



Umwelt und Geologie

Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 13

Stoffdynamik an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen



Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 13

Stoffdynamik an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Wiesbaden, 2016

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Impressum

Umwelt und Geologie -
Böden und Bodenschutz in Hessen, Heft 13

ISSN 1610-5931
ISBN 978-3-89531-615-9

Stoffdynamik
an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Bearbeitung:

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Postfach 100163, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
Referat 22 - Boden, Altlasten
Werner Borho

Layout: HLNUG, Satz: LUBW, Werner Borho

Fotos: Bodenprofil Abb. 4.1-1 HLNUG, Abb. 5.7-1 B. Henßen/LUBW, alle anderen LUBW

Herausgeber:

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

www.hlnug.de

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

Inhalt

Zusammenfassung	1
1. Einleitung	2
2. Standortbeschreibung und Methoden	3
3. Stoffflüsse 2005 - 2014	5
3.1 Atmosphärische Deposition: Hauptelemente	5
3.2 Atmosphärische Deposition: Anorganische Spurenstoffe (Bergerhoff-Sammler).....	7
3.3 Atmosphärische Deposition: EPA-PAK (16 PAK), (Trichter-Adsorber-Sammler)	10
3.4 Streufallfrachten	13
3.5 Wasserhaushaltsmodellierung und Sickerraten	15
3.6 Sickerfrachten 2005 - 2014	18
3.7 Zusammenschau der Stoffflüsse.....	20
4. Bodenuntersuchungen	23
4.1 Trends der Stoffgehalte im Boden.....	23
4.2 Stoffvorräte im Boden	26
5. Stoffbilanzen	29
5.1 Allgemeine Bilanz-Annahmen.....	29
5.2 Bilanz-Anleitung am Beispiel Blei.....	29
5.3 Abschätzung des Auflage-Alters aus der Bleibilanz.....	31
5.4 Bilanzen weiterer anorganischer Spurenstoffe.....	31
5.5 Bilanzen organischer Spurenstoffe	38
5.6 Nährstoffbilanzen.....	42
5.7 Säurebilanz.....	44
6. Schlussfolgerungen und Ausblick	46
Schlussfolgerungen	46
Ausblick	46
7. Literatur	47
8. Anhang	49

Zusammenfassung

Die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen ist Bestandteil der hessischen Bodendauerbeobachtung und seit 1992 in der Zuständigkeit des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Seither wurden wiederholt ca. 5-jährlich Bodenfeststoffuntersuchungen durch das HLNUG durchgeführt. Mit Stoffflussmessungen wurde die LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg ab März 2004 beauftragt. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse aus nunmehr 10-jähriger Stoffflussuntersuchung und gut 20-jähriger Bodenfeststoffuntersuchung an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen über einen Bilanzansatz dar.

Die Messstelle besteht aus Stofffluss-Messflächen (1 Freifläche, 2 Bestandsflächen) sowie aus einer Bodenbeprobungsfläche mit Profilgrube. Untersucht werden Hauptelemente sowie organische und anorganische Spurenstoffe in den Bilanzteilgliedern atmosphärische Deposition, Sickerwasserpfad sowie verschiedenen Bodenkompartmenten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stoffdynamik am Standort mit dem gewählten Bilanzansatz sehr detailliert und quantitativ charakterisiert werden kann. Es sind damit Rückblicke in die stoffliche Vergangenheit der Böden sowie Prognosen in die Zukunft möglich.

Die Eintragungssituation entspricht weiterhin dem Umfeld eines Ballungsraums im eher unteren Wertebereich. Während des Untersuchungszeitraums sind die Stoffeinträge bei den meisten Parametern nochmals deutlich gefallen. Einzig auffallend bleibt der zwar ebenfalls sinkende, aber immer noch hohe Kupfereintrag. Da Vorsorgewerte bei gleichbleibenden Bedingungen in ca. 70 Jahren erreicht, gleichzeitig aber die zulässigen Zusatzfrachten eingehalten werden, sind die Kupfereinträge nach BBodSchV unproblematisch. Die mögliche Herkunft aus Kerosin wurde in HLUg (2010) diskutiert.

