



Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen Ergebnisbericht 2004 bis 2009



Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen Ergebnisbericht 2004 - 2009

Wiesbaden, 2010

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Impressum

Umwelt und Geologie -
Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 9

ISSN 1610-5931
ISBN 978-3-89531-611-1

Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen
Ergebnisbericht 2004 - 2009

Bearbeitung:

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Postfach 1001 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
Referat 22 - Boden, Altlasten
Werner Borho

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)
Postfach 3209, 65022 Wiesbaden
Dezernat G3 - Bodenschutz, Bodeninformation
Sybille Stern

Layout: LUBW, Werner Borho

Fotos: LUBW

Herausgeber:

Herausgeber, © und Vertrieb:
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Postfach 3209, 65022 Wiesbaden
Telefon: 0611 6939-111
Telefax: 0611 6939-113
E-Mail: vertrieb@hlug.hessen.de

www.hlug.de

Nachdruck und sonstige Publikationen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Inhalt

Zusammenfassung	4
1. Einleitung	5
2. Standortbeschreibung und Methoden	6
3. Ergebnisse der Betriebsjahre 2004 - 2009	8
3.1 Atmosphärische Deposition: Hauptelemente	8
3.2 Atmosphärische Deposition: Anorganische Spurenstoffe (Bergerhoff-Sammler).....	10
3.3 Atmosphärische Deposition: 16 EPA-PAK (Trichter-Adsorber-Sammler).....	14
3.4 Sickerfrachten.....	17
3.4.1 Wasserhaushaltsmodellierung	17
3.4.2 Wasserhaushaltsbilanz 2004 - 2009	19
3.4.3 Sickerfrachten 2004 - 2009	20
3.5 Zusammenschau der Frachten.....	22
4. Schlussfolgerungen und Ausblick	25
5. Literatur	26

Zusammenfassung

Im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) befindet sich die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit März 2004 durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) in Betrieb. Ein erster Ergebnisbericht mit Stand 09/2005 ist veröffentlicht (HLUG 2005). Dieser nun vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des inzwischen sechs Jahre laufenden Betriebs von 2004 bis 2009 dar.

Die Messstelle besteht aus drei Messflächen (1 Freifläche, 2 Bestandsflächen) in unterschiedlichen Abständen westlich zur Startbahn-West. Gemessen wurden im Berichtszeitraum Hauptelemente, Schwermetalle und PAK in der atmosphärischen Deposition, sowie Hauptelemente und Schwermetalle im Sickerwasser. Des Weiteren werden kontinuierliche Messungen von Bodenfeuchte, Saugspannung und Grundwasserstand zur Berechnung der Sickerraten durchgeführt. Klimadaten hierzu werden vom DWD übernommen. Streusammler sind seit Anfang 2010 installiert, hier liegen noch keine Ergebnisse vor.

Die Depositionssituation an der Messstelle FFM erweist sich mit Ausnahme von Kupfer weiterhin als unauffällig. Sie entspricht in etwa dem unteren Wertebereich, der im weiteren Umfeld eines Ballungsraums der BRD gegenwärtig zu erwarten ist. Eine Abnahme ist bei den Hauptelementen gegenüber der Situation 1992/93 (Messungen des HLUG an ähnlicher Position) bei allen Komponenten außer NO₃-N zu verzeichnen, was dem allgemeinen Trend entspricht. Bei den Schwermetallen und PAK stehen keine Vergleichsdaten aus früheren Jahren zur Verfügung, jedoch ist auch hier von einem allgemeinen Trend zur Abnahme auszugehen. Bei PAK besteht eine enge Beziehung zu Wintertemperaturen, respektive Heizaktivitäten. Eine Abhängigkeit der Depositionshöhen von der Entfernung zur Startbahn-West konnte nur bei Kupfer festgestellt werden, da sie bei allen anderen Parametern - falls vorhanden - die Bestandsheterogenität nicht überwiegt. Dabei bleibt die Ursache für die erhöhten Kupfer-Depositionen noch abschließend zu klären. Laut einer Recherche des HLUG weisen die Indizien auf eine Kupferemission durch Triebwerke hin. So kann Kerosin Kupfer in unterschiedlichen Mengen enthalten, je nach Rohölherkunft, Verarbeitungsverfahren und Lagerbedingungen. Eine ökologische Bewertung der Kupfereinträge sollte sinnvollerweise erst auf Basis einer umfänglichen Umweltbilanz erfolgen, im Rahmen gesetzlicher Regelungen nach BBodSchV (1999) sind sie nicht zu beanstanden.

Die Bewertung der Bodenentwicklung ist allein auf Basis der ermittelten Sickerfrachten unter Vorbehalt durchzuführen, da Streufrachten bislang fehlen. Es zeichnet sich aber auch hier in der Regel eine Verbesserung der Umweltsituation ab. In der Vergangenheit gebildete Schadstoffvorräte werden aus der organischen Auflage ausgetragen und in tiefere Bodenschichten verlagert. Dies gilt sehr wahrscheinlich für Blei und Cadmium. Bei anderen Schwermetallen sind die Ergebnisse auch mit der Annahme eines Fließgleichgewichtes verträglich. Einzig Antimon akkumuliert gegenwärtig in der organischen Auflage - dieser Schadstoff stammt als Asbestersatzstoff aus Bremsbelägen und wird auch erst seit relativ kurzer Zeit anthropogen emittiert. Schadstoffe wie Blei, Chrom, Kupfer und Antimon werden gegenwärtig bis 60 cm Tiefe effektiv im Boden zurückgehalten, bei Cadmium, Nickel, Arsen, Kobalt und Zink sind hier noch nennenswerte Austräge zu beobachten. Konzentrationsbasierte Prüfwerte werden in dieser Tiefe nicht überschritten.

Die Messstelle erfüllt damit ihre Aufgabe, die stoffliche Umweltsituation und ihre Entwicklung am Standort medienübergreifend und quantitativ sehr detailliert zu charakterisieren. Die Vervollständigung des Messprogramms durch Streuuntersuchungen ist 2010 angelaufen. Durch das Einbeziehen von Stoffvorräten können künftig umfassende Stoffbilanzen erstellt werden, aus denen weiter abgesicherte und vertiefte Erkenntnisse zur Stoffdynamik und zum Prozessverständnis am Standort gewonnen werden können.

1. Einleitung

Die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen wurde im Auftrag des HLUg im Dezember 2003 von der damaligen UMEG errichtet.

Im März 2004 beauftragte das HLUg die UMEG mit der laufenden Wartung, der Probennahme und Analytik an dieser Messstelle. Der beauftragte Messumfang beinhaltete zunächst kontinuierliche Messungen von Wassergehalt und Saugspannung sowie Probenahmen an Depositionssammlern und Sickerwässern inklusive zugehöriger Analytik im 4-wöchentlichen Turnus. Zusätzlich wurden beauftragt: Juni 2004 Depositionsmessungen auf Grundparameter und Hauptelemente mit PE2-Sammlern, August 2004 die Berechnung der Sickerwasser- und Depositionsfrachten. In dieser Form wird der Betrieb nun kontinuierlich fortgesetzt, seit 2006 durch die LUBW.

Die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen liegt westlich der Startbahn West. Sie ist Bestandteil des hessischen Bodendauerbeobachtungsprogramms mit speziellem umweltthematischen Bezug zum Flughafenbetrieb.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der Betriebsjahre 2004 bis einschließlich 2009 zusammen. Bezüglich der Einzelergebnisse wird auf die umfangreichen digitalen Datenlieferungen an das HLUg verwiesen. Um eine kompakte Berichtsform zu erreichen, werden diese hier lediglich in einer Detailtiefe dargestellt, die zur Übersicht und für das wesentliche Verständnis erforderlich ist.

Tab. 1-1: Chronik der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Datum	Aktion	Anmerkung
2010_01	Aufbau der Streusammler für Untersuchung auf organische und anorganische Spurenstoffe	-
14.07.04	Beginn Depositions-Messung der Hauptkomponenten mit PE2-Sammlern	-
24.03.04	Beginn Depositions-Messung PAK- und Bergerhoff Sammlern sowie Sickerwassergewinnung	-
2003_12	Neubau als Intensiv-Messstelle	-
2003_04	Feinkonzept für den Neubau	-
2001_03	2. Bodenwiederholbeprobung	-
1997_05	1. Bodenwiederholbeprobung	-
1994_09	Dioxinuntersuchung Boden	-
1992_05	Boden-Erstbeprobung	-
1992_03	Einbau Saugkerzen und Tensiometer	-
1992	Übergabe an HLUg	-
1981	Beginn Erstbetrieb (FVA Hessen)	-
1981	Standortauswahl (FVA Hessen)	Beweissicherungsverfahren Startbahn West

2. Standortbeschreibung und Methoden

Die ausführliche Messstellenbeschreibung mit Messplan und Analysenumfang befindet sich im Papier FFM Chronik unter U32-MDHE1101-de (HLUG 2004). Einen für den Berichtszweck erforderlichen Überblick über Lage, messtechnische Ausstattung, Parameterumfang sowie Mess- und Analysemethoden geben die Abbildungen 2.1 bis 2.4 zusammen mit den Tabellen 2.1 und 2.2.

Die verwendeten Plausibilisierungs- und Auswertemethoden sind in den jeweiligen Ergebnisteilen dieses Berichts dargestellt, soweit sie für das Verständnis erforderlich sind. Darüber hinaus ist die Nachvollziehbarkeit aller Plausibilisierungs- und Auswerteschritte über die digitalen Datenlieferungen an das HLUG sichergestellt.

Die Exposition der Messstelle gegenüber dem Flughafenbetrieb ergibt sich aus ihrer südwestlichen Lage und der Windrose der DWD-Station Frankfurt-Airport (z. B. TÜV Süd 2006). Danach existieren im Untersuchungsgebiet zwei besonders häufig auftretende Windrichtungen aus Südwest (34% aller Fälle) und Nordost (27% aller Fälle), letztere vornehmlich im Winter unter austauscharmen Bedingungen.



Abb 2-2: Messplot FFM_A ca. 100 m westlich Startbahn West



Abb 2-3: Messplot FFM_B



Abb. 2-4: Messplot FFM_C mit Sickerwassermessfeld und Depositionssammlern (links im Hintergrund)

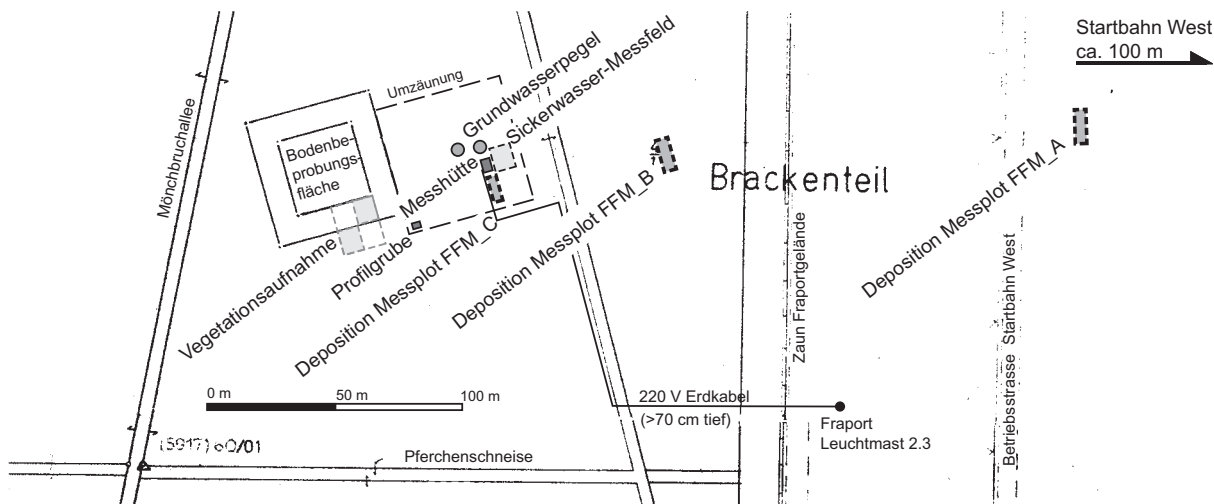


Abb. 2-1: Lage und messtechnische Ausstattung der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Tab. 2-1: Messtechnische Ausstattung, Messplan und Messparameter an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Messeinrichtung	Beschreibung	Anzahl	Aufbau	Beprobung/ Messung	Messparameter
Profilgrube	Gley-Braunerde aus umgelagertem Flugsand über Main-Terrassensand/-kies	3	1992	1992	kf, pF, PV, Körnung, Mineral KAK, SM _{mob} , SM _{ges} , C _{org} , N _{ges} , K, Mg, P, (Al, Fe, Mn) Oxalat, Dithionit
Beprobungsfläche	900 m ²	1	1992	3-4 jährl.	wie Profilgrube zusätzl. PCDD/F, PAK, PCB, CKW Radionuklide
Klima	Daten von DWD-Stationen	-	-	Tageswerte	Niederschlag, Lufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung
Bodenwasser	FDR-Sonden in 3 Tiefen Tensiometer in 4 Tiefen	9 12	12/2003	30 Minuten-Mittelwerte	Wassergehalt Saugspannung
Sickerwasser	Teflon/Nylon Humuslysimeter Duranglas-Saugkerzen in 3 Tiefen	6 18	12/2003	4 wöch.	SM, Hauptelemente
Grundwasser	Pegel in 2 Tiefen Druckaufnehmer-Sonde	2 1	1981/1982	versch. 30 Minuten-Mittelwerte	versch. Grundwasserstand
Datentechnik	LUBW-Logger an Funkmodem	1	12/2003	minütlich	Wassergehalt Saugspannung Saugdruck
Pflanzen	Vegetationsaufnahmeflächen Probebäume (Kiefer, Eiche)	2 je 4	1981	1981/1985-	-
Deposition	3 Plots mit je 2 Trichter-Adsorber- 6 Bergerhoff- 2, 4 bzw. 5 PE2-Sammlern Streusammler	6 18 11 8	12/2003 12/2003 07/2004 01/2010	12 wöch. 4 wöch./12 wöch. 4 wöch. halbjährlich/jährl.	PAK SM (Analyse 12 wöch.) Hauptelemente organ. Schadstoffe, SM

