reduziert wird. Die Cr-Konzentration im Sickerwasser liegt mit 1,5 µg/l [U62] im Bereich üblicher Gehalte im Grundwasser [U62].

##### Plausibilität und Raumübertragbarkeit

Die Cr-Mobilität ist weit weniger vom Boden-pH geprägt als die der anderen kationischen Spurenelemente. Die Gehalte an mobilem Cr und die Cr-Frachten sind im Verhältnis zueinander plausibel. Die Cr-Bilanz ist damit großflächig auf Forstflächen übertragbar.

##### Folgerungen

Die Cr-Flüsse sind angesichts der natürlichen Cr-Vorräte von 190 kg/ha sehr gering (< 0,1%) und die Sickerwasserausträge sind nicht umweltrelevant. Die Cr-Flussbilanz dürfte natürlich sein.

#### 4.5 Cu Kupfer

##### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 0,3 g Cu/ha a emittiert (ohne Landwirtschaft; U45). Normale Boden-Stäube können Depositionen von ca. 2 - 10 g Cu/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 20 - 50 mg Cu/kg Bodenstaub).

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung	
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]		Change % vP/ a
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	92	-	-	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	92	0	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	403	-	92	30	62	15,3%
	Ah-Hor	0-0,1 m	16.760	(290)	-	10.618	23	30	22	8	0,1%
	Al	0,1-0,3 m	25.790	-	-	28.829	67	22	12	10	<0,1%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	36.767	62	12	20	-8	<0,1%
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	109.895	123	20	6	14	<0,1%
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	93.203	54	6	-	-	-
	Summe		42.550			186.512			85,5	<0,1%	

**Bilanzdaten 0-10 m**

Im Randstreifen 0-10 m befinden sich verkehrsbedingte Cu-Vorräte von ca. 60.000 g Cu/km (bezogen auf 0-30 cm Bodentiefe 73.000 g Gesamtvorrat abzüglich 13.000 g Hintergrund). Bezogen auf die Autobahnbetriebsdauer ergeben sich 1.200 g Cu/km a. Transekt und Bodenwiederholuntersuchungen bestätigen diesen Wert [U79; Cu-Bilanztabelle].

**Bilanzdaten 15-20 m**

Der Cu-Gesamteintrag im Waldbereich wurde mit 273 g/ha a errechnet. Eine Cu-Anreicherung wurde auf Grund der Flussbilanz im Oberboden ermittelt (+ 168 g/ha a). Die Cu-Gehalte im Sickerwasser liegen mit 5 µg/l [U62] im oberen Bereich von typischen Grundwasserkonzentrationen [U62]. Die Cu<sub>mob</sub>-Gehalte sind im Ah mit ca. 100 µg/kg deutlich erhöht [U72]. Bezogen auf den Standort bis 1 m Tiefe wurde eine jährliche Cu-Anreicherung von ca. 0,5 % vom Cu-Vorrat ermittelt.

**Plausibilität, Lücken und Diskrepanzen**

Da Cu in sauren Böden relativ immobil ist, ist eine Anreicherung im humosen Oberboden plausibel. Die Cu-Aufnahme über die Wurzeln (essentielles Spurenelement) wurde bislang nicht quantifiziert. Zu erwarten ist, dass die Cu-Zunahme im Ah durch Entzüge über die Wurzeln gemindert wird. Die Bodenmessung bestätigt die Prognose zunehmender Gehalte im Ah nicht, die Messdaten von 4 Untersuchungsterminen streuen bei insgesamt sehr niedrigen Gehalten uneinheitlich (< 100 g/ha a). (Die 10-Jahres-Bilanzbestimmungsgrenze liegt hier im Bereich der Anreicherung. Überdies könnte die Cu-Zunahme im Oberboden bedingt durch Wurzelaufnahme derzeit überschätzt sein.)

**Raumübertragbarkeit**

Die Cu-Konzentrationen im Niederschlag [U42] und in der Waldstreu [U52] belegen den Verkehrseinfluss. Die Cu-Deposition ist im Vergleich zu Bergerhoffmessdaten [U12] erhöht. Die Cu-Bilanz ist angesichts der Waldrandlage und verkehrsbedingten Einträge nur auf eine „15-20 m Abstandslinie“ übertragbar.

**Folgerungen**

Verkehrsbedingte Cu-Einträge um die 2.000 g Cu/ha a - wie hier im Randstreifen 0-10 m - sind in dieser Größenordnung beispielweise im Weinbau übliche Aufwandsmengen von Pflanzenschutzmitteln. Die umweltpolitische Beurteilung der

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m					
	Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
	[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	
<b>Cu [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	48	-	273	-	-	9, 10
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	273	0	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	1.495	-	273	202	71	4,7%
	Ah-Hor	0-0,1 m	32.000	1.200	3,8%	5.698	86	202	34	168	2,9%
	Al	0,1-0,3 m	41.000	-	-	7.800	29	34	118	-84	-1,1%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	6.249	58	118	40	78	1,2%
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	35.852	1025	40	13	27	0,1%
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	32.037	675	13	-	-	-
	Summe		73.000			57.093				260	0,5%

emissionsbedingten Cu-Anreicherung an Straßen sollte daher die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft einbeziehen. Auch im Randstreifen 15-20 m deuten die Cu-Depositionen noch auf einen beobachtungsrelevanten Einfluss des Verkehrs hin (über 50% des Cu-Eintrags ist verkehrsbedingt).

Für die Ermittlung von Cu-Bilanzen spielt die Umlagerung von Bodenstäuben ebenfalls eine wichtige Rolle.

#### 4.6 Hg Quecksilber

##### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg industriell ca. 0,2 g Hg/ha a emittiert [U45: 2000]. Normale Bodenstäube können Depositionen von ca. 0,01-0,1 g Hg/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 0,1-0,5 mg Hg/kg Bodenstaub).

##### Bilanzdaten 0-10 m

Die Bodenuntersuchungen haben keinen verkehrsbedingten Hg-Eintrag im Randstreifen ergeben (< 1 g/ha a) [U72].

##### Bilanzdaten 15-20 m

Die Hg-Bestandsdeposition wurde - ausschließlich gestützt durch Streufalldaten - mit 0,4 g Hg/ha a angesetzt. Der im Boden gemessene Hg-Fluss aus der Auflage reicht von 0,3 g/ha a bis auf 0,06 g/ha a bei 0,3 m Bodentiefe. Im Unterboden wurden mobile Vorräte von 20 g Hg<sub>mob</sub>/ha ermittelt [U72: 1992].

##### Plausibilität

Es liegen wenig Vergleichsdaten zu Hg-Stoffflussbilanzen und mobilen Hg-Vorräten in Böden vor. Der Hg-Gesamteintrag in den Wald konnte nicht ermittelt werden, da hierfür - bedingt durch die Verflüchtigung aus dem Auffanggefäß - noch kein Messverfahren vorliegt. Die Hg-Aufnahme über die Gasphase dürfte ein dominierender Eintragspfad sein. Der Hg-Gesamteintrag in den Wald dürfte deshalb über 0,4 g/ha a liegen. Ein Hg-Einfluss der Autobahn wurde bislang nicht festgestellt, allerdings fehlen für eine Interpretation noch ausreichend sensitive Monitoringverfahren.