Bewertungen der Stoffdynamik sind anhand der ermittelten Bilanzen möglich. So befindet sich der Boden bei Kupfer gegenwärtig im Übergang von geogener zu atmogener Prägung, mit Akkumulationsraten, wie sie in Ackerböden durch Düngung verursacht werden. Eine Gefährdung des Grundwassers besteht nicht, ebenso wenig für Pflanzen oder Bodenorganismen. Aus Vorsorgegründen wäre dennoch eine weitere Reduktion wünschenswert. Bei den organischen und anorganischen Spurenstoffen nehmen die Vorräte in der organischen Auflage durchweg ab, da der Austrag in den Mineralboden überwiegt. Einzige Ausnahme ist Antimon, dessen Vorratzzunahme wahrscheinlich auf verstärkte Emissionen aus Bremsabrieb seit dem Asbestverbot 1993 zurückgeführt werden kann.

Damit zeigt sich, dass die anthropogene Belastung der Böden durch Umweltschutzmaßnahmen deutlich abgenommen hat. Unterschiede bestehen beim Verbleib der Schadstoffe im Boden. Stoffe, die eine geringe Löslichkeit und hohe Persistenz besitzen, akkumulieren weiterhin, wie z.B. Blei, Arsen oder Chrom, aber auch PAK und Dioxine/Furane. Bei anderen Stoffen wurde inzwischen ein Fließgleichgewicht zwischen Ein- und Austrag erreicht, wie z.B. bei Cadmium und Nickel durch Verlagerung in tiefere Bodenschichten oder bei PCB mutmaßlich durch Abbau bzw. Ausgasung. Andere, dominierend geogene Vorräte werden sehr langsam mit dem Sickerwasser ausgetragen, wie etwa bei Kobalt, Aluminium und Mangan. Bei den Nährstoffen inkl. Zink und Mangan sowie bei der Säurebilanz zeigt sich deutlich die Beteiligung der Pflanzen, so dass Prognosen stark vom Verbleib der Holzernereste abhängig zu machen sind. Eisen- und Aluminium-Bilanzen zeigen Bodenbildungsprozesse.

Die Messstelle erfüllt damit ihre Aufgabe, die stoffliche Umweltsituation und ihre Entwicklung am Standort medienübergreifend und quantitativ sehr detailliert zu charakterisieren. Weitere Präzisierungen sind im Bereich der chemischen Analytik, aber auch durch messtechnischen Einbezug von präferenziellem Fließen sowie der Vegetation noch möglich.

1. Einleitung

Die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen ist Bestandteil des hessischen Bodendauerbeobachtungsprogramms mit speziellem umweltthematischen Bezug zum Flughafenbetrieb. Sie liegt westlich der Startbahn West des Frankfurter Flughafens. Ihre Historie ist in Tabelle 1-1 dargestellt.

Lag der Untersuchungsschwerpunkt in den Anfangsjahren überwiegend beim Medium Boden, so wurden ab 2004 zusätzlich auch medienübergreifende Stoffflüsse kontinuierlich untersucht. In dieser Form als Intensiv-Messstelle ist sie nun mittlerweile seit 10 Jahren ununterbrochen in Betrieb. Auftragnehmer für den Betrieb ist die LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.