Tab. 2-2: Feld- und Analysenmethoden für die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Messobjekt	Verfahren	Link zur Feldmethode	Probenaufbereitung	Analytik
Deposition SM, As	Bergerhoff	U222-DBW01-de in Vorbereitung	Gravimetrie der Einzelgefäße, Zusammenführen der 18 Einzelgefäße zu 12-Wochen-Mischproben. Mikrowellenaufschluss mit HNO ₃ , H ₂ O ₂ , HF 30 Minuten bei 200°C. Abdampfen, Aufnahme mit 1% HNO ₃ , ggf. Verdünnung	Al, Fe, Mn, Zn mit ICP-OES, alle anderen mit ICP-MS sofern < 100 ng/l. QS über zertifizierte Probe und externen Standard.
Deposition Grundparameter, Hauptelemente	PE2-Sammler	U222-DBW02-de	Vorbereitung zur Bestimmung gelöster Elemente QMV 504-32375-0 in Anlehnung an DIN EN ISO 11885-E22	Kationen am ICP-OES nach QMV 504-32375-0 in Anlehnung an DIN EN ISO 11885-E22, gelöste Anionen mittels Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 10304-1, gelöstes Ammonium mittels Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 4911
Bodenfeuchte	FDR-Technik	U2431-DBW01-de	-	-
Saugspannung	Tensiometrie	U2431-DBW02-de	-	-
Sickerwasser	in-situ Saugsonden	U2421-DBW01-de	Aufschluss zur Bestimmung des Gesamtgehaltes QMV 504-32375-0 in Anlehnung an DIN EN ISO 11885-E22	Ni, Cu, Co, Zn, Al, Mn, Fe: ICP-OES QMV 504-32375-0 in Anl. an DIN EN ISO 11885-E22. Pb, Cd, As, Cr, Sb am ICP-MS QMV 504-32383-0 in Anl. an DIN 38406 -E29 Kationen am ICP-OES nach QMV 504-32375-0 in Anl. an DIN EN ISO 11885-E22. Anionen mittels Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 10304-1
Klima	DWD: Messstelle Flughafen Frankfurt, Globalstrahlung DWD-Messstelle Geisenberg	-	-	-

3. Ergebnisse der Betriebsjahre 2004 - 2009

3.1 Atmosphärische Deposition: Hauptelemente

Das Parameterspektrum der gemessenen Hauptelemente ergibt sich aus Abbildung 3-1. Dem Berichtszeitraum 14.07.2004 bis 13.01.2010 liegen damit inzwischen 1917 4-wöchentliche Analysenwerte zugrunde. Davon mussten für die Frachtenberechnung 2 fehlende Werte sowie 9 unplausible Werte durch parameterspezifische Schätzwerte ersetzt werden, womit der jeweilige Einfluss auf die Jahresfrachten vernachlässigbar ist. Werte kleiner als die Bestimmungsgrenzen wurden belassen, Werte kleiner als die Nachweisgrenze gleich der Nachweisgrenze gesetzt. Davon betroffen ist lediglich NH₄ und untergeordnet Mg. Aufgrund der vergleichsweise langen Expositionsdauer von 4 Wochen kam es teilweise zu Algenbildung in den Sammelgefäßen. Durch Abdunkeln der Gefäße ab Ende 2008 konnte die Algenbildung weitgehend unterdrückt werden. Da danach die Jahresfrachten 2009 nicht außergewöhnlich angestiegen sind, sind algenbedingte Minderbefunde für den zurückliegenden Zeitraum unwahrscheinlich.

Die 4-wöchentlichen Einzelfrachten berechnen sich als Produkt aus Gehalt im Niederschlag und entsprechender Niederschlagshöhe. Sie bilden die Basis für die Plausibilisierung und das Füllen von Datenlücken, können aber aus Platzgründen in diesem Bericht nur auszugsweise diskutiert werden: Die Einzelfrachten aller Parameter zeigen einen positiven Zusammenhang mit der Niederschlagshöhe, die ihrerseits wiederum einen deutlichen jahreszeitlichen Gang mit Maximum im Sommer und Minimum im Winter zeigt. Hinzu treten parameterspezifische Einflüsse, meist jahreszeitlicher Natur, so dass sich insgesamt ein plausibles Verteilungsmuster in guter Übereinstimmung mit dem Prozessverständnis ergibt.

Sulfat etwa zeigt die stärkste Korrelation zur Niederschlagshöhe, ein Hinweis auf überregional determinierte atmosphärische Prozesse (FFM_A: R²=0,50). Etwas abgeschwächt gilt dieser Zusammenhang auch für Nitrat (FFM_A: R²=0,38). Bei Natrium und Chlorid ist der regionale Einfluss von Streusalz erkennbar, mit Maxima im Winter und stetiger Abnahme über das Jahr hinweg. Kalium dagegen ist stark durch die Vegetation beeinflusst, mit Anstieg im Frühling be-

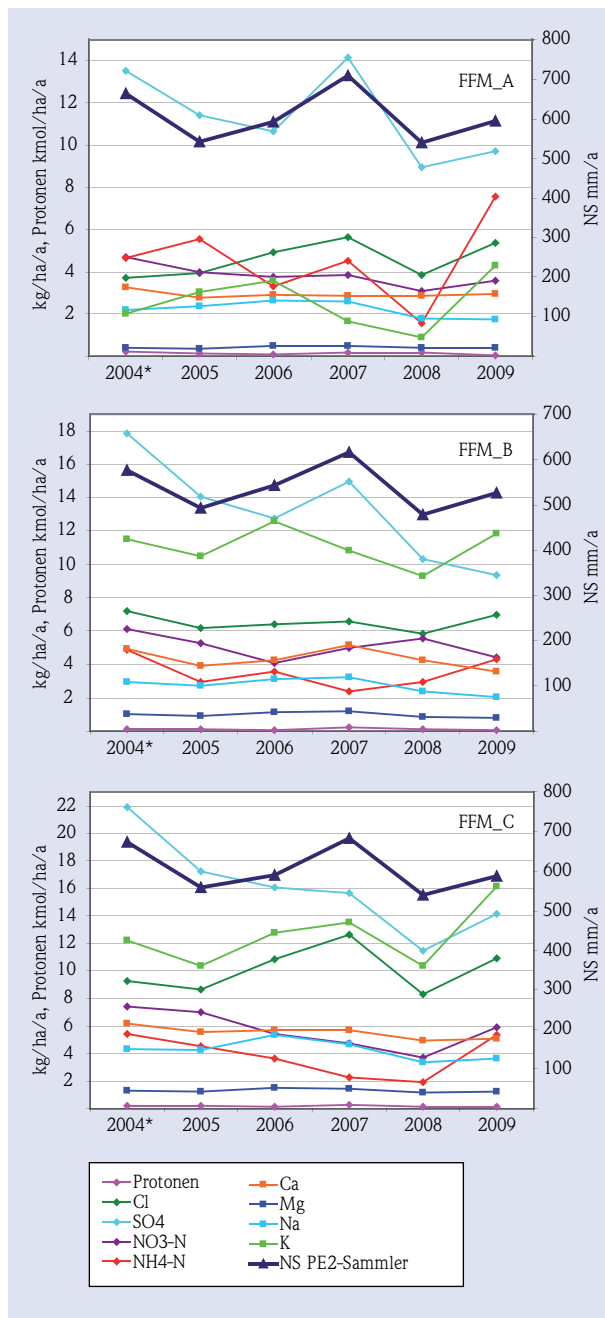


Abb. 3-1: Jahresfrachten der Hauptelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand). 2004* = 14.7.2004 - 15.7.2005

dingt durch Pollenflug, im Bestand mit zusätzlichem Peak im Herbst.

Tab. 3-1: Mittelwerte der Jahresfrachten 2004* - 2009 der Hauptelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand)

	NS PE2-Samm-ler	Protonen	Cl	SO4	NO3-N	NH4-N	Ca	Mg	Na	K
	mm/a	kmol/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a
FFM-A (Freiland)	607	0.13	4.58	11.41	3.83	4.54	2.94	0.42	2.21	2.58
FFM-B (Bestand)	539	0.11	6.53	13.23	5.08	3.50	4.35	0.98	2.75	11.11
FFM-C (Bestand)	605	0.17	10.10	16.06	5.71	3.86	5.53	1.32	4.27	12.56
Faktor FFM_B/ FFM_A	0.9	0.8	1.4	1.2	1.3	0.8	1.5	2.3	1.2	4.3
Faktor FFM_C/ FFM_A	1.0	1.3	2.2	1.4	1.5	0.9	1.9	3.2	1.9	4.9

Die Jahresfrachten sind die Summen der Einzelfrachten eines jeweiligen Kalenderjahres. Die Berechnung wurde nicht tagesscharf durchgeführt. Die Beeinflussung der Jahresfrachten hierdurch ist vernachlässigbar (Jahresfracht 2007 z. B: 27.12.06 - 02.01.08). Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-1 für die drei Messplots getrennt dargestellt. Auch in der Darstellung der Jahresfrachten zeigt sich die unterschiedlich starke Prägung des Auf und Ab durch die Niederschlagshöhe. Ein allgemeinerer zeitlicher Trend ist darüber hinaus nicht ersichtlich. Dies ist plausibel vor dem Hintergrund bundesweit auf niedrigem Niveau konsolidierter atmosphärischer Einträge mit sehr geringer Tendenz zu weiterer Abnahme bei den Hauptelementen (Ihle 2001, UBA 2006)

Der fehlende zeitliche Trend erlaubt die Mittelwertbildung für die weitere Diskussion (Tabelle 3-1). FFM_B und FFM_C zeigen interzeptionsbedingt und durch Abgabe aus dem Kronenraum meist höhere Frachten als FFM_A. Bei NH4 ist dagegen eine Abnahme durch Pflanzenaufnahme oder Nitrifikation zu beobachten. Bei den Protonen ist von einer Interpretation wegen möglicher pH-Beeinflussung durch die Sammelmethode abzuraten. Auffallend sind die deutlich höheren Frachten von FFM_C gegenüber FFM_B. Zum Einen kommt hierin die unterschiedliche Bestandesstruktur von FFM_B und FFM_C zum Ausdruck. Hinzu kommt eine mindestens 10 %-ige Überschätzung der Frachten von FFM_C aufgrund überproportionaler Positionierung der Sammler. Denn

Tab. 3-2: Freiland- und Bestandsdepositionen an den Intensiv-Messstellen Baden-Württembergs. Mittelwerte bzw. verlässlichste Werte 1996 - 2007 (Nitrat 2000 - 2006), (Werte in Klammern: häufig Konzentrationen < Bestimmungsgrenze, als BG/2 verrechnet) aus LUBW (2008) sowie Vergleichsdaten von Schneider (1995)

Standort	Fläche	NS	[H3O+]	NH4-N	NO3-N	SO4	Cl	Ca	K	Mg	Na
		mm/a	kmol/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a	kg/ha/a
Kehl	Freiland	763	0,08	3,6	4,6	16.8	(4,1)	(6,9)	(2,0)	(1,0)	(6,8)
Trochtelfingen	Freiland	809	0,06	5,0	3,8	9.1	(4,4)	(3,8)	(2,8)	(0,9)	-
Wilhelmsfeld	Freiland	1071	0,14	5,0	6,4	21.8	(7,5)	(5,1)	(3,2)	(1,2)	(3,9)
	Bestand	811	0,19	8,9	14,5	43.7	(13,5)	(9,6)	(19,0)	(1,7)	(6,0)
Baltmannsweiler	Freiland	912	0,12	3,1	5,6	15.7	(4,6)	(4,8)	(2,5)	(0,9)	(1,9)
	Bestand	544	0,09	7,0	12,9	23.6	(8,5)	(10,0)	(17,7)	(1,9)	(2,3)
Forst	Freiland	704	0,06	5,0	6,6	21.4	24,2	(9,3)	(2,5)	(1,1)	17,7
	Bestand	512	0,04	12,2	15,0	57.6	94,0	24,6	22,5	(4,5)	54,0
Umfeld der Messstelle 1992/93 (Schneider 1995)											
Freifläche alt	Freiland	-	-	8,9	4,6	35,5	10,4	13,3	6,0	2,2	9,5
Parzelle 13	Bestand	-	-	14,0	11,6	75,9	16,4	17,4	13,3	3,5	11,3

die mittlere Niederschlagshöhe von FFM_C ist gleich der von FFM_A. Sie müsste aber wegen der Interzeptionsverdunstung geringer sein. Es lässt sich demnach bei den Hauptelementen keine Abhängigkeit von der Entfernung zur Startbahn feststellen.

Dieser Befund wird auch bestätigt durch die absolute Höhe der Einträge. Diese liegen im Vergleich z. B. mit den Intensiv-Messstellen Baden-Württembergs im unteren Wertebereich (vergleiche Tabelle 3-2). Die Vergleichsdaten von Schneider (1995) aus den Jahren 1992/93 von nahegelegenen Messflächen weisen auf eine Verbesserung der Eintragungssituation hin.