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m						
	Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
	[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	
<b>Hg [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	4
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	0,44	-	-	11
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	7	-	0,44	0,33	0,12	1,6%	
	Ah-Hor	0-0,1 m	63	< 1	-	101	-	0,33	0,16	0,17	0,2%
	Al	0,1-0,3 m	99	-	-	57	-	0,16	0,06	0,10	0,2%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	90	2	0,06	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	172	7	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	259	14	-	-	-	-
	Summe		162			427					

### Folgerungen

Die landesweiten, industriellen Emissionen überschreiten die durch Winderosion entstehenden Hg-Gehalte der Luft. Damit nimmt Hg unter den Schwermetallen eine Sonderstellung ein; die Hg-Flüsse sind noch deutlich anthropogen. In der Forstvegetation, der Streuauflage und im Oberboden ist eine Hg-Akkumulation in der Größenordnung von 0,1 bis 1 g/ha a zu erwarten. (Die Umweltrelevanz der Hg-Anreicherung kann derzeit nicht beurteilt werden.)

## 4.7 Ni Nickel

### Eckdaten

Normale Boden-Feinstäube können Depositionen von ca. 5-20 g Ni/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 50-100 mg Hg/kg Bodenstaub).

### Bilanzdaten 0-10 m

Die Bodentransektaten deuten auf jährliche Ni-Einträge in Höhe von 210 g/km a hin [U79]. (Mit Bodenwiederholmessungen war eine verkehrsbedingte Ni-Anreicherung in den Jahren 1992 bis 2001 nicht nachweisbar (< 200 g/ha a).)

### Bilanzdaten 15-20 m

Die Ni-Einträge im Wald wurden mit 43 g Ni/ha a berechnet. Der Stofffluss variiert innerhalb des Bodens von 22 bis 86 g/ha a. Die Stoffflussbilanz weist die höchsten Defizite im fGo-Al auf (-51 g/ha a). Der Ni-Vorrat ist mit 150 kg/ha im Verhältnis zu den Ni-Verlusten (65 g/ha a) sehr hoch.

Der Ni<sub>mob</sub>-Vorrat ist im fGo-Bt mit 2,6 kg hoch. Dem entsprechend sind auch die Ni-Gehalte im Sickerwasser (>1,1 m) mit 28 µg/l [U62: 2002] hoch und liegen weit über den üblichen Ni-Gehalten im Grundwasser [< 3 µg/l; U62].

### Plausibilität und Raumübertragbarkeit

Die Wurzelaufnahme konnte noch nicht berücksichtigt werden. Dies würde zur Vergrößerung der Gesamtverluste im Boden führen.

Die Ni-Bilanz dürfte großflächig auf saure Waldstandorte übertragbar sein, ein Einfluss des Verkehrs ist in 15-20 m unwahrscheinlich.

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung	
		Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]		Change [.../ha a]
<b>Ni [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-			43			
	Holz	15-0,1 m	-	-	-				43	0	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	338	-	43	54	-11	-3,3%
	Ah-Hor	0-0,1 m	11.000	(210)	-	7.306	392	54	49	5	0,1%
	Al	0,1-0,3 m	18.000	-	-	17.817	236	49	22	27	0,2%
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	22.682	146	22	73	-51	-0,2%
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	99.850	2632	73	86	-13	<0,1%
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	88.343	1779	86	-	-	-
	Summe		29.000			148.000				-43	<0,1%

### Folgerungen

Die Ni-Austräge sind relativ hoch, jedoch dürfte es sich hier weitgehend um einen natürlichen, verwitterungsbedingten Prozess handeln. Die geogenen Ni-Vorräte „sichern“ eine anhaltende Auswaschung auf Jahrtausende. Demgegenüber wird eine Fällung/Bindung in der noch kalkhaltigen, ungesättigten Zone erwartet (nicht untersucht).

## 4.8 Pb Blei

### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 0,8 g Pb/ha a emittiert [U45]. Boden-Feinstäube, die häufig mit historischen Bleiablagungen aus ehemals verbleiten Kraftstoffen behaftet sind, können Depositionen von ca. 4 - 40 g Pb/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 40 - 200 mg Pb/kg Bodenstaub). Durch den Verkehr werden heute keine nennenswerten Pb-Mengen mehr emittiert.

### Bilanzdaten 0-10 m

Die verkehrsbedingten Bleivorräte im Randstreifen 0-10 m betragen ca. 245.000 g Pb/km (bezogen auf 0-30 cm Bodentiefe 275.000 g Gesamtvorrat abzüglich ca. 30.000 g Hintergrund). Bezogen auf die Autobahnbetriebsdauer bis ca. 1990 ergeben sich historische Einträge von 6.000 bis 16.000 g Pb/km a. Die Jahresbilanzen, die sich aus den Bodenwiederholuntersuchungen seit 1992 errechnen lassen, liegen im Bereich der Bilanz-BG bei < 3.500 g Pb/ha a. (Pb-Flussdaten liegen hier noch nicht vor.)

### Bilanzdaten 15-20 m

Im Wald wurde ein Pb-Gesamtvorrat von 164.000 g Pb/ha ermittelt. Hiervon dürften ca. 20.000 bis 40.000 g/ha verkehrsbedingt sein. Die heutigen Pb-Einträge wurden mit 102 g/ha a berechnet. Der Pb-Fluss im Boden erreicht 737 g/ha a aus der Streuauflage (-709 g/ha a) und klingt innerhalb von 0,3 m extrem schnell auf 11 g/ha a ab. Abnehmende Pb-Vorräte in der Streuauflage und zunehmende Gehalte im Oberboden wurden bei der Bodenwiederholbeprobung bestätigt. Die Sickerwasserkonzentration in 1,1 m Tiefe liegt mit 1 µg/l [U62: 2002] in einem für Grundwässer typischen Bereich [U62]. Die Bleifrachten in das Grundwasser liegen bereits mehrjährig auf einem niedrigen Niveau. Der Blei-Gesamtvorrat in der BioPedosphäre variiert mit < 0,1% / a gering.

### Lücken

Die mögliche Pb-Verlagerung im Randstreifen 0-3 m kann angesichts der hohen Bilanz-BG mit Boden-Wiederholuntersuchungen nicht beobachtet werden (Bilanz<sub>10a</sub>-BG 3.500 g/ha a).

### Plausibilität

Abnehmende Pb-Vorräte in der Streuauflage (15-20 m) wurden bei der Boden-Wiederholbeprobung bestätigt. Dass der Großteil des aus der Biosphäre mobilisierten Bleis derzeit im Oberboden akkumuliert, konnte bei der Pb<sub>mob</sub>-Wiederholuntersuchung bestätigt werden: die mobilen Pb-Gehalte steigen von 4.400 auf 5.900 µg Pb<sub>mob</sub>/kg kontinuierlich an [U72]. Die Wiederholuntersuchung für Pb<sub>ges</sub> im Ah liegt im Bereich der Unschärfe (< 1.000 g/ha a). Die Bleifrachten in das Grundwasser sind bereits mehrjährig (1997-2002) auf einem niedrigen Niveau (< 5 g/ha a) und wurden auch nach dem Wechsel der Saugkerzenmateri-

alien bestätigt [U75].