In einem ersten Ergebnisbericht (HLUG 2010) konnten schon wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden. Inzwischen stehen überwiegend 10-jährige Zeitreihen zur Auswertung bereit sowie eine 5-jährige Zeitreihe beim Streufall. Es sind damit alle wesentlichen Glieder des Stoffhaushalts quantitativ messtechnisch über einen ausreichend langen Zeitraum erfasst, so dass nun erstmals auch Stoffbilanzen erstellt werden können. Stoffbilanzen verknüpfen Stoffflüsse mit Stoffvorräten in unterschiedlichen Systemkompartimenten. Stoffbilanzen zeigen die Dynamik eines Systems und ermöglichen Rückschlüsse über Veränderungen sowie Prognosen.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der Betriebsjahre 2004 bis einschließlich 2014 in kompakter Form zusammen. Bezüglich der Einzelergebnisse und ihrer jeweiligen Plausibilisierung wird auf die umfangreichen digitalen Datenlieferungen an das HLNUG verwiesen. Diese können hier lediglich in einer Detailtiefe dargestellt werden, die zur Übersicht und für das wesentliche Verständnis erforderlich ist.

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

Datum	Aktion
2011_05	4. Bodenwiederholbeprobung
2010	Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Ergebnisbericht 2004 - 2009 (HLUG 2010)
2010_01	Aufbau der Streusammler für Untersuchung auf organische und anorganische Spurenstoffe im Streufall
2006_05	3. Bodenwiederholbeprobung
14.07.04	Beginn Depositions-Messung der Hauptkomponenten mit PE2-Sammlern
24.03.04	Beginn Depositions-Messung mit 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 austauschenden 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, vorne Sickerwassermessfeld, Streu- und Depositionssammler im Hintergrund.

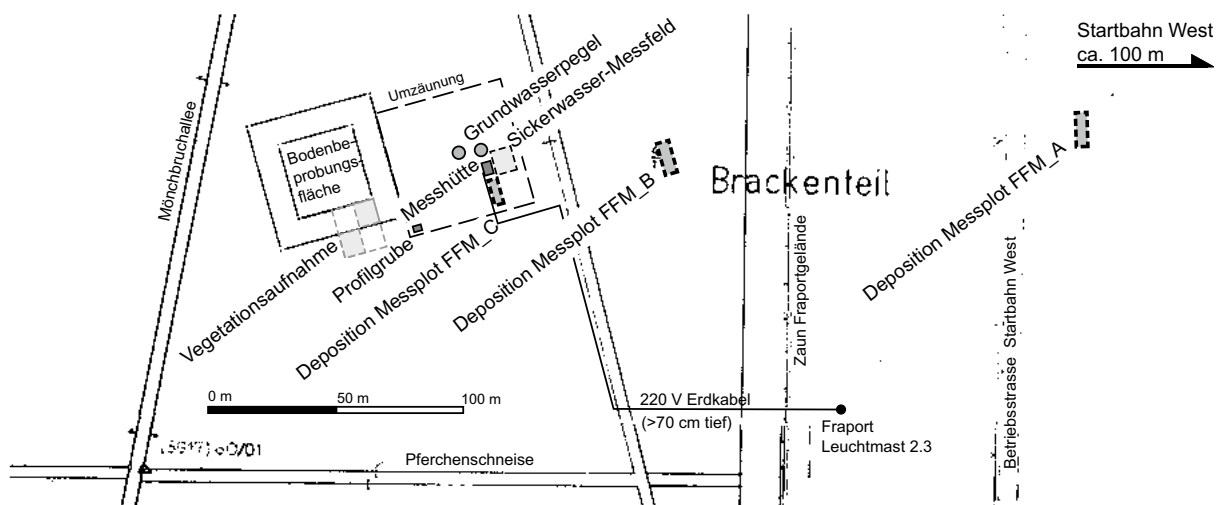


Abb. 2-1: Lage und messtechnische Ausstattung der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen.