3.2 Atmosphärische Deposition: Anorganische Spurenstoffe (Bergerhoff-Sammler)

Das Parameterspektrum der Bergerhoff-Messungen ergibt sich aus den Abbildungen 3-2 bis 3-4. Dargestellt sind die tagesscharf berechneten Jahressummen bzw. Mittelwerte. Um für das Jahr 2004 einen vergleichbaren Jahreswert zu erhalten, wurde ab Messbeginn 23.04.2004 bis 23.04.2005 aufsummiert bzw. gemittelt (2004*). Es wurden keine Ausreißer eliminiert, lediglich ein 12-Wochenintervall bei FFM_C wurde wegen Ausfall durch Interpolation ergänzt.

Die Bestands-Depositionen verhalten sich sehr einheitlich, wobei FFM_B meist über FFM_C liegt. Beide liegen in der Regel über den Freiland-Depositionen. Kupfer macht hier eine Ausnahme, mit deutlich höheren Einträgen im Freiland. Hierauf wird später noch eingegangen, unter Berücksichtigung der Vergleichswerte. Teilweise liegen Freiland-Depositionen in den Anfangsjahren auch über den Bestands-Depositionen (Cadmium, Nickel, Kobalt, Zink). Blei zeigt sich indifferent, während Mangan stark von den Pflanzen über den Kronenraum abgegeben wird, ersichtlich am großen Abstand zwischen Freiland- und Bestands-Deposition. Mit Ausnahme von Kupfer drücken sich hierin keine Gradienten zum Flugbetrieb aus, sondern lediglich unterschiedliche Interzeptionsleistungen der Waldbestände FFM_B und FFM_C, ersichtlich am Zusammenhang mit den Staub-Depositionen.

Ein zeitlicher Trend zur Abnahme scheint bei allen Komponenten mehr (z. B. Cadmium, Zink) oder weniger deutlich (Arsen, Chrom) beobachtbar zu sein. Allerdings ist auch die starke zeitliche Streuung mit

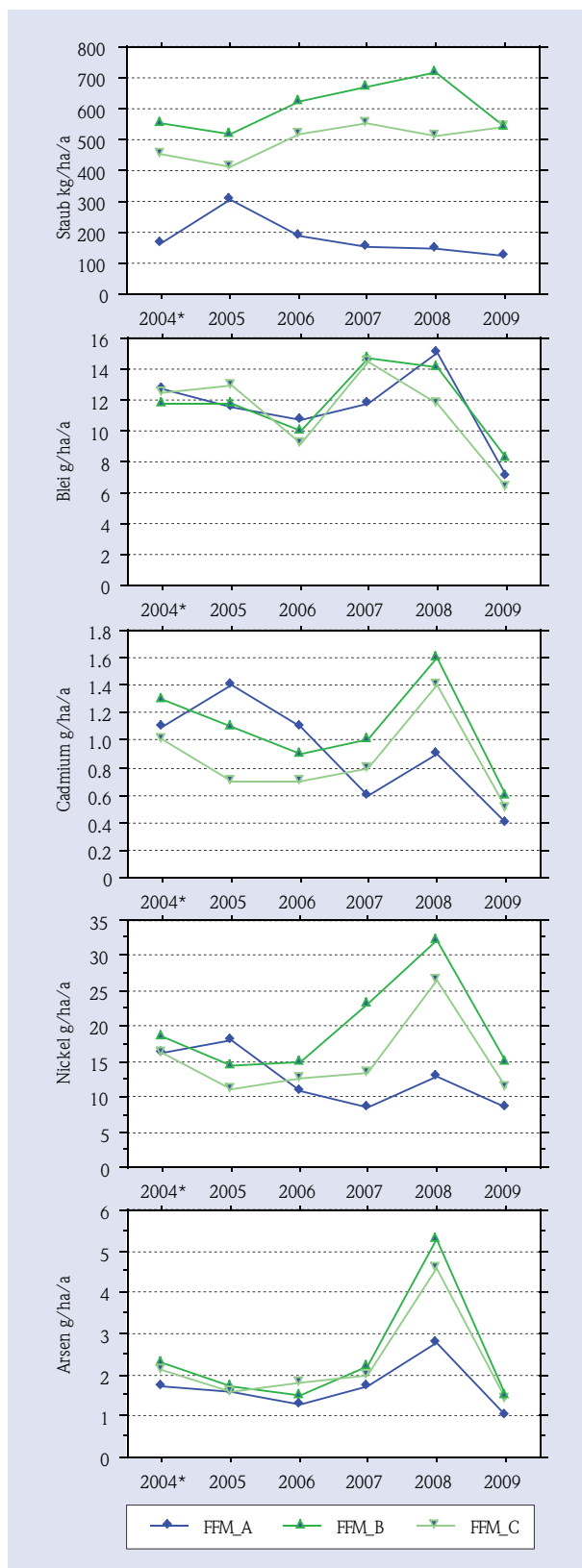


Abb. 3-2: Bergerhoff-Jahresdepositionen an Staub sowie verschiedener anorganischer Spurenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand). 2004* = 24.3.2004 - 24.3.2005

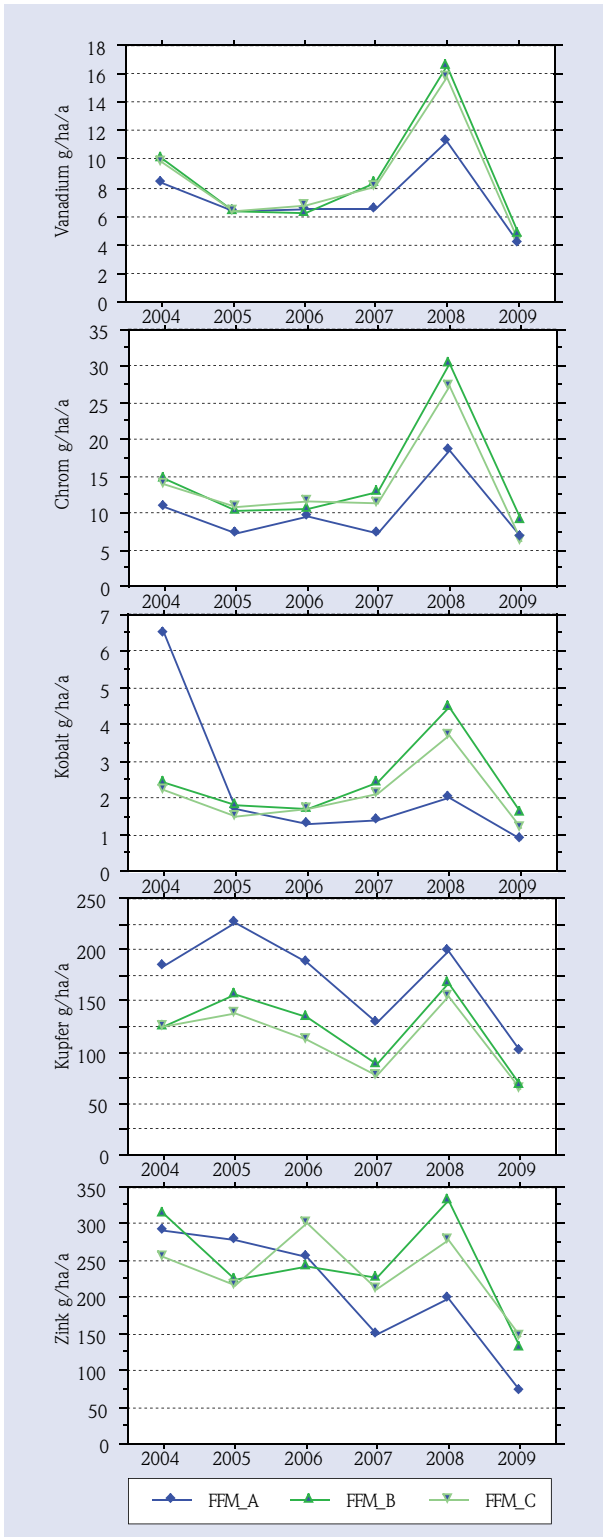


Abb. 3-3: Bergerhoff-Jahresdepositionen verschiedener anorganischer Surenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand). 2004* = 24.3.2004 - 24.3.2005

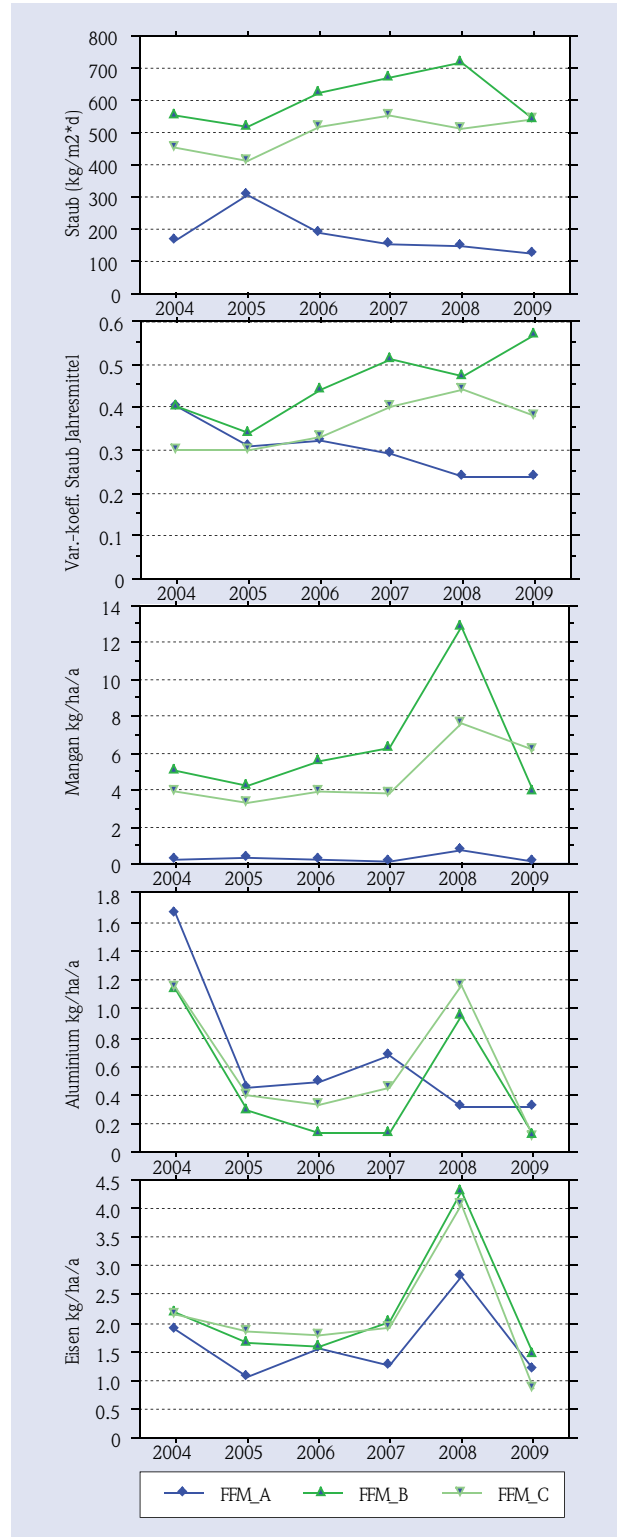


Abb. 3-4: Bergerhoff-Jahresdepositionen an Staub und Staub-Variationskoeffizient der 6 Einzelgefäße sowie Mangan, Aluminium und Eisen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand). 2004* = 24.3.2004 - 24.3.2005

zu berücksichtigen, die sich aus der Überlagerung verschiedener Einflussfaktoren ergibt:

So ist z. B. der durchgehend zu beobachtende Peak 2008 auf ein einzelnes 12-Wochen-Intervall zurückzuführen (27.2.-21.5.08). Es handelt sich hierbei um ein unzweifelhaftes Eintragsereignis (dessen Ursache mit viel Mühe vielleicht auch aufgeklärt werden könnte). Denn es gibt keine Anzeichen auf Verschmutzungen, ersichtlich aus den Probenbeschreibungen und am geringen Variationskoeffizienten bei den Staub-Einzelwerten (hier nicht dargestellt). Aufgrund der Einheitlichkeit über alle drei Messplots und der Qualitätssicherung kann ein Laborfehler ausgeschlossen werden. Solche Einzelereignisse sind demnach in der Lage, den zeitlichen Trend stark zu beeinflussen.