### Diskrepanzen

Das Rückhaltevermögen des Unterbodens ist angesichts der sauren Verhältnisse erstaunlich gut. Aufgrund der mobilen Pb-Vorräte im fGo-Bt wären höhere Frachten zu erwarten.

### Raumübertragbarkeit

Die Pb-Bilanz ist exakt nur auf einen 15-20 m Randstreifen mit ähnlichen Verkehrs- und Standortverhältnissen übertragbar. Bei bekannten Pb-Vorräten in Waldböden ist die relative Pb-Bilanz jedoch auch auf andere, saure Waldstandorte extrapolierbar.

### Folgerungen

Das gute Rückhaltevermögen in 15-20 m für die historisch verkehrsbedingten Vorräte ist erstaunlich und wird angesichts der möglichen Veränderungen (z.B. Humusabbau) weiter beobachtet. Eine Grundwasserbeeinträchtigung ist in 15-20 m derzeit auszuschließen. Im Autobahnrandstreifen 0-10 m sind die derzeitigen Bilanzierungen noch zu ungenau und unvollständig.

Für die Ermittlung von Pb-Bilanzen spielt die Umlagerung von Bodenstäuben heute allgemein eine wichtige Rolle.

## 4.9 Sb Antimon

### Eckdaten

Über die Sb-Gesamtemissionen liegen noch keine Katasterdaten vor. Boden-Feinstäube können Depositionen von ca. 0,1-0,6 g Sb/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 1-3 mg Sb/kg Bodenstaub).

### Bilanzdaten 0-10 m

Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich derzeit verkehrsbedingte Sb-Massen von ca. 2.500 g/km und 130 g Sb/km a [U79].

### Bilanzdaten 15-20 m

Die heutigen Sb-Einträge wurden mit 36g/ha a berechnet und sind deutlich verkehrsbedingt. Im Vergleich zum Pool stellen sie eine nennenswerte Größe dar. Sb stammt überwiegend aus dem Bremsabrieb.

	Tiefe [cm]	Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m					Anmerkung		
		Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]		Change % vP/ a	
<b>Pb [g/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	10	-	102	-	-	-	10
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	478	-	-	102	0	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	11.891	-	102	737	-635	-5,3%	
	Ah-Hor	0-0,1 m	129.000	<3.500	<3%	46.443	4800	737	97	640	1,4%	
	Al	0,1-0,3 m	146.000	-	-	20.875	1255	97	11	86	0,4%	
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	38.459	853	11	2	9	<0,1%	
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	46.527	1449	2	2	1	<0,1%	
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	44.997	964	2	-	-	-	
	Summe		275.000			164.000				100,4	<0,1%	

**Plausibilität**

Sb ist als Bestandteil von Bremsbelägen ein Verkehrsindikator im Spritzwasserbereich. In Graskulturen in 1 m Höhe entlang von Straßen werden beispielsweise ca. 0,3 mg Sb /kg TS Gras ermittelt (Median BW 0,03 mg/kg; U5211) - also 10-fach höhere Einträge als im Hintergrundbereich. Der Depositionshintergrund dürfte bei ca. 1 g/ha a liegen [U12]. Verkehrsbedingte Einträge im Bereich 0-3 m von 100 g/ha a sind durchaus realistisch. Es ist zu erwarten, dass Sb ähnlich wie As im Ah und fGo-Bt akkumuliert.

**Folgerungen**

Die Stoffflüsse von Sb sind im Bereich der Autobahn beobachtungswürdig. Bei Sb ist eine Verlagerung bei hohen pH-Werten im Boden nicht auszuschließen.

**4.10 TI Thallium**

**Bilanzdaten**

Thallium wurde stichprobenartig in Form einer Bodentransektuntersuchung untersucht [U72: 2001]. Die mobilen Thalliumgehalte steigen zur Straße hin von 3 auf 8 µg TI<sub>mob</sub>/kg. Bei vorsichtiger Schätzung ergibt sich ein leicht löslicher verkehrsbedingter Vorrat von ca. 10 g TI/km.

**Folgerung**

Der verkehrsbedingte TI-Eintrag dürfte nicht umweltrelevant sein.

**4.11 Zn Zink**

**Eckdaten**

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg industriell weniger als 0,001 kg Zn/ha a emittiert [U45: 2000]. Normale Boden-Feinstäube können Depositionen von ca. 0,01 - 0,1 kg Zn/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 0,1-0,5 g Zn/kg Bodenstaub).

**Bilanzdaten 0-10 m**

Die verkehrsbedingten Zn-Vorräte im Bilanzraum 0-10 m werden mit ca. 190 kg/km und die jährlichen Zunahmen mit 4 kg/km a berechnet [U79].

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m					Anmerkung	
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]		Change % vP/ a
<b>Sb [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	36,9	-	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	0	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	136	-	-	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	1.810	130	7,2%	547	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	1.790	-	-	459	-	-	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Summe	3.600			1.142					



### Bilanzdaten 15-20 m

Der Zn-Gesamteintrag in den Wald wurde mit 1,1 kg/ha a berechnet. Hohe Zn-Flüsse liegen in der Tiefe 0,3-0,6 m vor (1,8 kg /ha a). Eine massive Akkumulation findet im fGo-Bt statt (+ 1,6 kg/ha a). In der BioPedosphäre werden insgesamt 0,9 kg Zn/ha a akkumuliert (0,27% vom Vorrat). Die Zn-Gehalte im Sickerwasser liegen mit 30 µg/l [U62: 2002] im Bereich mittlerer Grundwasserkonzentrationen unter Acker [U62].

### Plausibilität

Die Zinkgehalte im Boden sind mit 10 bis 20 mg/kg geogen sehr niedrig. Auch die mobilen Vorräte sind gering. Verkehrsbedingt geringfügig erhöhte Zn-Einträge sind nicht auszuschließen. Dass Zink, ähnlich wie Cadmium, im fGo-Bt akkumuliert, ist aufgrund ihrer geochemischen Verwandtschaft plausibel. Wie bei Cd ist auch bei Zn der Auswaschungsgrad weit fortgeschritten. Die Gesamtbilanz ist wegen verkehrsbedingten Einträgen dennoch leicht positiv.

### Lücken

Ein Teil des Zn-Überschusses dürfte (in Bruchsal) auch in der Biosphäre akkumuliert werden. Die Wurzelaufnahme wurde noch nicht berücksichtigt. Dies wird zur Verringerung der berechneten Zunahme im Boden führen.

### Raumübertragbarkeit

Die Zn-Konzentrationen im Freiland-Niederschlag sind mit 25 µg/l gegenüber anderen Messstellen erhöht [U42: 2002].

### Folgerungen

Im Bilanzraum 15-20 m sind die Zn-Einträge zu über 50% verkehrsbedingt. Die Zn-Depositionen sind in Bruchsal nur zu einem geringen Anteil durch die Umlagerung von Bodenstäuben erklärbar. Da Zn für die menschliche Gesundheit wenig bedenklich ist, gehört es nicht zu den langjährig beobachteten und bei Emissionsminderungsmaßnahmen berücksichtigten Stoffen.

(Ob die anhaltende Zn-Anreicherung in der BioPedosphäre umweltrelevant ist, kann derzeit nicht beurteilt werden.)

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m							
		Tiefe	Pool <sub>ges</sub>	Change	Change	Pool <sub>ges</sub>	Pool <sub>mob</sub>	Input	Output	Change	Change	Anmerkung
		[cm]	[./km]	[./km a]	% vP/ a	[.../ha]	[.../ha]	[.../ha a]	[.../ha a]	[.../ha a]	% vP/ a	
<b>Zn [kg/...]</b>												
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	0,1	-	1,10	-	-	-	9, 10
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	1,10	0	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	2,6	-	1,10	0,78	0,32	12,6%	
	Ah-Hor	0-0,1 m	120	4	3,3%	17,4	3,08	0,78	0,67	0,10	0,6%	
	Al	0,1-0,3 m	127	-	-	39,5	2,77	0,67	0,47	0,21	0,5%	
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	51,7	2,02	0,47	1,81	-1,34	-2,6%	
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	114,3	1,63	1,81	0,21	1,59	1,4%	
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	97,9	0,83	0,21	-	-	-	
		Summe	247			323,3				0,9	0,27%	

#### 4.12 PGE Platingruppenelemente (Rh, Pd, Pt)

##### Eckdaten

Von der A5 werden im Streckenabschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich 13 g Pt/km emittiert, Tendenz steigend [U45: 2000].

##### Bilanzdaten

Die Pt- und Rh-Gehalte im Boden nehmen mit der Entfernung von der Straße ab. Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich Pt-Gesamtvorräte im Randstreifen 0-10 m von 2 g Pt/km und 0,2 g Rh/km (0-10 cm) [U72: 1995]. Die Pd-Gehalte im Boden streuen uneinheitlich. Auf Basis von Graskulturdaten werden im Bereich 0-3 m mögliche vegetationsbedingte Einträge von < 0,1 g PGE-Element/ha a geschätzt [U44].

##### Folgerungen

Angesichts der anhaltenden PGE-Emissionen des Verkehrs und der prozentual geringen Wiederfindung am Straßenrand sollte die Suche nach der Stoffsenke unter Einbezug der Hydrosphäre fortgeführt werden.

## 5 Organische Spurenstoffe

### 5.1 PAK Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

#### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 18 g PAK/ ha a und 0,4 g BaP/ha a emittiert; davon 18% vom Verkehr [U45]. Von der A5 werden im Streckenabschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich je Fahrtrichtung 2.000 g PAK<sub>16</sub>/km bzw. 50 g BaP/km emittiert [U45: 2000], Tendenz sinkend. Dies entspricht bei einer vollständigen Deposition im Randstreifen 0-3 m einem möglichen Eintrag von 6.500 g PAK<sub>16</sub>/ha a und 170 g BaP/ha a je Fahrtrichtung.

Boden-Feinstäube können PAK-Depositionen von ca. 0,05 bis 0,4 g PAK<sub>16</sub>/ha a (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 0,5 - 2 mg PAK<sub>16</sub>/kg Bodenstaub) bzw. 0,005 bis 0,04 g BaP/ha a verursachen.

#### Bilanzdaten 0-10 m

Im Randstreifen 0-10 m liegen die PAK-Vorräte bei ca. 100.000 g PAK<sub>16</sub>/km (0-30 cm), bezogen auf die Autobahnbetriebsdauer ergeben sich hier durchschnittliche Anreicherungen von ca. 2.000 bis 4.000 g PAK<sub>16</sub>/km a [Tab 5, U79].

Im Randstreifen 0-3 m deuten die Bodenmessungen auf eine jährliche Anreicherung von PAK im Oberboden von 3.000 bis 5.000 g PAK<sub>16</sub>/ha a bzw. 200 bis 400 g BaP/ha a hin. Der PAK-Vorrat in der Zone 0-3 m hat sich im Jahr 2001 auf 230.000 g PAK<sub>16</sub>/ha erhöht (bezogen auf 0-30 cm Bodentiefe und abzügl. eines Hintergrundwertes von 3.000 g/ha). Die jährliche Anreicherung beträgt im Oberboden der Zone 0-3 m derzeit ca. 7 % vom Gesamtvorrat.

(PAK-Flussmessungen liegen hier noch nicht vor.)

#### Bilanzdaten 15-20 m

Der PAK-Gesamteintrag in den Wald wurde mit 8,5 g PAK<sub>16</sub>/ha a bzw. 0,4 g BaP/ha a berechnet. Der PAK-Vorrat bis 1 m Tiefe beträgt hier 2.600 g PAK<sub>16</sub>/ha. Hiervon entfallen 77% auf den Oberboden. Die jährliche Anreicherung beträgt hier ca. 0,3% vom Gesamtvorrat.

#### Lücken

Belastbare PAK-Flüsse mit dem Sickerwasser konnten bislang nicht gemessen werden. Überdies ist die PAK-Anreicherung über die Gasphase unbekannt. Auch die PAK-Gehalte in der Streu variieren sehr stark und sind ebenfalls noch wenig gesichert. Eine weitere Bilanzlücke stellen die PAK-Vorräte im Unterboden dar.

#### Plausibilität

Die Emissionsmassen (siehe Eckdaten) entsprechen in etwa den Mengen, die in der Zone 0-3 m jährlich angereichert wurden.

Im Bilanzraum 15-20 m überrascht eine jährliche Anreicherung von nur 0,3 % vom Vorrat. Die historischen PAK-Einträge müssten demnach sehr hoch gewesen sein, der Abbau sehr gering oder aber die heutigen Einträge werden noch unterschätzt. Die Bodenwiederholmessungen im Bereich 15-20 m haben hierzu keine weitere Klärung gebracht (< 30 g PAK<sub>16</sub>/ha a).

#### Raumübertragbarkeit

Die PAK-Freilanddeposition in Bruchsal, 15-20 m neben der A5, liegt auf einem ähnlichen Niveau wie auf einer Freifläche in der Stadt Kehl und nur geringfügig

über Vergleichswerten aus Wilhelmsfeld und Baltmannsweiler [U46]. Die Deposition dürfte im oberen Drittel des landesweiten Hintergrundes liegen.

### Folgerungen

Die katastermäßig erfassten Emissionsmassen entsprechen in etwa den Mengen, die in der Zone 0-3 m jährlich angereichert wurden. PAK werden am Straßenrand in 0-3 m in einer hohen Rate anhaltend angereichert. Der tatsächliche Verbleib im Boden sollte durch PAK-Flusssmessungen intensiver beobachtet werden.

Die PAK-Deposition liegt im Randstreifen 15-20 m neben der A5 in etwa im oberen Drittel des landesweiten Hintergrundes. Hier überrascht eine jährliche Anreicherung von nur 0,3 % vom Vorrat, denn die historischen PAK-Einträge müssten demnach sehr hoch gewesen sein, der Abbau sehr gering oder aber die heutigen Einträge werden noch unterschätzt.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Reemission von PAK aus Böden heute – angesichts der anhaltenden Emissionen - außerhalb der Siedlungsgebiete bisher noch keine hohe Bedeutung hat.