Es gibt aber auch Störfaktoren, die eine Rolle spielen. Dazu zählen Aufwirbelung aus dem Nahbereich der Sammler sowie Verschmutzungen durch Vögel und Insekten. Beide Störfaktoren sind beim Bergerhoff-Verfahren, speziell innerhalb einer Messroutine, nie ganz auszuschließen. In allen Messnetzen und damit auch in allen zur Verfügung stehenden Vergleichsdaten sind deshalb entsprechende Überbefunde enthalten. Beide Störfaktoren führen aber zu heterogenen Verteilungen der Staubmassen. Dadurch sind sie erkennbar, sofern überhaupt Parallelsammler sowie Einzelmessungen, wie vorliegend, zur Verfügung stehen. Abbildung 3-4 (Nr.2) zeigt die Jahresmittel der Variationskoeffizienten der Staubdepositionen der jeweils 6 Parallelsammler als Maß für die Heterogenität der Staubeinträge. Für FFM_A ist hierbei eine deutliche Abnahme, insbesondere von 2004* zu 2005 erkennbar. In der Tat gab es in der Anfangszeit häufige Verschmutzungen durch Vögel, die, aufgrund der Attraktivität der Sammler auf freier Flur, trotz Vogelvergrämung erst ab ca. Frühjahr 2005 durch Anbringen alternativer Ansitze in den Griff zu bekommen war. Das weitere Absinken der Variationskoeffizienten 2007 und 2008 für FFM_A ist möglicherweise auf strukturelle Veränderungen in diesem Bereich oder durch Vogelabwehrmaßnahmen seitens Fraport erklärbar. Dass die Variationskoeffizienten an den Bestandsflächen größer sind als im Freiland ist aufgrund der Bestandsheterogenität nur zu erwarten. Ihre zu beobachtende Zunahme ist wahrscheinlich durch Strukturveränderung durch Wachstumsprozesse im 6-jährigen Beobachtungszeitraum zu erklären. Dies steht im Einklang mit den zeitlichen Verläufen der (pflanzengetriebenen) Mangan-Depositionen, die entgegen dem Trend eine Zunahme oder wenigstens doch ein Stagnieren zeigen. Insgesamt ist deshalb

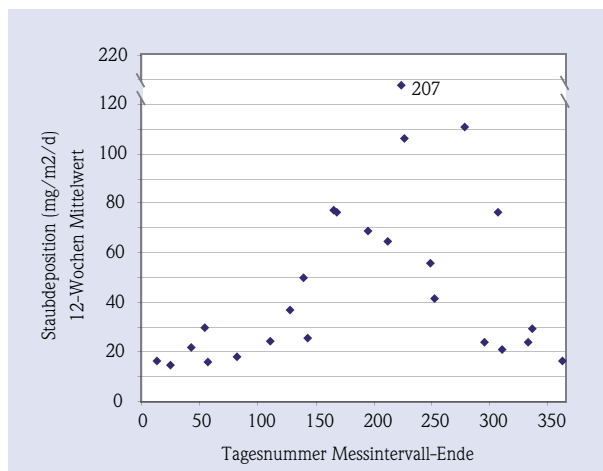


Abb. 3-5: jahreszeitlicher Verlauf der Staubdepositionen (12-Wochen-Mittelwerte über alle Jahre) an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A (Freiland)

nicht völlig auszuschließen, dass ein Teil des zeitlichen Trends zur Abnahme bei den Depositionen auf eine Abnahme des Verschmutzungsanteils zurückzuführen ist.

Auch im Bereich Frankfurt Flughafen stammen die Einträge anorganischer Spurenstoffe nur zum Teil aus anthropogenen Emissionen. Abbildung 3-5 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Freiland-Staubdepositionen am Messplot FFM_A. Deutlich zeigt sich das winterliche Minimum und das bis in den Herbst reichende sommerliche Maximum. Diesem jahreszeitlichen Verlauf folgen alle Depositionen, in jeweils elementspezifischer Korrelation zu den Staubdepositionen. Sommerliche Maxima lassen sich nicht durch korrespondierende Maxima bei anthropogenen Emissionen erklären. Ursache sind regional und überregionale Staubemissionen aus Böden (Landwirtschaft), technischen Oberflächen und Pflanzen. Vor dem Hintergrund zunehmender Luftreinhaltung gewinnt dieser Transportpfad an relativer Bedeutung (LUBW 2008).

Aktuelle Vergleichswerte zur Beurteilung der Eintragungssituation an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen finden sich in LUBW (2008). Bei Blei mit 15 bis 7 g/ha/a sind die Einträge als sehr gering einzustufen, vergleichbar mit dem ländlichen Raum. Cadmium mit 1,4 bis 0,4 g/ha/a entspricht dem Erwartungswert im Umfeld eines Ballungsraumes. Ebenso Nickel mit 18 bis 8 g/ha/a und Chrom mit 18 bis 7 g/ha/a. Arsen mit 2,8 bis 1,0 g/ha/a liegt

im unteren Wertebereich, ebenso Vanadium mit 11 bis 4 g/ha/a und Zink mit 290 bis 70 g/ha/a. Kobalt hat von 6,5 g/ha/a auf 1,0 g/ha/a stark abgenommen und liegt nun im unteren Wertebereich, ebenso Staub mit 300 bis 120 kg/ha/a. Mangan ist mit 750 bis 60 g/ha/a ebenso dem unteren Wertebereich zuzuordnen. Für Eisen und Aluminium stehen keine Vergleichswerte zur Verfügung. Antimon ist ein guter Indikator für den Einfluss durch Straßenverkehr (Bremsabrieb). Antimon-Depositionen werden seit 28.11.2007 gemessen. Für die Jahre 2008 und 2009 zeigen sich mit 4,6 bzw. 1,3 g/ha/a Werte im unteren Bereich. Es liegt demnach kein maßgeblicher Straßenverkehrseinfluss vor. Auffallend hoch ist einzig Kupfer mit 225 bis 100 g/ha/a, das damit Werte erreicht, wie sie im Nahbereich einer Autobahn gemessen werden (Tabelle 3-3). Für eine Kupferemission direkt aus dem Bereich der Startbahn spricht, dass die Bestandsdepositionen untypischerweise geringer sind als die Freilandwerte. Zusätzlich zeigt sich bei den Bestandsdepositionen ein deutlicher Gradient in Abhängigkeit zur Startbahndistanz.

Um der möglichen Ursache für die vergleichsweise hohen Kupfer-Depositionen mit mutmaßlicher Quelle im Bereich der Startbahn West nachzugehen, wurde vom HLUg eine Recherche durchgeführt (HLUG 2011). Dieser zufolge finden auf der Startbahn West nur Starts statt, keine Landungen, so dass Bremsen als Quelle eher unwahrscheinlich sind (siehe hierzu auch den Vergleich wichtiger Emittenten für Kupfer der Tabelle 3-4). Eine Reihe von Indizien weist dagegen darauf hin, dass Triebwerke zumindest potentiell Kupfer emittieren. Hauptquelle scheint hier das Kerosin zu sein, das Kupfer in unterschiedlichen Gehalten aufweisen kann, je nach Herkunft des Rohöls, Herstellungsverfahren und Lagerbedingungen. Aus diesem Grund werden dem Kerosin auch bedarfsweise Metall-Deaktivatoren beigemischt, um die negativen Effekte der enthaltenen Spurenmetalle zu vermeiden (Ablagerungen, thermische Instabilisierung). Eine definitive Ursachenklärung wäre durch aufwändige Kerosinuntersuchungen möglich.

Eine ökologische Bewertung der festgestellten Kupferdepositionen sollte auf Basis der noch zu erstellenden Gesamtbilanzen unter Einbeziehen der Kupfervorräte und unter Berücksichtigung der Pflanzenaufnahme sowie der Streufrachten mit langem Zeithorizont erfolgen. Verbindliche Regelungen zu Kupfer-Depositionen finden sich weder in der 39. BImSchV (2010)

Tab. 3-3: Vergleich der Bergerhoff-Depositionen ausgewählter Parameter an FFM_A und der Intensiv-Messstelle Bruchsal-Forst in 15 – 20 m Abstand zur Bundesautobahn A5 (LUBW 2008).

Parameter	Messstelle Forst (2003 – 2007)	FFM_A (2004 – 2009)
Staub (kg/ha/a)	191 – 307	125 – 305
As (g/ha/a)	2,0 – 2,8	1,0 – 2,8
Cd (g/ha/a)	0,4 – 0,8	0,4 – 1,4
Cr (g/ha/a)	31 – 40	7 – 19
Cu (g/ha/a)	92 – 173	102 – 227
Pb (g/ha/a)	26 – 35	7 – 15
Sb (g/ha/a)	12,2 – 16,0	1,3 – 4,6
Zn (g/ha/a)	337 – 523	72 – 291

Tab. 3-4: Wichtige Emissionsquellen für Kupfer, Blei und Zink in die Atmosphäre aus UBA (2005)

Quellen und Eintragspfade	Kupfer (t/a)	Blei (t/a)	Zink (t/a)
aus Reifenabrieb	-	2,7	1619,6
aus Bremsabrieb	927,7	61,5	308,7
Sonstige fahrzeugspez. Emissionen	-	8,8	-
aus Fahrbahnabrieb	4,3	7,1	149,4
Summe Fahrzeugverkehr	931,9	80,1	2077,7

Tab. 3-5: Zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade nach Anhang 2 der BBodSchV (1999)

Element	Fracht (g/ha /a)
Blei	400
Cadmium	6
Chrom	300
Kupfer	360
Nickel	100
Quecksilber	1,5
Zink	1.200

noch in der TA Luft (2002). Dort sind lediglich As, Cd, Ni, Hg, Pb, Gesamtstaub sowie Benzo(a)pyren geregelt. In Anhang 2 der Bundesbodenschutzverordnung vom 12.07.1999 sind sogenannte „Zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade“ definiert, bei deren Unterschreiten die Einhaltung der bodenbezogenen Vorsorge bejaht wird, selbst wenn gleichzeitig die aktuellen Bodengehalte die Vorsorgewerte überschreiten, die Prüfwerte aber noch unterschreiten. Für Kupfer beträgt die zulässige jährliche Fracht 360 g/ha/a (Tabelle 3-5)

und liegt damit weit über den im Mittel beobachteten 170 g/ha/a für FFM_A und ebenso über dem Eintrag an den Bestands-Messplots FFM_B bzw. FFM_C, selbst wenn man von einer zusätzlichen geschätzten Streufracht in gleicher Höhe wie die gemessenen Bestandsdepositionen von 120 g/ha/a und 110 g/ha/a für FFM_B bzw. FFM_C ausgeht.

3.3 Atmosphärische Deposition: 16 EPA-PAK (Trichter-Adsorber-Sammler)

Die Messungen werden nach DIN 19739 durchgeführt. Innerhalb der inzwischen 6-jährigen Messreihe kam es lediglich zu einem Ausfall durch Frostbruch einer Kartusche (FFM_A, Sammler 1). Die entsprechenden Fehlwerte wurden durch die Werte von Sammler 2 ergänzt. Ein Blindwertausfall wurde durch die Mittelwerte der Zeitreihe ergänzt. Höhere Blindwerte ergaben sich häufig bei Naphthalin aber auch bei den weiteren leichter flüchtigen Kongeneren bis zum Fluoren. Zwar wurden Blindwerte generell abgezogen, jedoch ergeben sich aus diesen hohen Blindwerten, die auch keiner Systematik folgen, Einschränkungen bei der Quantifizierung dieser 4 leichter flüchtigen Kongenere. Blindwerte werden an Blindproben ermittelt, die im gesamten Verfahren von der Kartuschenvorbereitung bis zur Extraktion, ggf. Reinigung und Analytik mitlaufen, die jedoch nicht exponiert werden. Kontaminationen in einem beliebigen Verfahrensschritt können so erkannt und eliminiert werden.

Die DIN 19739 beschränkt ihren Anwendungsbereich auf PAK mit Dampfdruck kleiner als 10 E-6 kPa . Explizit sind dort Kongenere bis Summen-Nr. 8 benannt, man könnte aber Fluoranthen (Nr. 10) noch hinzunehmen (vergl. hierzu die Stoffeigenschaften der Tabelle 3-6). Allerdings ist die Zielsetzung der DIN 19739 ausdrücklich nur auf die Ermittlung des Eintrags in Böden beschränkt und klammert damit die Möglichkeit zur Immissionsbeurteilung aus. Mit zunehmendem Dampfdruck der Kongenere wird die Abbildung des tatsächlichen Eintrags in Böden durch das Sammelverfahren tatsächlich auch zunehmend unsicher, da die Affinität zur Gasphase wächst und die zur Oberflächenbindung abnimmt. Dennoch lässt sich durch Einbezug auch der leichter flüchtigen PAK die Immissionssituation insgesamt besser ermitteln.

Tab. 3-6: Verschiedene PAK und ihre Stoffeigenschaften

Summen-Nr.	Substanz	Summenformel	Molmasse g/mol	Dampfdruck [kPa] bei 25°C
16	Naphthalin	(C10H8)	128	$1,1 \times 10^{-2}$
15	Acenaphthylen	(C12H8)	152	$3,9 \times 10^{-3}$
14	Acenaphthen	(C12H10)	154	$2,1 \times 10^{-3}$
13	Fluoren	(C13H10)	166	$8,7 \times 10^{-5}$
12	Phenanthren	(C14H10)	178	$2,3 \times 10^{-5}$
11	Anthracen	(C14H10)	178	$3,6 \times 10^{-6}$
10	Fluoranthen	(C16H10)	202	$6,5 \times 10^{-7}$
9	Pyren	(C16H10)	202	$3,1 \times 10^{-6}$
8	Benz(a)anthracen	(C18H12)	228	$1,5 \times 10^{-8}$
7	Chrysen	(C18H12)	228	$5,7 \times 10^{-10}$
6	Benzo(b)fluoranthen	(C20H12)	252	$6,7 \times 10^{-8}$
5	Benzo(k)fluoranthen	(C20H12)	252	$2,1 \times 10^{-8}$
4	Benz(a)pyren	(C20H12)	252	$7,3 \times 10^{-10}$
3	Dibenz(a,h)anthracen	(C22H14)	278	$1,3 \times 10^{-11}$
2	Indeno(1,2,3-cd)pyren	(C22H12)	276	ca. 10^{-11}
1	Benzo(g,h,i)perylene	(C22H12)	276	$1,3 \times 10^{-11}$

Das über die Zeitreihe gemessene Kongeneren-Profil zeigt Abbildung 3-6. Es erweist sich als recht stabil über die Zeit und es kommt zu keinen Fraktionierungen bei der Interaktion mit dem Kronenraum. Dominiert wird es von Phenanthren und Fluoranthen gefolgt von Pyren, die alleine schon gut die Hälfte der Depositionssumme ausmachen. Das Kongeneren-Profil entspricht insgesamt am ehesten dem, wie es in einem urbanen Gebiet ubiquitär zu erwarten ist. Es zeigt keine speziellen Signaturen, die auf einen dominierenden Einfluss von Verkehr oder Hausbrand hindeuten könnten. Die Frage der Eintragsrelevanz lässt sich künftig durch einen Abgleich mit den Kongeneren-Profilen der Böden weiter klären.