## 5.2 PCB Polychlorierte Biphenyle

### Eckdaten

Normale Boden-Feinstäube können PCB-Depositionen von ca. 0,003 -0,06 g PCB<sub>f</sub>/ha a verursachen (Annahme: 100-200 kg Bodenstaub/ha a; 30-300 µg

	Tiefe [cm]	Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung		
		Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]		Change [.../ha a]	Change % vP/ a
<b>PAK 16 (g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	8,5	-	-	-	
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	6,3	2	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	214	-	-	-	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	32.800	2.400	7,3%	1.970	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	71.300	-	-	450	-	-	-	-	
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Summe		104.100			2.634				0,3%	
<b>Benzo(a)pyren [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	0,44	-	-	-	
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	12	-	-	-	-	
	Ah-Hor	0-0,1 m	2.850	208	7,3%	130	-	-	-	-	
	Al	0,1-0,3 m	6.210	-	-	32	-	-	-	-	
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Summe		9.060			174				0,2%	

PCB<sub>6</sub>/kg Bodenaub). (Über die landesweiten PCB-Emissionen liegen derzeit keine Katasterdaten vor.)

#### Bilanzdaten 0-10 m

Der verkehrsbedingte PCB-Pool im Randstreifen 0-10 m liegt bei etwa 800 g PCB<sub>6</sub>/km, bezogen auf die Betriebsdauer bei 18 g PCB<sub>6</sub>/km a. Seit 1992 lag die jährliche Anreicherung in der Zone 0-3 m bei ca. 30 g PCB<sub>6</sub>/ha a (ca. 8% des Vorrats).

#### Bilanzschätzung 15-20 m Zone

PCB-Flussmessungen liegen bislang nur für den Streufall vor: 0,06 g PCB<sub>6</sub>/ha a.

Mit Hilfe von PCB-Depositionsmessungen, an der hinsichtlich der Deposition (z.B. PAK) vergleichbaren Intensiv-Messstelle Kehl, kann für Bruchsal ein ähnlicher PCB-Gesamteintrag in den Wald von ca. 0,4 g PCB<sub>6</sub>/ha a angesetzt werden [U46 i.V.]. Bei einem Vorrat von 30 g PCB<sub>6</sub>/ha ergibt sich eine theoretische jährliche Zunahme von 1,4 %, abzüglich der Ausgasungsverluste.

#### Folgerungen

Die PCB-Poolzunahme am Straßenrand fällt unerwartet hoch aus. Angesichts der anhaltenden Einträge sollte die Pufferfunktion im Randstreifen 0-3 m weiter beobachtet werden. Im Wald ist die PCB-Bilanz mit Blick auf ubiquitäre Verhältnisse umweltrelevant.

### 5.3 PCDD/F Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane

#### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 1,6 µg I-TEq/ha a emittiert, wovon jedoch nur 6% vom Verkehr stammen [U45].

Normale Boden-Feinstäube können PCDD/F-Depositionen von ca. 0,1-2 µg

		Bilanzraum 0-10 m			Bilanzraum 15-20 m						
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]	Change % vP/ a	Anmerkung
<b>Summe PCB 6 [g/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	0,4	-	-	-	13
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	4	-	-	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	227	18	7,9%	19	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	583	-	-	8	-	-	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Summe		810			30				1,4%	

I-TEq/ha a verursachen (100-200 kg/ha a Boden-Staubniederschlag mit 1-10 ng I-TEq/kg). Von der A5 werden im Streckenabschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich 32 µg I-TEq/km a je Fahrtrichtung emittiert, Tendenz steigend [U45: 2000].

**Bilanzdaten 0-10 m**

Bei vorsichtiger Schätzung ergeben sich verkehrsbedingte historische PCDD/F-Massen von 4,5 mg I-TEq/km, bezogen auf die Betriebsdauer ca. 100 bis 200 µg/km a.

**Bilanzdaten 15-20 m**

Im Bereich des Waldes wurde im Jahr 1998 ein PCDD/F-Vorrat von ca. 3 mg/ha (Streuauflage und Ah) ermittelt. (PCDD/F-Flussmessungen liegen noch nicht vor.)

**Folgerungen**

Die historischen Depositionsmassen in der Zone 0-10 dürften wegen Ausgasung, Abbau und Verlagerung sowie Verdriftung über 200 µg/km a liegen.

Die Bodenuntersuchungen deuten darauf hin, dass die Katasterdaten die tatsächlichen Emissionen unterschätzen.

In Wald sind periodische PCDD/F-Depositionsmessungen zur Erst-Einschätzung der derzeitigen PCDD/F-Flüsse hilfreich.

**5.4 MTBE Methyltertiärbutylether**

**Bilanzdaten**

MTBE wurde in Bruchsal im Bilanzraum 15-20 m in einer Konzentration von 0,2 µg/m<sup>3</sup> gemessen [U43: 2002]. In der Zone 0-3 m sind Luftkonzentrationen von 0,5 bis 1,4 µg/m<sup>3</sup> zu erwarten. (Sickerwasserdaten liegen nicht vor.)

		Bilanzraum 0-10 m				Bilanzraum 15-20 m				Anmerkung	
	Tiefe [cm]	Pool <sub>ges</sub> [./km]	Change [./km a]	Change % vP/ a	Pool <sub>ges</sub> [.../ha]	Pool <sub>mob</sub> [.../ha]	Input [.../ha a]	Output [.../ha a]	Change [.../ha a]		Change % vP/ a
<b>PCDD/F I-TEq [mg/...]</b>											
Atmosphäre	Luft	>0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biosphäre	Blätter	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Holz	15-0,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pedosphäre	Auflage	0,1-0 m	-	-	-	0,9	-	-	-	-	-
	Ah-Hor	0-0,1 m	4,5	0,12	2,7%	2,1	-	-	-	-	-
	Al	0,1-0,3 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Al	0,3-0,6 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	fGo-Bt	0,6-1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrosphäre	fGo-fGr	>1,1 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Summe		4,5			3,0					

### Folgerungen

Gemäß Umweltbundesamt [2003, siehe U131] können erhöhte MTBE-Gehalte im Grundwasser teilweise nicht durch punktuelle Verunreinigungen erklärt werden. Überdies zeigen sich deutliche Unterschiede in der Grundwasserbelastung zwischen ländlichem und städtischem Raum, die durch höhere Einträge über den Luftpfad im verkehrsbelasteten städtischen Raum erklärt werden könnten.

Für erste MTBE-Stoffflussbetrachtungen sind Spritz-, Straßenablauf und Sickerwasseruntersuchungen im Randbereich der Straßendecke hilfreich.

## 5.5 BTX Benzol, Toluol und Xylole

### Eckdaten

Bezogen auf die Landesfläche werden in Baden-Württemberg anthropogen 0,8 kg/ha a emittiert, zu 94% vom Verkehr. Von der A5 werden im Streckenschnitt der Messstelle Bruchsal jährlich 214 kg Benzol/km emittiert, Tendenz sinkend [U45: 2000]. Benzol wird in der Atmosphäre und in der Biosphäre recht gut abgebaut.

### Bilanzdaten

BTX wurden in Bruchsal im Boden stichprobenartig untersucht [U72]. In der Streuauflage wurden ca. 2 mg BTX/kg ermittelt. Benzol war überwiegend nur in der L-Auflage (L: Litter, wenig zersetzte Pflanzenreste) vorhanden. Bereits in der Of-Auflage (f: vermodert) war Benzol deutlich angereichert. Toluol, Ethylbenzol und Xylole waren hingegen in der Of-Auflage angereichert. In der Zone 0-3 m wurden im Mineralboden geringfügig höhere Benzolkonzentrationen gemessen. Die BTX-Massen erreichen in der Zone 15-20 m < 1 g/ha Benzol (Streuauflage und fGo-Al) und 300 g Toluol/ha. Bei sehr grober Schätzung ergibt sich im Boden eine verkehrsbedingte Benzolmasse von maximal 0,03 kg Benzol/km (10 µg Benzol/kg; 0-10 m; 0-30 cm Tiefe).

### Folgerungen

Die Messungen in Bruchsal haben bestätigt, dass im Straßenrandbereich angesichts der Emissionsmassen nur Benzol-Bagatellmassen in der Größenordnung von < 0,1 % der Emission im Boden zwischengespeichert werden. Die Pedosphäre hat - abgesehen von punktuellen Schadensfällen - für Benzol-Bilanzen keine Bedeutung. Für die Bilanzierung der BTX-Flüsse entlang von Straßen ist der Übergang in die Hydrosphäre (insbesondere nachts und im Winter) unmittelbar mit dem Straßenablaufwasser ein relevantes Bilanzglied. Für Umweltfragen ist neben der unmittelbaren gesundheitlichen Auswirkung über die Luft weiterhin - und auch nur unter extrem ungünstigen Umständen - die Benzolaufnahme über Nahrungspflanzen von Interesse. Die Bilanzierungszeiträume betragen hier Stunden bis Tage.

## 5.6 Phthalate

In den Jahren 1992 und 1995 wurden in der Zone 15-20 m ausgewählte Phthalate im Oberboden und der Streuauflage untersucht. Die Gehalte streuen von Jahr zu Jahr und sind derzeit nicht interpretierbar.

## 5.7 Pestizide

In Bruchsal wurden im Jahr 2001 20 verschiedene chlororganische Pestizide im Bodentranssekt 0-100 m in der Tiefe 0-10 cm untersucht (u.a. Aldrin, Dieldrin,

Endrin, DDT, HCH, HCB) [U72: 2001]. Nur bei HCB ist eine Abhängigkeit zur Entfernung von der Straße erkennbar, die Gehalte nehmen von  $< 0,5$  auf  $3,5 \mu\text{g}/\text{kg}$  zu. Damit ergeben sich bei vorsichtiger Schätzung ca.  $4 \text{ g HCB}/\text{km}$  verkehrsbedingte Anreicherung. Angesichts der großflächigen HCB-Verbreitung in Böden ist der verkehrsbedingte HCB-Eintrag an der Autobahn eher eine Bagatellfracht.



## 6 Umweltprognosen

Ausgehend von der ersten, groben Umweltbilanz an der Intensiv-Messstelle Bruchsal sowie weiteren Umweltbeobachtungen im Land werden folgende Umweltveränderungen erwartet.

Die Prognosen sind nach Außenbereich (abseits von Einzelquellen) und Verkehrsbereich (am Beispiel der A5) gegliedert.

### 6.1 Außenbereich

#### Atmosphäre

Für den Stoffhaushalt der Atmosphäre haben die aktuellen CO<sub>2</sub>-Emissionen ein maßgebliches Veränderungspotential.

Es wird angenommen, dass im Außenbereich, abseits von Einzelquellen (z.B. ab 15 m neben einer Autobahn) 50 bis 99% der atmosphärischen Stäube aus geogenen Quellen stammen (z.B. ackerbaubedingte Winderosion, Abriebe von Feldwegen). Die Bedeutung der Reemission von anthropogenen Schadstoffen aus Böden für Fragen der Luftqualität nimmt zu (z.B. für PCB, PCDD/F, Kfz-Pb).

#### Biosphäre

Anthropogene N-Einträge (gefolgt von Säureeinträgen) sind derzeit der Hauptverursacher für anthropogene Veränderungen der Biosphäre.

Bedingt durch atmosphärische Bodenstaubumlagerungen sind die Spurenstoffgehalte einjähriger Pflanzen(teile) weitgehend durch geogene Stäube verursacht (Ausnahme: Zn, Cu, Mn und andere Nährstoffe). Demnach sind von Jahr zu Jahr variierende Stoffgehalte einjähriger Pflanzen(teile) überwiegend witterungs- und ernährungsbedingt (trockenes Jahr führt zu mehr Winderosion und höheren Stoffeinträgen).

Hg und PAK akkumulieren aus anthropogenen Quellen über den Luftpfad in maßgeblichem Umfang in der Biosphäre.

#### Pedosphäre

N, Hg und PAK akkumulieren aus anthropogenen Quellen über den Luftpfad in maßgeblichem Umfang in der Pedosphäre.

Die versauerungsbedingte Mobilisierung von Spurenelementen ist in Waldgebieten mit pufferarmen Untergrund eine langsame aber bodenschutzrelevante Veränderung der Pedosphäre.

Die depositionsbedingte Anreicherung von Spurenelementen in Böden wurde allgemein überschätzt, da der nutzungsbedingte Stofftransport über die Winderosion noch wenig beachtet ist.

#### Hydrosphäre

Die Grundwasserbeschaffenheit wird weit stärker durch die versauerungsbedingte Freisetzung von Spurenelementen als durch atmosphärischen Eintrag beeinflusst. Die aktuellen Emissionen von Säurebildnern begünstigen anhaltend die Mobilisierung (eine genaue Beurteilung ist derzeit nicht möglich).

Die ansteigenden Stickstoffvorräte im Wald sind eine mit Blick auf den Grundwasserschutz maßgebliche Umweltveränderung.

Die Umweltprognosen sollen in einem in einem Ausschuss beraten werden.