Der typische jahreszeitliche Verlauf der PAK-Depositionen, wie er sich an allen drei Messplots beobachten lässt, ist am Beispiel von FFM_A, Sammler 1 in Abbildung 3-7 dargestellt. Die Depositionen sind im Winter hoch, im Sommer niedrig, wie es aufgrund der winterlichen Heizperiode zu erwarten ist. Unklar ist noch der Beitrag zu diesem Verlauf durch verstärkt im Sommer stattfindenden photokatalytischen Abbau in der Atmosphäre. Temperaturabhängig unterschiedliche Gleichgewichtsbedingungen zwischen Atmo-

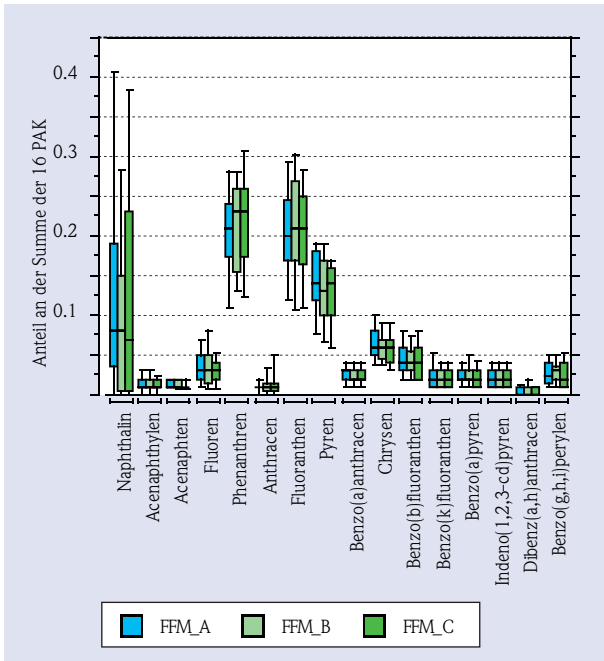


Abb. 3-6: Kongeneren-Profil der PAK-Depositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand)

sphäre und Akzeptorfläche (d.h. primär die Vegetation, sekundär der Boden) bildet das Sammelverfahren dagegen adäquat ab. Auffallend im jahreszeitlichen Verlauf sind die Jahre 2007 und 2008. Es entsteht der Eindruck, der Winter und damit die Heizperiode sei in diesen Jahren ausgefallen. Dieser Verlauf spiegelt sich auch in den Jahressummen aller Messplots und Sammler wider, die in Abbildung 3-8 dargestellt sind.

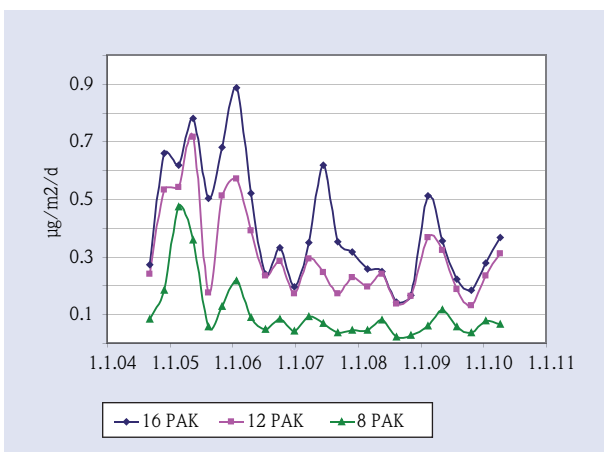


Abb. 3-7: jahreszeitlicher Verlauf der PAK-Depositionen (12-Wochen-Mittelwerte in kontinuierlicher Darstellung) an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A (Freiland) für den Sammler Nr. 1

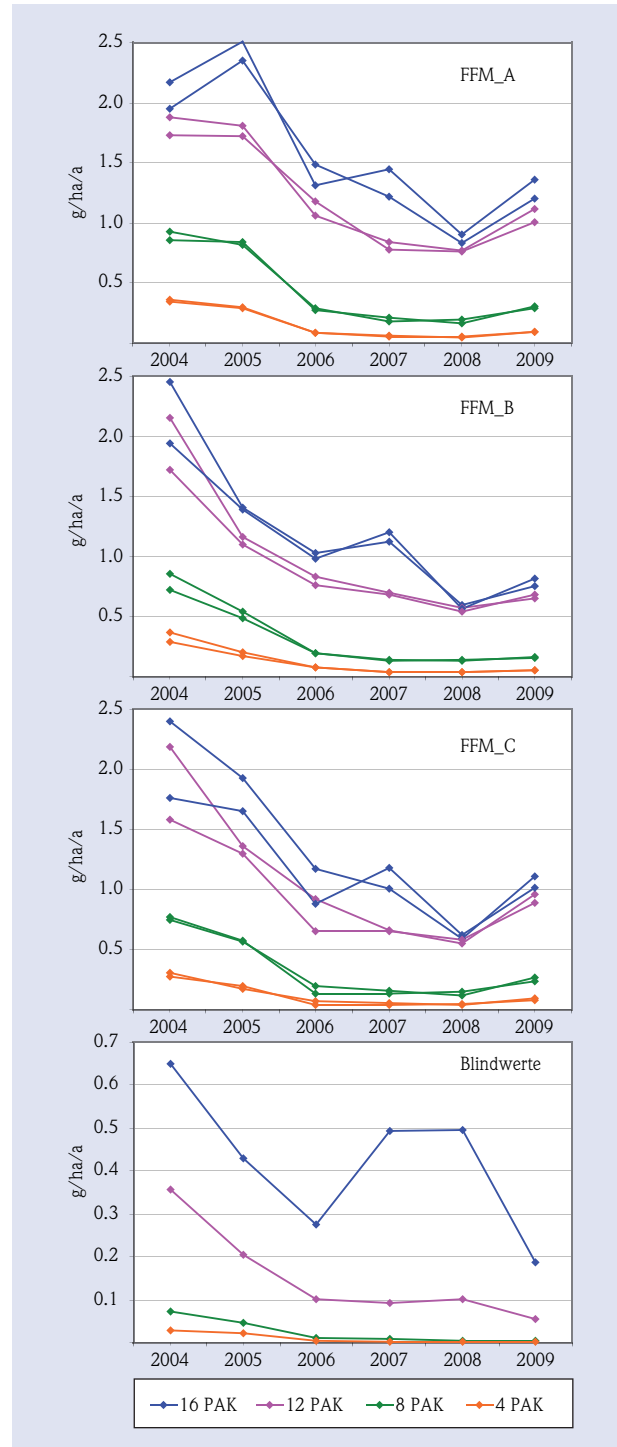


Abb. 3-8: tagesscharfe Jahressummen der PAK-Depositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A, FFM_B und FFM_C jeweils für den Sammler Nr. 1 und Nr. 2 sowie Blindwerte

Zu beobachten ist eine stetige Abnahme der Depositionen bis 2008, 2009 steigen die Depositionen wieder an auf das Niveau von 2006. Der Zusammenhang mit dem Temperaturverlauf in dieser Zeit ist durch Vergleich mit den zugehörigen Wintertemperaturen der betreffenden Jahre in Tabelle 3-7 ersichtlich. Es besteht eine gute Korrelation, wenngleich auch eine Abnahme des Zusammenhangs im Zeitverlauf zu beobachten ist. Möglicherweise ist dies auf Verbesserungen bei Energieeffizienz und Verbrennungstechnik im weiteren Umfeld zurückzuführen.

Weiterhin ist ersichtlich, dass die PAK-Depositionen an den Bestandes-Messplots niedriger sind, als im Freiland. Die nähere Betrachtung der Verhältnisse zwischen den Depositionen der Bestands-Messplots und der Freifläche am Beispiel der 12 PAK- und 8 PAK-Deposition zeigt Tabelle 3-7. Es wird deutlich, dass sich die Eintragsverhältnisse zwischen FFM_B und FFM_C nicht systematisch unterscheiden. Dies legt nahe, dass die Abnahme der PAK-Deposition unter Wald auf einen Rückhalt im Kronenraum zurückzuführen ist und nicht auf eine Zunahme der Entfernung zu einem Emittenten. Es ist also auf den Bestandsflächen mit einem bedeutenden weiteren Eintrag über die Blattstreu zu rechnen (Streusammler erst ab 2010 vorhanden).

Tab. 3-7: Mittelwerte aus Sammler 1, Sammler 2 der 12 PAK- und 8 PAK-Depositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen sowie zugehörige Interzeptionsfaktoren und mittlere Wintertemperaturen (Dez. Vorjahr - März) der DWD-Messstelle Flughafen (2004* = 24.3.04 - 23.03.05)

	FFM_A	FFM_B	FFM_C	Faktor FFM_B / FFM_A	Faktor FFM_C / FFM_A	Wintertemp. °C
	g/ha/a	g/ha/a	g/ha/a			
12 PAK						
2004*	1.81	1.94	1.88	1.07	1.04	3.0
2005	1.77	1.13	1.33	0.64	0.75	3.0
2006	1.12	0.80	0.78	0.71	0.70	1.7
2007	0.81	0.69	0.66	0.85	0.81	6.1
2008	0.77	0.56	0.57	0.73	0.74	4.3
2009	1.06	0.67	0.92	0.63	0.87	2.1
8 PAK						
2004*	0.89	0.79	0.76	0.89	0.85	
2005	0.83	0.52	0.57	0.62	0.69	
2006	0.28	0.20	0.16	0.70	0.58	
2007	0.20	0.14	0.15	0.72	0.74	
2008	0.18	0.14	0.13	0.75	0.74	
2009	0.30	0.16	0.25	0.54	0.85	

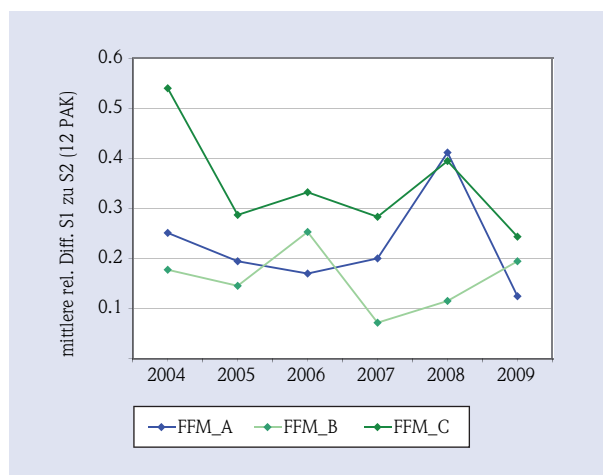


Abb. 3-9: Jahresmittelwerte der relativen Differenzen (Betrag S1 - S2 / Mittelwert S1, S2) zwischen Sammler Nr. 1 und Nr. 2 für die Summe der 12 PAK an den Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand)

Bei den Blindwerten ist eine kontinuierliche Abnahme zu verzeichnen. Da diese von den zugehörigen Jahres-Depositionen abgezogen wurden, haben sie keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der gemessenen Depositionen mit der Tendenz zur Abnahme. Ein weiteres Qualitätssicherungsmerkmal leitet sich aus Abbildung 3-9 ab. Dargestellt sind die Mittelwerte der Abweichungen zwischen den jeweils zwei Parallelsammlern innerhalb der 12-wöchentlichen Sammelintervalle für 12 PAK. Bei großer Streuung läßt sich hier kein Trend zu einer Veränderung feststellen, d. h. dass der beobachtete zeitliche Verlauf auch nicht von etwaigen Kontaminationen oder lokalen Veränderungen der Eintragsituation beeinflusst ist. Seit Ende 2006 werden frostsichere PTFE-Kartuschen statt Glas-Kartuschen im Winterbetrieb eingesetzt. Vergleichsmessungen ergaben keine Hinweise auf Minderbefunde.

Vergleichsdaten zu PAK-Depositionen sind in LUBW (2008) veröffentlicht. Demnach liegt die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit 12 PAK-Depositionen von 1,8 bis 0,8 g/ha/a im unteren Wertebereich, vergleichbar etwa mit dem, was im weiteren Umfeld eines Ballungsraumes wie Stuttgart oder Mannheim/Heidelberg gegenwärtig zu erwarten ist.

Das Trichter-Adsorber-Verfahren nach DIN 19739 befindet sich aktuell im Novellierungsverfahren. Im Fokus stehen mögliche Minderbefunde durch unzureichenden Partikelrückhalt im Adsorberbett. Ergeb-

nisse sind ab 2011 zu erwarten. Möglicherweise wird dann eine Korrektur der absoluten Depositionswerte erforderlich sein. Auf die hier festgestellte relative Bewertung der Eintragungssituation hätte dies jedoch keinen Einfluss.

3.4 Sickerfrachten

3.4.1 Wasserhaushaltsmodellierung

Sickerfrachten werden als Produkt aus Bodenwasserkonzentration der gewonnenen Bodenlösungen und zugehöriger Sickerrate berechnet. Sickerraten können zum gegenwärtigen Stand der Technik nicht direkt gemessen werden. Sie müssen deshalb durch Wasserhaushaltsmodellierung berechnet werden.

Für die Simulationsperiode 2004 - 2009 konnte der für das Jahr 2004 schon bestehende Rechenweg im Kern beibehalten werden (HLUG 2006). Aufgrund der inzwischen deutlich längeren Zeitreihe und zusätzlich zur Verfügung stehender Messungen der Grundwasserstände, ergaben sich im Zuge der Modellkalibrierung jedoch teilweise veränderte Parametrisierungen, auf die im Folgenden nur stichpunktartig eingegangen werden kann.