### Stoffbezogene Prognosen

Bei folgenden Stoffen ist ein maßgeblicher anthropogener Stofffluss fernab von Siedlung, Industrie und Verkehr erkennbar:

- C** Der CO<sub>2</sub>-Haushalt der Atmosphäre ist im Land nahezu vollständig anthropogen. Unter günstigen Wachstumsbedingungen (Oberrhein) entsteht über Wald jährlich ein C-Überschuss in Höhe von 20-30% des C-Pools der Atmosphäre.
- Die Bio-, Pedo- und Hydrosphäre stellt über terrestrischen Landoberflächen keine maßgebliche Senke für den C-Überschuss der Atmosphäre dar. Atmosphärische C-Prognosen müssen aufgrund der weltweiten Stofftransporte und C-Senken (z.B. Weltmeere) global betrachtet werden.
- N** Die N-Einträge aus der Atmosphäre sind zu 95-99% anthropogen. In der BioPedosphäre akkumulieren unter günstigen klimatischen Verhältnissen jährlich 1 bis 2 % des N-Pools (Akkumulation in Bruchsal 43 kg N/ha a + Bioakkumulation über Gasphase; der Verkehr hat hier keinen maßgeblichen Einfluss).
- Eine Beeinträchtigung des Grundwassers durch Nitrat kann in Waldgebieten mit geringem N-Speichervermögen bzw. ungünstigen Wachstumsbedingungen, hohen Niederschlägen sowie beispielsweise durch Windwurf oder Einschlag ausgelöst werden.
- (N-bedingte Veränderungen der Artenzusammensetzung sind bislang nicht dokumentiert).
- S** Die S-Einträge aus der Atmosphäre sind zu 95-99% anthropogen. In der BioPedosphäre akkumulieren unter günstigen klimatischen Verhältnissen jährlich 1 bis 3 % des S-Pools (Akkumulation in Bruchsal 20 kg SO<sub>4</sub>-S/ha a, 10 - 30% entfällt auf den Verkehr; für ubiquitäre Verhältnisse sind ca. 15 kg in Ansatz zu bringen). Vulkanismus ist keine maßgebliche Bilanzgröße für S.
- Säure** Die atmosphärischen Säureeinträge in die BioPedosphäre sind auch heute noch zu 95-100% anthropogen (atmosphärischer Säureeintrag in Bruchsal: 1,8 kmol<sub>e</sub>/ha a; nicht maßgeblich verkehrsbedingt).
- Die Forstwirtschaft hat über die Holzernte und den Auskämmeffekt einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtsäureflüsse der BioPedoHydrosphäre (Wachstumsbedingte Säurewirkung in Bruchsal: 1 kmol<sub>e</sub>/ha a, Auskämmeffekt 1,2 kmol<sub>e</sub>/ha a).
- Ob sämtliche Säureeinträge in der Biosphäre gespeichert oder im Boden abgepuffert werden hängt von den Standortbedingungen ab (Bruchsal: vollständige Aufnahme in der BioPedosphäre).
- Der Boden-pH hat sich (in Bruchsal) über 10 Jahre nicht geändert. Eine Änderung von 0,1 pH-Einheiten ist innerhalb von weiteren 100 Jahren nur selten zu erwarten (Ausnahme: Böden im Umschlagbereich zwischen zwei Puffersystemen). Zwar stehen in der Pedosphäre in der Oberrheinebene in der Tiefe bis 1 m Pufferkapazitäten für Jahrtausende zur Verfügung (in Bruchsal 18.000 kmol<sub>e</sub>/ha), jedoch können auch kleine Milieuveränderungen zu Änderungen bei der Mobilität von

Spurenelementen und Aluminium führen (ob dies mit Blick auf die heutigen Einträge maßgeblich ist, kann nicht sicher beurteilt werden).

Bedingt durch die voranschreitende Versauerung wird zunehmend phytotoxisches Aluminium pflanzenverfügbar. Die Schwermetallauswaschung wird sehr langsam zunehmen (in Bruchsal derzeit 2,8 g Cd/ha a, 86 g Ni/ha a, 37 g Co/ha a).

Mögliche Umweltmaßnahmen:

Die historischen Säureeinträge und die historische Versauerung durch Waldnutzung (insegsamt ca. 1.000 kmol<sub>e</sub>/ha) können nur bedingt technisch durch Kalkungen kompensiert werden (1 t CaCO<sub>3</sub>/ha neutralisieren 24 kmol<sub>e</sub>/ha). Die aktuellen Säureeinträge lassen sich mit begrenztem Aufwand abpuffern (150 kg CaCO<sub>3</sub>/ha a).

- Hg Die landesweiten anthropogenen Hg-Emissionen tragen zu 50-99% zu den Hg-Anreicherungen in der BioPedosphäre bei (0,1 bis 1 g Hg/ha a im Forst). Die Umlagerung durch Winderosion ist unbedeutend. Hg wird überwiegend in der Biosphäre und Streuauflage akkumuliert. (eine Einschätzung der Hg-Flüsse in der Hydrosphäre ist noch nicht möglich).
- PAK Die landesweiten PAK-Emissionen tragen zu 95-99% zu den PAK-Anreicherungen in der BioPedosphäre bei (in Bruchsal ist der Verkehrseinfluss ab 15 m von der A5 nicht maßgeblich; vgl. Abschnitt 6.2). Die anthropogene PAK-Emissionen überwiegen deutlich die natürliche Umlagerung durch Winderosion. PAK akkumuliert über die Staubdeposition und voraussichtlich in maßgeblichem Umfang auch über die Gasphase.

(Bei MTBE, PGE, PCB, PCDD/F und anderen Spurenstoffen ist die Datenlage für eine medienübergreifende Interpretation noch unzureichend)

Bei folgenden Stoffen haben bezüglich des Luftpfades, dank der langjährigen Luftreinhaltepolitik, die geogenen Stoffflüsse mittlerweile gegenüber den anthropogenen Stoffflüssen einen maßgeblichen Einfluss gewonnen:

- As Die landesweiten As-Emissionen tragen zu 0-25% zu den Gesamtdepositionen bei.
- Cd Die landesweiten Cd-Emissionen tragen zu 0-50% zu den Gesamtdepositionen bei.
- Co Die Co-Einträge sind durch Bodenumlagerungen erklärbar. Der atmosphärische Eintrag ist angesichts der Mobilisierung interner Vorräte (unter Wald) unbedeutend.
- Cu Die Cu-Einträge werden durch Bodenumlagerungen maßgeblich beeinflusst (Ausnahme: Flächen im Einzugsbereich des landwirtschaftlichen Cu-Einsatzes)
- Cr Die Cr-Einträge sind durch Bodenumlagerungen erklärbar. Der atmosphärische Eintrag ist unbedeutend.
- Ni Die Ni-Einträge sind durch Bodenumlagerungen erklärbar. Der atmosphärische Eintrag ist unbedeutend.
- Pb Die landesweiten Pb-Emissionen tragen zu 0-25% zu den

Gesamtdepositionen bei.

Zn Die Zn-Einträge werden durch Bodenumlagerungen maßgeblich beeinflusst.

## 6.2 Verkehrsbereich

### Autobahnrandstreifen 0-10 m

Der Autobahnbetrieb führt bei 100.000 Kfz/Tag derzeit zur Anreicherung folgender umweltrelevanter Stoffmassen in der BioPedosphäre im Randstreifen 0-10 m vom Straßenbelag:

As	0,2	kg/km a
Cd	10	g/km a
Cu	1	kg/km a
Sb	0,1	kg/km a
Zn	4	kg/km a
PAK-16	2	kg/km a
PCB-6	18	g/km a
PCDD/F	0,1	mg I-TEq/km a

Bei PAK wird analog den Emissionsprognosen mit einer leichten Abnahme der Einträge gerechnet (ca. 3% / Jahr bis 2010). Bei den übrigen Komponenten wird bedingt durch die ansteigenden Brems- und Reifenabriebe nur bedingt mit einer Abnahme der Stofffrachten gerechnet.

Bei den Platingruppenelementen deuten die Daten eher auf eine ubiquitäre Verbreitung in der Umwelt als auf eine Anreicherung am Straßenrand hin. (Die Senke ist derzeit unbekannt).