Klimadaten werden von der ca. 5 km nordöstlich gelegenen DWD-Messstation Frankfurt Flughafen übernommen. Bei den Niederschlagsdaten zeigten sich häufig Abweichungen bei den 4-wöchentlichen Niederschlagssummen zwischen DWD und den PE2-Sammlern der drei Messplots. Nach 6 Jahren gleichen sich diese Differenzen nahezu aus, so dass sie restlos

Tab. 3-8: Jahres-Niederschlagshöhen an der DWD-Station Frankfurt Flughafen sowie PE2-Sammlerwerte am Messplot FFM_A (in mm)

	DWD-FF	FFM_A
2004	556	600
2005	524	537
2006	634	614
2007	689	704
2008	555	528
2009	664	596
Summe	3622	3580

aus der räumlichen Heterogenität der Niederschlagsverteilung auf der Skala von 5 km zu erklären sind (Tabelle 3-8). Für die Übertragung der DWD-Tagessummen auf den Freiland-Messplot FFM_A wurden diese deshalb durch Korrekturfaktoren solange angepasst, bis die vor Ort gemessenen 4-wöchentlichen Niederschlagssummen eingehalten wurden. Auf die so erhaltene Zeitreihe der Tageswerte wurde schließlich das Interzeptionsmodell angewendet, mit dem die an den Bestands-Messplots FFM_B und FFM_C mit PE2-Sammlern gemessenen 4-wöchentlichen Niederschlagssummen angeeicht wurden.

Die Modellierung erfolgte mit dem Modell WHNSIM (Huwe 1992) auf Tagesbasis (eindimensional, homogener Fluss, keine Hysterese). Das anhand der 6-jährigen Zeitreihe neu kalibrierte Modell FFM_medium ist in Tabelle 3-9 dokumentiert.

Aus Platzgründen können die erzielten Anpassungen der modellierten Saugspannungen und Wassergehalte an die real gemessenen hier nicht dargestellt werden. Sie können aber insgesamt als gut bewertet werden, wenngleich es bei einem notwendigerweise vereinfachenden Modell immer auch zu Abweichungen von der Natur kommen muss. Entscheidend ist die adäquate Abbildung der gesuchten Zielgrößen, hier der Sickerraten in den Einbautiefen der Saugsonden (0 cm, 10 cm, 30 cm, 60 cm). Als Validierungskriterium wurde deshalb der Nachbildung des gemessenen Grundwasserstands Priorität eingeräumt. So konnte der vor Ort gemessene Grundwassergang (speziell

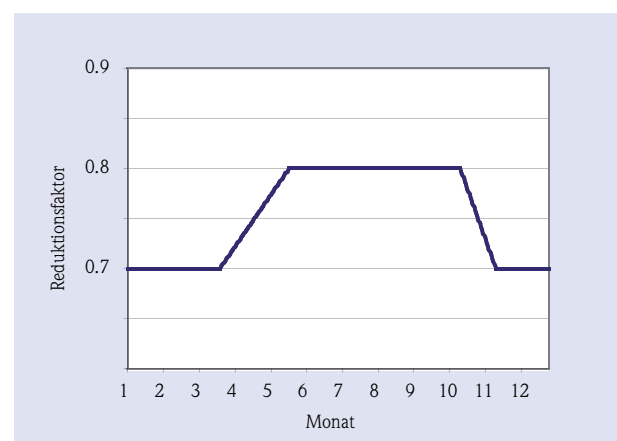


Abb. 3-10: Reduktionsfaktoren für die potentielle Evapotranspiration (Modelllauf 2004 - 2009, angewendet nach Abzug der Interzeption gemäß Interzeptionsmodell)

die Anstiege) mit dem Modell recht gut nachgebildet werden und zwar durch die Sickeraten am unteren Modellrand und unter der Annahme eines nutzbaren Porenvolumens im Untergrund von 15 % (ebenfalls nicht dargestellt). Hierbei wurde von einem gewissen Grundwasserabstrom ausgegangen.

Modellanpassungen in beiden Dimensionen, Boden-

wasserstatus und Grundwasserganglinie gleichzeitig, waren nur möglich durch eine Reduzierung der zugrunde liegenden Grasreferenzverdunstung durch Pflanzenfaktoren wie in Abbildung 3-10 gezeigt. Pflanzenfaktoren für Waldbestände stehen in der Literatur nicht zur Verfügung. Für blattwerfende Obstkulturen in Kalifornien werden je Vegetationsphase Werte zwischen 0,5 und 1,2 angegeben, in Wald-

Tab. 3-9: Modellarchitektur FFM_medium mit wesentlichen Parametrisierungen (Stand 11/2010)

Sondenpositionen	Tiefe real	Geometrie	Komp.-Nr.	Hor.-Nr.	Bodenart	Wurzeldichte	kf (cm/d)
	- 10 cm	Streu	0	1		0	500
	- 5 cm	Org. Auflage	1	1		100	500
Plattenlysimeter in 0 cm	0 cm	Org. Auflage	2	1		100	500
	5 cm	Ah	3	2	lfS	100	60
Saugkerzen in 10 cm	10 cm	Ah	4	2		100	60
o = Tens/FDR 15 cm	20 cm	o	5	2		100	0.8
Saugkerzen in 30 cm	30 cm		6	2		100	0.8
o = Tens/FDR 35 cm	40 cm	o	7	3	f-mS	100	2
	50 cm		8	4		70	2
o = Tens/FDR 55 cm	60 cm	o	9	4		60	2
Saugkerzen in 60 cm	65 cm		10	5		50	8
o = Tens 70 cm	70 cm	o	11	5		40	8
	75 cm		12	5	k' f-mS	30	10
	85 cm		13	5		20	10
	95 cm		14	6		20	10
	110 cm		15	6		10	10
	125 cm		16	6	k' m-gS	5	30
	140 cm		17	6		0	30
x = Untere Randbedingung in 150 cm	160 cm	x	n+1	7		0	30

randlage ergaben sich für eine Intensiv-Messstelle in Baden-Württemberg Pflanzenfaktoren zwischen 1 und 1,2. Die sich hier ergebenden Pflanzenfaktoren von 0,7 und 0,8 liegen also durchaus im plausiblen Bereich, wenn man in Betracht zieht, dass FFM_C großflächig abgeschirmt innerhalb eines Waldbestands liegt. Es wurde ein Bodenbedeckungsgrad von 0,95 angenommen, bezüglich Reduktionsfunktion für die Wurzelaufnahme und Einstellungen zur Bodenphysik (pF- und kr-Beziehungen) wird auf HLUG (2006) verwiesen; diese wurden unverändert übernommen.

3.4.2 Wasserhaushaltsbilanz 2004 - 2009

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung sind in Tabelle 3-10 auf tagesscharfer Basis der Kalenderjahre dargestellt.

Klimatisch betrachtet erweist sich der Standort damit als trocken, da die potentielle Evapotranspiration die Niederschläge in allen Jahren außer dem regenreichen 2007 übersteigt. Bedingt durch eine dichten Schicht in ca. 3,5 m Tiefe und durch reduzierte hydraulische Leitfähigkeiten geht aber während der Sickerungsphasen ab ca. Dezember bis Anfang April nur wenig Wasser verloren. Dieses geht vielmehr in den Grundwasserspeicher über, der dann über das Jahr hinweg den Pflanzen zur Verfügung steht. Deutlich wird dies durch die lebhafteste Grundwasserganglinie der Abbildung 3-11. In regenarmen Jahren wie 2005 und 2008 ist es deshalb durch Anzapfen des Grundwassers sogar möglich, dass insgesamt mehr verdunstet wird, als an Bestandsniederschlag zur Verfügung steht.

Zu den ermittelten Sickerraten ist anzumerken, dass für die Auflage eine Durchwurzelung beobachtet und modelliert wurde. Die Sickerraten in 0 cm Tiefe, d. h. unterhalb der Auflage sind deshalb geringer als die Infiltration, die an der Obergrenze der Auflage anzusetzen ist. Negative Werte bedeuten kapillaren Aufstieg im Jahressaldo. Die korrespondierenden Summen der Sickerraten während der 4-wöchentlichen Beprobungsintervalle sind aus Platzgründen hier nicht dargestellt. Mit diesen Werten wurden im Folgenden die Sickerfrachten an den Einbaupositionen der Saugsonden in 0 cm , 10 cm, 30 cm und 60 cm durchgeführt.

Tab. 3-10: Wasserhaushaltsbilanzglieder in Form der modellierten Jahreswerte FFM_medium 2004 - 2009 in mm (NS= Freilandniederschlag FFM_A, BN=Bestandsniederschlag FFM_B/ FFM_C, IZ=Interzeptionsverdunstung, ETpot=potentielle Evapotranspiration bzw. Grasreferenzverdunstung reduziert um Vegetationsfaktoren, Evaporation = Verdunstung von der Streuauflage, Transpiration = Verdunstung über die Pflanzenwurzeln, Sickr. = Sickerraten in den betreffenden Bodentiefen)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
NS	603	535	616	701	528	596
BN	553	502	578	634	502	550
IZ	49	33	38	67	26	46
Evaporation	16	14	17	17	13	14
Infiltration	536	487	561	615	487	535
Transpiration	493	503	523	555	483	478
ETpot	610	638	654	623	646	644
Sickr. 0 cm	498	452	516	585	453	474
Sickr. 10 cm	426	379	441	516	380	397
Sickr. 30 cm	284	236	294	375	241	249
Sickr. 60 cm	142	109	138	194	135	116
Sickr. 110 cm	61	35	14	82	34	20
Sickr. 125 cm	54	25	1	69	26	10
Sickr. 140 cm	49	19	-4	62	27	5

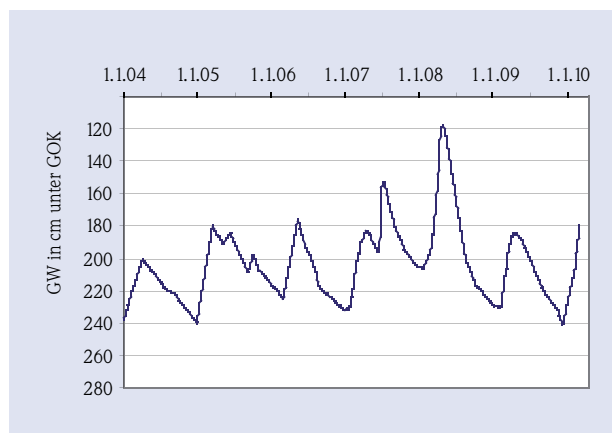


Abb. 3-11: Grundwasserganglinie an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen 2004 - 2009. Ab Mitte 2006 kontinuierliche Messungen mit Grundwasserstandssonde, davor Lichtlotmessungen interpoliert.

3.4.3 Sickerfrachten 2004 - 2009

Das im Sickerwasser gemessene Parameterspektrum ergibt sich aus den folgenden Tabellen 3-11 bis 3-13. Für den Berichtszeitraum 24.03.2004 bis 13.01.2010 liegen inzwischen 4920 Analysenergebnisse vor. An 77 Terminen und 4 Probenentnahmetiefen konnten 249 Proben von 308 potentiell möglichen gewonnen werden. Überwiegend sind fehlende Proben auf Trockenheit zurückzuführen, zum Teil auf technische Defekte. Die Datenverfügbarkeit liegt damit bei 81 %. Lediglich 8 Werte mussten bei der Datenplausibilisierung als Ausreißer eliminiert werden.

19 % fehlende Werte wurden auf Basis der Frachten ergänzt. Dazu wurden die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten in den vorhandenen Frachten durch Regressionsanalysen mit unabhängig zur Verfügung stehenden Parametern untersucht. Dabei ergaben sich sehr parameterspezifische Zusammenhänge, die in ihrer Vielfalt hier nur angedeutet werden können. So sind meist die Korrelationen mit den Sickerraten am stärksten, so z. B. bei Cr mit R2 um 0,9. Es treten aber auch jahreszeitliche Effekte auf, mit parameterspezifischen Maxima von Frühjahr bis in den Herbst, deren Ausprägung mit der Probennahmetiefe abnimmt. Hinzu treten aber auch lediglich phasenweise Mobilisierungen, so dass zum Auffüllen der Datenlücken letztlich eine händische Methode anhand der jeweiligen Zeitreihen unter Berücksichtigung der gefundenen Zusammenhänge die best begründetsten Ergebnisse lieferte. Auf die Resultate kann hier im Einzelnen aus Platzgründen nicht eingegangen werden; ein Beispiel ist in Abbildung 3-12 für Cadmium in 10 cm Tiefe dargestellt, einem Vertreter mit geringer Korrelation zur Sickerrate.

Aus den ermittelten 4-wöchentlichen Sickerfrachten wurden die Jahres-Sickerfrachten analog zu den Depositionsfrachten nicht kalenderscharf, sondern bezogen auf die Stichtage der jeweiligen Probennahmetermine berechnet. Daraus ergeben sich nur geringfügige Abweichungen die z. B. bei den Jahres-Sickerraten der Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11 erkennbar sind. Analysenwerte kleiner als die Bestimmungsgrenze ergaben sich nur bei Ammonium und Antimon. Hier wurden wegen generell geringer Gehalte die Laborwerte unverändert verwendet, auch dann, wenn diese unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen.

Die ermittelten Jahres-Sickerfrachten sind in den Tabellen 3-11 bis 3-13 dargestellt. Insgesamt zeigt sich ein plausibles Bild, das mit den bodenkundlichen Erkenntnissen zum Stofftransport in der ungesättigten Zone in Einklang steht, ohne Anzeichen auf offensichtliche Artefakte wie etwa Mobilisierung durch den Sondeneinbau oder Adsorption am Sondenmaterial.

Für Cadmium ist dies in Abbildung 3-12 und 3-13 exemplarisch illustriert. Es ist auch nirgends ein zeitlicher Trend auszumachen, eher ein Auf und Ab im Zuge der komplexen Stofftransportbedingungen, wie sie in Böden herrschen. Für den Zweck der Bilanzierung ergibt sich hieraus die Vereinfachung, im Weiteren lediglich mit den zugehörigen Mittelwerten verfahren zu können.