Bei geschlossener Grasdecke ist der Schadstoffaustrag aus dem Randstreifen in die Atmosphäre nicht umweltrelevant.

Die Beeinträchtigung des Grundwasser durch verkehrsbedingte Emissionen kann derzeit nicht beurteilt werden (in Bruchsal liegen beispielsweise noch keine Stoffflussmessungen vor).

### Forstwirtschaft in Randlage zum Verkehr

Bei folgenden Stoffen ist ein verkehrsbedingter Stofffluss in ca. 15 m Entfernung zum Straßenrand messbar:

- S Die S-Einträge sind 2 bis 3 mal höher als an sonstigen Waldstandorten.
- NaCl Die Cl-Einträge sind 5 bis 10 mal höher als an sonstigen Waldstandorten.
- Cu Die Cu-Einträge sind 1,5 bis 3 mal höher als an sonstigen Waldstandorten.
- Zn Die Zn-Einträge sind 1,5 bis 3 mal höher als an sonstigen Waldstandorten.
- Pb Es findet eine Mobilisierung und Verlagerung des historischen Pb-Pools aus der Streuauflage statt (in Bruchsal akkumuliert das Pb derzeit in 0-30 cm Tiefe).

## 7 Fortschreibung der Umweltbeobachtung

### 7.1 Landesweit

#### Fortschreibung von Umweltbilanzen

Neben der Fortschreibung der Umweltbilanz an der Intensiv-Messstelle Bruchsal sind weitere Umweltbilanzen an Intensiv-Messstellen auf Forst-, Landwirtschafts- und Siedlungsflächen geplant. Die Bilanzen an Intensiv-Messstellen sollen über einrichtungsübergreifende Arbeitskreise ergänzt (z.B. Level II-Programm der FVA, landwirtschaftliche Stoffbilanzen) und zu landesweiten Stoffbilanzen zusammengefügt werden.

#### Fortschreibung von Umweltprognosen

Die entworfenen Umweltprognosen sollen in einem „Ausschuss für Umweltprognosen“ weiter entwickelt und generalisiert werden. Der Ausschuss soll sich aus Mitgliedern der Bilanzarbeitskreise zusammensetzen. Für Veränderungen der Atmosphäre kann auf vielfältige Prognosen zurückgegriffen werden. Der Arbeitsschwerpunkt wird bei der Bio-, Hydro- und Pedosphäre liegen.

#### Intensiv-Monitoring

Angestoßen von der LfU wurden in Baden-Württemberg Intensiv-Messstellen eingerichtet. Die UMEG lädt alle Umweltbeobachter des Landes ein, sich an der Fortschreibung zu beteiligen.

Die Zusammenführung der sektoralen Arbeits- und Messergebnisse von UMEG, LfU, FVA und anderen Stellen des Landes soll weiter betrieben werden.

Die Stoffflussbilanzdaten sind eine mögliche Entscheidungsgrundlage für die Fortschreibung sektoraler Messungen und Erhebungen (z.B. Emissionsfaktoren für bodennahe Stäube, Pooluntersuchung im Wald, Bemessung von Wiederholintervallen bei Boden- und Waldmessprogrammen).

### 7.2 Bruchsal

Zur Optimierung der Bilanzierungsarbeit soll das Untersuchungsspektrum an der Intensiv-Messstelle Bruchsal künftig periodisch (z.B. 3-Jahresrhythmus) variiert werden.

#### Autobahnrandstreifen

Künftiges Hauptaugenmerk im Autobahnrandstreifen 0-10 m liegt auf dem Stofftransport in die Hydrosphäre (Spritzwasser, Verlagerung in den Untergrund).

#### Forstfläche

Künftige Hauptaugenmerke im Forst liegen bei der Quantifizierung und Identifizierung der Stäube, bei Fragen der Bodenentwicklung und Versauerung sowie beim Stickstoffhaushalt.

Die teils natürlichen und teils verkehrsbedingten Stoffflüsse in 15 m Entfernung werden weiter beobachtet (insbes. Blei).

Boden-Wiederholbeprobung lohnen bei der Streuauflage und bei Stoffen/ Horizonten innerhalb von 10 Jahren, bei denen eine Änderung von über 1%/a errechnet wurde und die Gehalte gut messbar sind. Der Anteil geogener Stäube im Staubbiederschlag muss bei der Bemessung von Wiederholintervallen berücksichtigt werden (Beispiel: bei einem Anteil von 75% Bodenstaub würde sich das aufgrund der Flussbilanz errechnete Wiederholintervall vervierfachen).

Boden-Wiederholmessungen sollten idealerweise durch mehrere Labore parallel oder an Rückstellproben erfolgen.

Für eine Reihe von Elementen sind quasi natürliche Verhältnisse festgestellt worden. Bedingt durch moderne Multielementmessverfahren, kann das Stoffspektrum ohne Zusatzaufwand beibehalten werden.

Forschungsbedarf besteht bei Fragen der Messtechnik und Modellierung (z.B. Hg-Eintrag, präferentielles Fließen, dynamische Modellierung der Versauerung).

## 7 Literatur

UBA Umweltbundesamt (2003a): Verbreitung von Nährstoffmangel bei Waldbäumen in Deutschland - Ergebnisse der Nadel-/Blattanalysen im Rahmen der BZE.- Bearbeiter: Riek W. & B. Wolff, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de).

UBA Umweltbundesamt (2003b): Umweltrelevanz des Stoffes Methyltertiärbuthylether (MTBE) unter besonderer Berücksichtigung des Gewässerschutzes. <http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/kraftubst/additiva/mtbe.htm>, Berlin.

LfU Baden-Württemberg (1997): Bodenversauerung - Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen.- Kurzfassung einer Literaturstudie, Bearbeitung V. Schweikle, 28 S., Karlsruhe.

LfU Bayern (2003): Immissionsökologischer Bericht 2000-2001: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 278 S., Augsburg.

LfU Baden-Württemberg [Hrsg] (2003): Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Tagungsband [im Druck].

Reutter O. & U. Reutter (2004): Seitenstreifen-Altlasten - Risiken und lokale Lösungsansätze.- In: Hrsg: Apel P. Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung ; Kap. 2.3.4.2, neu überarbeitete Auflage; 27 S., Bonn.

### Impressum

Herausgeber	UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit
Titel	Bilanzbericht Bruchsal 2003. Umweltbilanz und Umweltprognose Forstwirtschaft und Verkehr - Ergebnisse vom Intensiv-Monitoring Bruchsal (Baden-Württemberg). Stand Januar 2004
Ausgabe	1. Ausgabe vom 18. August 2004 - 2. Ausgabe mit Anpassung der ID Umweltbeobachtung (Seiten 3, 4 ff) im Juni 2009 (ehem. ID U914-MDBW1101-J0292-de)
Verfasser	UMEG Fachgebiet 34 Boden, Hydrogeologie und Pflanzen
Projektpartner	LfU
©	Nachdruck und Versand bei Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet
Bezug seit	Juni 2009 <a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/5121/">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/5121/</a> ID Umweltbeobachtung U93-M111-J02