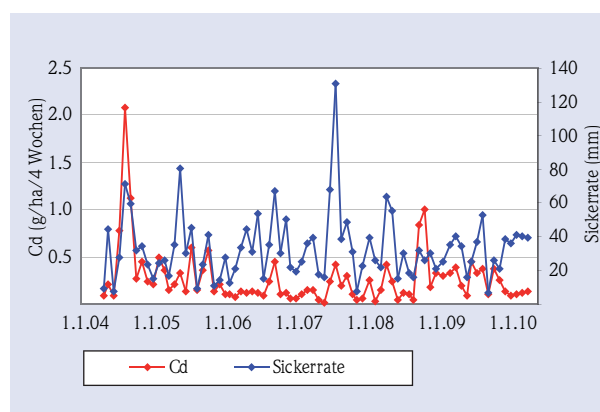


Abb. 3-12: 4-wöchentliche Cd-Frachten mit dem Sickerwasser in 10 cm Tiefe sowie korrespondierende modellierte Sickerraten an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen 2004 - 2009.

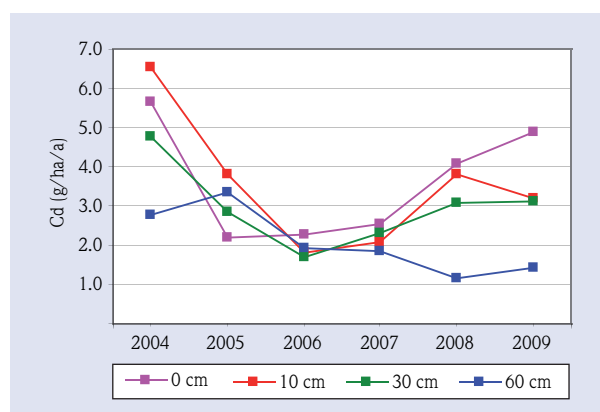


Abb. 3-13: Cd-Jahres-Sickerfrachten in den 4 Probenentnahmetiefen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen 2004 - 2009.

Tab. 3-11: Sickerraten, mittlerer pH-Wert und Sickerfrachten der gemessenen Hauptelemente sowie Mittelwerte (MW) 2004* bis 2009 an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in kg/ha/a, Protonen in kmol/ha/a (2004* = 24.3.04 - 23.3.05)

	Tiefe	2004*	2005	2006	2007	2008	2009	MW
Sicker- rate (mm)	0	462	457	508	592	454	486	493
	10	391	384	435	521	381	410	420
	30	252	240	289	379	242	264	278
	60	111	111	135	196	137	132	137
pH (-)	0	3.7	3.9	3.9	3.7	3.6	3.8	3.8
	10	3.9	4.0	4.1	4.0	3.9	4.2	4.0
	30	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	60	4.0	3.9	3.9	3.8	3.9	4.0	3.9
Pro- tonen	0	1.14	0.58	0.70	1.12	1.33	0.80	0.94
	10	0.56	0.37	0.33	0.54	0.55	0.30	0.44
	30	0.28	0.17	0.21	0.33	0.18	0.19	0.23
	60	0.12	0.14	0.17	0.34	0.18	0.11	0.18
Cl	0	15.5	8.8	11.1	13.7	16.5	23.6	14.9
	10	15.9	25.6	18.3	22.0	21.1	26.5	21.6
	30	14.9	7.5	9.2	23.0	17.8	21.8	15.7
	60	6.8	5.8	6.8	8.1	8.4	18.8	9.1
SO4	0	30.3	12.4	15.9	24.7	34.0	37.1	25.7
	10	34.7	31.3	32.4	36.6	30.7	37.6	33.9
	30	24.8	23.9	41.8	62.3	40.4	35.6	38.1
	60	22.1	18.0	28.5	48.8	36.4	32.8	31.1
NO3-N	0	50.1	10.0	12.1	16.2	34.9	27.5	25.1
	10	72.9	32.7	10.5	15.0	35.9	24.8	32.0
	30	32.3	19.0	6.9	2.4	7.4	22.5	15.1
	60	18.6	23.9	9.1	1.4	0.1	1.0	9.0
NH4-N	0	-	-	-	0.5	2.6	2.0	1.7
	10	-	-	-	0.1	0.2	0.9	0.4
	30	-	-	-	0.2	0.0	0.4	0.2
	60	-	-	-	0.1	0.0	0.0	0.0
Ca	0	44.2	16.6	23.2	26.6	32.2	35.8	29.7
	10	39.9	21.9	13.5	17.3	21.9	20.9	22.6
	30	14.5	10.8	8.5	9.9	8.7	11.8	10.7
	60	6.6	8.0	4.8	4.8	3.3	3.7	5.2
Mg	0	8.7	3.2	5.2	6.0	7.2	7.3	6.3
	10	10.0	5.9	3.3	4.3	6.7	6.7	6.1
	30	5.1	3.0	2.3	2.9	2.9	4.5	3.5
	60	2.5	2.8	1.5	1.6	1.2	1.5	1.8
Na	0	5.2	3.5	5.3	6.2	6.7	7.8	5.8
	10	9.7	7.7	9.9	11.5	9.7	8.6	9.5
	30	10.0	5.8	6.8	11.5	8.8	10.0	8.8
	60	5.8	4.2	4.8	6.2	5.0	9.0	5.8
K	0	29.8	12.6	31.1	28.4	36.8	46.0	30.8
	10	28.1	16.4	14.6	14.3	9.2	18.7	16.9
	30	5.0	4.3	4.6	5.3	3.6	4.5	4.5
	60	1.8	2.0	3.4	5.2	3.0	3.7	3.2

Tab. 3-12: Sickerfrachten von Aluminium, Mangan und Eisen sowie Mittelwerte (MW) 2004* bis 2009 an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in kg/ha/a (2004* = 24.3.04 - 23.3.05)

	Tiefe	2004*	2005	2006	2007	2008	2009	MW
Al	0 cm	7.4	5.2	6.0	7.1	7.4	10.2	7.2
	10 cm	23.2	15.5	10.1	12.0	13.3	13.0	14.5
	30 cm	9.4	6.1	3.8	4.5	4.0	5.9	5.6
	60 cm	8.2	10.8	5.2	4.3	3.0	3.5	5.8
Mn	0 cm	17.2	6.7	9.7	10.2	9.9	12.2	11.0
	10 cm	11.1	6.3	3.4	3.1	5.5	6.3	6.0
	30 cm	5.3	3.3	2.2	3.1	3.2	4.2	3.5
	60 cm	4.5	5.5	3.4	3.6	2.6	3.6	3.9
Fe	0 cm	3.04	3.18	3.48	4.63	3.43	4.69	3.74
	10 cm	0.86	0.69	0.76	1.00	0.75	0.82	0.81
	30 cm	0.06	0.07	0.07	0.07	0.03	0.04	0.06
	60 cm	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02

Vergleichswerte für Sickerfrachten stehen aufgrund starker Standortabhängigkeit kaum zur Verfügung. An einem klimatologisch und hydrogeologisch vergleichbaren Standort in der Oberrheinebene wurden nach Größenordnung aber auch nach stoffspezifischem Verlauf im Profil sehr ähnliche Sickerfrachten ermittelt (LUBW 2008).

Eine Validierung der ermittelten Sickerfrachten ist auch durch Tracerversuche wegen der Parameterabhängigkeit nur begrenzt möglich. Eine weitergehende Plausibilisierung gelingt aber durch Bilanzierungsverfahren, die sich auf sogenannte konservative Elemente wie Natrium oder Chlorid stützen, die wenig sorbieren und wenig mit der Biosphäre interagieren. Hierzu wird auf die Zusammenschau der Frachten in Kapitel 3.5 verwiesen.

Tab. 3-13: Sickerraten, mittlerer pH-Wert und Sickerfrachten der gemessenen Schwermetalle und Arsen sowie Mittelwerte (MW) 2004* bis 2009 an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in kg/ha/a (2004* = 24.3.04 - 23.3.05)

	Tiefe	2004*	2005	2006	2007	2008	2009	MW
Pb	0 cm	142	116	148	148	134	201	148
	10 cm	29	22	21	19	17	15	20
	30 cm	12	11	7	11	6	7	9
	60 cm	2.2	2.0	0.9	0.9	0.4	0.6	1.2
Cd	0 cm	5.6	2.2	2.3	2.5	4.1	4.9	3.6
	10 cm	6.6	3.8	1.8	2.1	3.8	3.2	3.5
	30 cm	4.8	2.9	1.7	2.3	3.1	3.1	3.0
	60 cm	2.8	3.3	1.9	1.8	1.1	1.4	2.1
Ni	0 cm	55	28	34	40	48	55	43
	10 cm	96	56	35	46	59	48	57
	30 cm	51	36	26	32	29	39	35
	60 cm	30	35	21	23	16	19	24
As	0 cm	11.3	6.9	8.0	8.6	7.8	11.6	9.0
	10 cm	10.4	9.8	9.7	9.2	5.9	7.2	8.7
	30 cm	2.8	2.0	2.1	3.4	2.3	2.6	2.5
	60 cm	3.0	3.4	1.6	1.1	0.6	0.6	1.7
Cr	0 cm	11.0	7.9	9.0	12.9	10.1	17.6	11.4
	10 cm	12.5	12.0	13.7	14.8	11.9	13.6	13.1
	30 cm	1.2	1.0	1.1	1.5	0.9	1.2	1.1
	60 cm	0.6	0.5	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4
Cu	0 cm	176	136	150	206	153	211	172
	10 cm	73	62	80	90	59	72	73
	30 cm	8	6	7	10	11	8	8
	60 cm	3	3	2	3	3	2	3
Co	0 cm	14.1	7.0	7.7	8.2	12.4	13.5	10.5
	10 cm	40.7	25.8	15.3	20.6	29.0	15.1	24.4
	30 cm	46.1	20.9	16.0	27.9	26.7	30.2	28.0
	60 cm	23.6	19.4	12.4	12.9	10.6	12.0	15.2
Zn	0 cm	591	215	264	305	444	479	383
	10 cm	649	376	212	243	397	333	368
	30 cm	327	231	169	196	174	247	224
	60 cm	160	205	128	131	90	106	137
Sb	0 cm	2.51	2.26	2.39	2.71	2.18	3.26	2.55
	10 cm	0.98	1.14	1.33	1.20	0.81	1.23	1.11
	30 cm	0.08	0.08	0.07	0.10	0.07	0.11	0.08
	60 cm	0.06	0.04	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03

3.5 Zusammenschau der Frachten

Die Zusammenschau aller ermittelten Frachten auf Basis der Mittelwerte der Jahresfrachten 2004* - 2009 in Tabelle 3-14 und Tabelle 3-15 erlaubt erste Bilanzierungsansätze und ist eine Vorstufe für umfängliche Bilanzen, die jedoch zusätzlich das Einbeziehen der relevanten Stoffvorräte und der noch ausstehenden Streufrachten erfordern. Es lassen sich aber schon auf diesem Zwischenniveau durchaus Schlussfolgerungen ziehen für das Prozessverständnis am Standort, aber auch für die weitergehende Plausibilisierung der erzielten Ergebnisse.

Betrachtet man Chlorid und Natrium als konservative Tracer, die das System ohne Interaktion nur durchlaufen und auch nicht über den Streufall eingetragen werden, sollten sich vom Bestandsniederschlag an FFM_C bis zum Austrag in 60 cm Tiefe im mehrjährigen Mittel die gleichen Frachten ergeben. Tatsächlich zeigen sich Abweichungen von diesem Idealbild. So ist zwar die Übereinstimmung mit dem Bestandeseintrag in 0 cm und 60 cm recht gut, in 10 cm und 30 cm deutet sich aber eine Überschätzung um ca. den Faktor 2 an.

Eine Überschätzung bei den Sickerraten um den Faktor 2 in 10 cm und 30 cm Tiefe könnte auf unpassende Modellparameter zurückzuführen sein. So ist es nicht ausgeschlossen, dass sich eine bisher noch unentdeckte Parameterkombination für das Modell finden lässt, die in Einklang mit den gemessenen bodenphysikalischen Zeitreihen steht und gleichzeitig die betreffende Überschätzung nicht aufweist. Zuvor sollte aber ein Schlüsselement für die Hydraulik am Standort, und zwar die dichtende Schicht in ca. 30 cm Tiefe in ihrer räumlichen Lage, sowie Mächtigkeit und Leitfähigkeit vor Ort genauer erfasst werden.

Eine weitere mögliche Erklärung der Überschätzung findet sich in der Kombination zahlreicher anderer Einflussfaktoren. Dazu können zählen: bevorzugte Gewinnung von Bodenwasser aus der Bodenmatrix, das gegenüber präferentiell fließendem Wasser höhere Konzentrationen aufweist, Analysenfehler, aber möglicherweise auch das Vorhandensein alter Natrium- und Chloridvorräte im Boden sowie der, wenn auch geringe, Eintrag über den Streufall. Unter Berücksichtigung der Komplexität des untersuchten Stofftransports und der notwendigen methodischen

Vereinfachungen bei der Berechnung ergibt sich hiermit also die dargestellte Qualitätseinstufung der ermittelten Sickerfrachten, die bei künftigen Bilanzierungen mit berücksichtigt werden sollte.

Streufrachten stehen bis dato nicht zur Verfügung. Streusammler sind seit 2010 installiert, so dass erste Ergebnisse ab 2011 zu erwarten sind. Aus der Literatur kann als grobe Faustzahl abgeleitet werden, dass Streufrachten etwa im Wertebereich der entsprechenden Bestandsniederschläge liegen (LUBW 2008). Im vorliegenden Fall ist der Waldbestand eher schüttern, so dass geringere Streufrachten zu erwarten sind. Dies ist bei den weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen, die Tabellen 3-14 und 3-15 sind entsprechend imaginär zu ergänzen.

Bei den Nährelementen der Tabelle 3-14 zeigt sich in der Regel eine Mobilisierung durch Abbau der organischen Auflage. Ammonium nimmt hier dagegen ab, bedingt durch Nitrifikation und vermutlich auch

Aufnahme über die Wurzeln. Mit zunehmender Tiefe wird der Entzug durch die Pflanzen deutlich. Sulfat ist hier eine Ausnahme; es durchläuft den Bodenkörper mit nahezu konstanter Rate mit vermutlich methodisch bedingten Variationen analog zu Natrium und Chlorid.

Der atmosphärische Säureeintrag bei FFM_C liegt im Mittel bei 0,7 kmol/ha/a (Ammonium x 2 + Protonen). Mikrobielle Abbauprozesse und Nitrifikation ca. der Hälfte des eingetragenen Ammoniums in der organischen Auflage führen zu Säureproduktion und damit zur hohen Protonenfracht in 0 cm Tiefe von 0,94 kmol/ha/a, die schließlich durch Pufferungsprozesse im Boden mit der Tiefe abnimmt.

Bei den Schwermetallen, Aluminium und Arsen zeigt sich ein differenziertes Bild. So kann bei Parametern, deren Auflage-Output den Bestandseintrag gegenwärtig um deutlich mehr als das Doppelte übersteigt (wegen Anrechnung einer Streufracht), von einer

Tab. 3-14: Mittelwerte der ermittelten Jahresfrachten 2004* - 2009 der Hauptelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in kg/ha/a, Protonen in kmol/ha/a

	mm/a	Protonen	Cl	SO4	NO3-N	NH4-N	Ca	Mg	Na	K	Mn	Al	Fe
FFM-A	607	0.13	4.6	11.4	3.8	4.54	2.9	0.4	2.2	2.6	0.3	0.7	1.63
FFM-B	539	0.11	6.5	13.2	5.1	3.50	4.3	1.0	2.7	11.1	6.3	0.5	2.19
FFM-C	605	0.17	10.1	16.1	5.7	3.86	5.5	1.3	4.3	12.6	4.8	0.6	2.11
Streufracht	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 cm	493	0.94	14.9	25.7	25.1	1.69	29.7	6.3	5.8	30.8	11.0	7.2	3.74
10 cm	420	0.44	21.6	33.9	32.0	0.43	22.6	6.1	9.5	16.9	6.0	14.5	0.81
30 cm	278	0.23	15.7	38.1	15.1	0.19	10.7	3.5	8.8	4.5	3.5	5.6	0.06
60 cm	137	0.18	9.1	31.1	9.0	0.02	5.2	1.8	5.8	3.2	3.9	5.8	0.02

Tab. 3-15: Mittelwerte der ermittelten Jahresfrachten 2004* - 2009 der Spurenelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in g/ha/a

	Pb	Cd	Ni	As	V	Cr	Co	Cu	Zn	Sb	16 PAK	12 PAK	8 PAK	Benzo(a)pyren
FFM-A	11.5	0.9	12.4	1.7	7.1	9.9	2.3	171	207	2.92	1.56	1.22	0.45	0.05
FFM-B	11.8	1.1	19.6	2.4	8.7	14.7	2.4	123	245	4.32	1.19	0.97	0.32	0.04
FFM-C	11.2	0.9	15.1	2.2	8.5	13.5	2.1	112	235	4.66	1.28	1.02	0.34	0.04
Streufracht	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 cm	148.2	3.6	43.4	9.0	-	11.4	10.5	172	383	2.55	-	-	-	-
10 cm	20.5	3.5	56.9	8.7	-	13.1	24.4	73	368	1.11	-	-	-	-
30 cm	9.1	3.0	35.4	2.5	-	1.1	28.0	8	224	0.08	-	-	-	-
60 cm	1.2	2.1	24.1	1.7	-	0.4	15.2	3	137	0.03	-	-	-	-

Aufzehrung des zugehörigen Auflage-Vorrats ausgegangen werden. Hierzu zählen Aluminium, Blei, Cadmium, Arsen und Kobalt. Dies erscheint als Ergebnis einer erfolgten Luftreinhaltung und einem Auflagealter von mutmaßlich einigen Jahrzehnten als plausibel (eine Alterschätzung der organischen Auflage wäre anhand ihrer Stoffvorräte jetzt möglich). Bei einer anderen Gruppe von Elementen zeigt sich eher ein Fließgleichgewicht in der organischen Auflage. Hierzu zählen Mangan, Eisen, Nickel, Chrom, Kupfer und Zink. Eine Sonderrolle nimmt Antimon ein, das in der Auflage gegenwärtig akkumuliert. Antimon ist als Asbestersatzstoff in Bremsbelägen ein relativ junger Bestandteil anthropogener Emission, so dass dieses Ergebnis sehr plausibel ist.

Im Verlaufe der Bodenpassage ergeben sich schließlich nahezu bei allen Schwermetallen Abnahmen der Sickerfrachten. Hierfür sind mehrere Faktoren verantwortlich, wie Abnahme der Löslichkeit durch pufferungsbedingte pH-Abnahmen insbesondere bei Eisen und Blei sowie Abnahmen der Sickerraten und der Gehalte an organischen Komplexbildnern. Mindestens bei den für Pflanzen essentiellen Spurenelementen Kupfer und Zink tritt noch eine Wurzelentnahme hinzu. Freisetzung aus dem Ausgangsgestein überlagert diese Prozesse in stoff- und bodenspezifischen Maße, das für den Standort nur durch umfängliche Bilanzierung quantifiziert werden kann. Zumindest bei Kobalt ist eine solche Freisetzung offensichtlich, da hier die Sickerfracht in 60 cm Tiefe die in 0 cm übersteigt.

Die Ermittlung von Sickerfrachten für PAK ist ein noch ungelöstes Problem der Forschung. Weitergehende Plausibilisierungen sind hier durch Abgleich mit den korrespondierenden Vorräten im Rahmen umfänglicher Bilanzen möglich.

Im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit fügen sich die ermittelten Ergebnisse demnach insgesamt in ein sehr schlüssiges Bild, wodurch ihre Plausibilität bestätigt wird.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Bericht wertet die Ergebnisse aus nunmehr 6-jähriger Betriebsdauer der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen aus.

Der Betrieb der Messstelle verlief in dieser Zeit durchgehend robust und zuverlässig. Die Datenverfügbarkeit lag selbst bei dem in dieser Hinsicht kritischsten Teil, der Sickerwassergewinnung, bei 81 %, beim Depositionsteil deutlich über 90 %. Wie sich auch anhand der erzielten Ergebnisse zeigt, erweist sich die Messstelle als geeignet, die Umweltsituation in stofflicher Hinsicht standortbezogen sehr detailliert und quantitativ zu charakterisieren. Untersucht wurde die Eintragsituation und der Sickerwasserpfad über das Parameterspektrum Hauptelemente, Schwermetalle und Arsen sowie EPA-PAK (diese nicht im Sickerwasser).

Die Eintragsituation stellt sich dar, wie sie im weiteren Umfeld eines Ballungsraum zu erwarten ist, mit Tendenz zum unteren Wertebereich in dieser Kategorie. Einzig bei Kupfer fallen hohe Einträge auf, deren Quelle aufgrund der beobachteten Transektbeziehungen wahrscheinlich östlich der Messstelle liegt. Nach Recherchen des HLUG kann Kerosion Kupfer in unterschiedlichen Gehalten enthalten, je nach Herkunft des verwendeten Rohöls, Herstellungsverfahren und Lagerbedingungen. Um aber Triebwerksemissionen als Ursache für die beobachteten Kupfereinträge zu bestätigen, wären Kerosinanalysen erforderlich. Eine ökologische Bewertung der Kupfereinträge kann sinnvollerweise erst auf Basis einer unfänglichen Umweltbilanz erfolgen, im Rahmen gesetzlicher Regelungen nach BBodSchV (1999) sind sie nicht zu beanstanden.

Die Bodenentwicklung ist geprägt durch substratypisch saure Verhältnisse mit pH-Werten im Sickerwasser um 4. Gegenwärtig werden in der Vergangenheit aufgebaute Schadstoffpools in der organischen Auflage abgebaut oder sie stehen im Fließgleichgewicht. Eine interessante Ausnahme bildet Antimon, bei dem eine Akkumulation zu beobachten ist. Dies ist plausibel, da es sich bei Antimon als Ersatzstoff für Asbest in Bremsbelägen um einen recht jungen Vertreter anthropogener Emission handelt. Der Boden bietet bis in die untersuchte maximale Tiefe von 60 cm aktuell einen effektiven Rückhalt bei Eisen, Blei, Chrom,

Kupfer und Antimon; bei Cadmium, Nickel, Arsen, Kobalt und Zink sind in dieser Tiefe noch nennenswerte Austräge zu beobachten. Konzentrationsbasierte Prüfwerte wurden in 60 cm nur ein einziges Mal und nur knapp überschritten, und dies nur während eines Intervalls ohne Sickerung bei Arsen (Messwert = 10,6 µg/l; Prüfwert = 10 µg/l).

Da die Messstelle ihre Aufgabe gut erfüllt, sind betriebsseitige Optimierungen nur noch unter dem Gesichtspunkt der Kosteneffizienz zielführend. Man könnte an eine Zusammenlegung der Bestands-Messplots FFM_B und FFM_C denken, da sich beide meist mehr aufgrund ihrer Bestandsstruktur unterscheiden als durch ihre Expositionssituation. Potentiell wichtige Transekt-Information - siehe das Ergebnis zu Kupfer in diesem Bericht - ginge dadurch aber verloren. Bei den Bergerhoff-Sammlern im Freiland wäre eine Reduktion der Parallelen von 6 auf 4 vertretbar, die frei werdenden Sammler könnten im Bestand eingesetzt werden.

Eine notwendige Vervollständigung der Messaktivitäten wurde schon Anfang 2010 durch den Aufbau von Streusammlern realisiert. Durch Einbeziehen der Streufrachten wird sich das Gesamtbild der Stoffumsätze am Standort noch verfeinern lassen. Die Streuuntersuchung erlaubt aber auch eine recht kostengünstige Erweiterung des untersuchten Stoffspektrums um zusätzliche organische Schadstoffe. Bei PAK wäre der Kongeneren-Vergleich über die verschiedenen Kompartimente aufschlussreich.

Daten zur Ermittlung von Stoffvorräten liegen dem HLUG vor. Durch Gegenüberstellung der Stofffrachten und Stoffvorräte in Form von Umweltbilanzen wird sich die Stoffdynamik am Standort von einer noch einmal umfassenderen Warte aus beschreiben lassen.

5. Literatur

BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554).

BImSchV (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV), 2. August 2010.

DIN 19739: Luftbeschaffenheit und Bodenbeschaffenheit. Messen der atmosphärischen Deposition organischer Spurenstoffe - Trichter-Adsorber-Verfahren. Teil 1: Sammelgerät (Anforderungen, Aufbau, Anwendung). Teil 2: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe.

Durner W. (1995): SHYPPIT 0.22 User's Manual. Research Report 95.1, Department of Hydrology, University of Bayreuth, D-95440 Bayreuth, 1995.

FVA (2005): Berichte Freiburger Forstliche Forschung Heft 59. Hug, R.; Hepp, R.; Wilpert, K. V.: 18 Jahre Depositionsmessnetz der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.

HLUG (2011): Rechercheergebnis zur Kupferfrage an der Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen. Interne Information, unveröffentlicht.

HLUG (2006): Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen (HE). Wasserhaushaltsbilanz 2004. SE 060425, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht 2006.

HLUG (2005): Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen (HE). Ergebnisse: Stand 09/2005. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2005. <http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/boden/bodendauerbeobachtung/U11-MDHE1101-de2.pdf>

HLUG (2004): Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen (HE). Chronik: Ausstattung & Projekte. U32-MD-HE1104-de, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht 2004.

Huwe (1992): WHNSIM. Ein Modell zur Simulation des Wasser-, Wärme- und Stickstoffhaushalts von Standorten mit unterschiedlicher Nutzung. Version 2.0. August 1992.

Ihle Peter (Hrsg.) (2001): Atmosphärische Deposition in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des Instituts für Energetik und Umwelt, Leipzig. Teubner Verlag 2001.

LUBW (2008): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Baden-Württemberg - von klassischen Bodenuntersuchungen zu medienübergreifenden Umweltbilanzen. ISSN 0949-0256 (Band 21, 2008), LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

Schneider (1995): Konzeptionelle Arbeiten zur Errichtung einer Boden-Dauerbeobachtungsfläche am Beispiel einer Versuchsfläche im Waldgebiet der Gemeinde Rüsselsheim. Diplomarbeit Inst. f. Geowiss. Uni Mainz, 1995.

TA Luft (2002): Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 24. Juli 2002.

UBA (2004): Stoffeintrag aus der Atmosphäre I. Nährstoffe und Säureeintrag - nasse Deposition. Pdf-Grafik, Quelle Umweltbundesamt 2004, Internet-download vom 04.02.2010.

UBA (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden - Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. UBA-Texte 19/05.

UMEG (2002): Bodenwasserhaushalt. Modellierung. Europ. Env. eJournal, Dezember 2002. <http://www.umweltbeobachtung.de/journal/U2431-DBW03-de.pdf>

TÜV Süd (2006): Ausbau Flughafen Frankfurt Main. Gutachten G15.2, Bauimmissionen - Luft. Eschborn, 29. Dezember 2006.



Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

www.hlug.de