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	1	1992	1992	kf, pF, PV, Korngrößen, Schwerminerale, KAK, SM _{mob} , SM _{ges} , C _{org} , N _{ges} , K, Mg, P, (Al, Fe, Mn) Oxalat, Dithionit
Beprobungsfläche	900 m ²	1	1992	ca. alle 5 Jahre	wie Profilgrube zusätzl. PCDD/F, PAK, PCB, CKW, dl-PCB (seit 2011), 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.	Schwermetalle, 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	2	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 Schwermetalle (Analyse 12 wöch.) Hauptelemente organ. Schadstoffe, Schwermetalle

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

Messobjekt	Verfahren	Probenaufbereitung	Analytik
Deposition Schwermetalle, Arsen	Bergerhoff	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	Vorbereitung zur Bestimmung gelöster Elemente QMV 504-32 375-0 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
Deposition PAK	Trichter-Adsorber-Sammler	Soxhletextraktion von Adsorber und Spüllösung mit Aceton	GC-MS nach DIN 19739, ab 2016 VDI 4320, Blatt 4
Streufall	Auffangnetze	Lufttrocknung, Mischprobenbildung, Schneidmühle, Anorganik: Königswasseraufschluss, Organik: Kaltextraktion mit Aceton/Cyclohexan 1:1	Kationen am ICP-MS bzw. ICP-OES Anionen mittels Ionenchromatographie Organik am GC-MS
Bodenfeuchte	FDR-Technik	-	-
Saugspannung	Tensiometrie	-	-
Sickerwasser	in-situ Saugsonden	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: nächstgelegene DWD-Messstellen sowie weitere Messstationen des HLNUG		

*QMV = LUBW-internes Qualitätsmanagementverfahren

3. Stoffflüsse 2005 - 2014

3.1 Atmosphärische Deposition: Hauptelemente

Das Parameterspektrum der gemessenen Hauptelemente ergibt sich aus Abbildung 3.1-1. Werte kleiner als die Bestimmungsgrenzen wurden belassen, Werte kleiner als die Nachweisgrenze gleich der Nachweisgrenze gesetzt. Dadurch entfallen aufwändige Min-/Max-Berechnungen. Dies ist gerechtfertigt, da lediglich NH_4 und untergeordnet Magnesium betroffen und der Einfluss auf das Ergebnis der Jahresfrachten gering ist.

Die Plausibilisierung der Daten erfolgte auf Basis der berechneten 4-wöchentlichen Einzelfrachten in der Einheit Stoffmenge pro ha und Tag, die sich als Produkt aus Gehalt im Niederschlag und entsprechender Niederschlagshöhe im Sammler geteilt durch die Expositionsdauer in Tagen ergeben. Hierauf kann im Einzelnen nicht eingegangen werden, jeder Plausibilisierungsschritt ist jedoch in den Datenlieferungen an das HLNUG im Detail nachvollziehbar. Unplausible Einzelfrachten ergeben sich meist durch Verunreinigung durch Vogelkot, Laborausfälle sind sehr selten. Beide sind anhand von zwei Kriterien identifizierbar: wenn sie deutlich aus der bisherigen Zeitreihe hervorstechen oder sie deutlich aus den gefundenen besten Korrelationen herausfallen. Die besten Korrelationen ergaben sich dabei zwischen den zeitgleichen Einzelfrachten der drei Messplots, die deutlich besser ausfielen, als die jeweiligen Korrelationen mit den zugehörigen Niederschlagshöhen. Unplausible Einzelfrachten und andere Fehlwerte wurden schließlich auf Basis der bereinigten Regressionen ersetzt. War dies wegen fehlender Korrelationspartner nicht möglich, wurde auf andere Zusammenhänge zurückgegriffen, wie z.B. Korrelationen mit der Niederschlagshöhe. Bei stärker jahreszeitlich beeinflussten Parametern wie Natrium, Chlorid (Streusalz), Kalium (Pollen) aber auch teilweise Ammonium (Düngung) konnten Fehlwerte oft passender durch die gleitenden Mittelwerte aus ihrem zeitlichen Umfeld ersetzt werden.

Die ermittelten Jahresfrachten sind in Abbildung 3.1-1 für die drei Messplots jeweils getrennt dargestellt. Jahresfrachten sind die Summen der Einzelfrachten

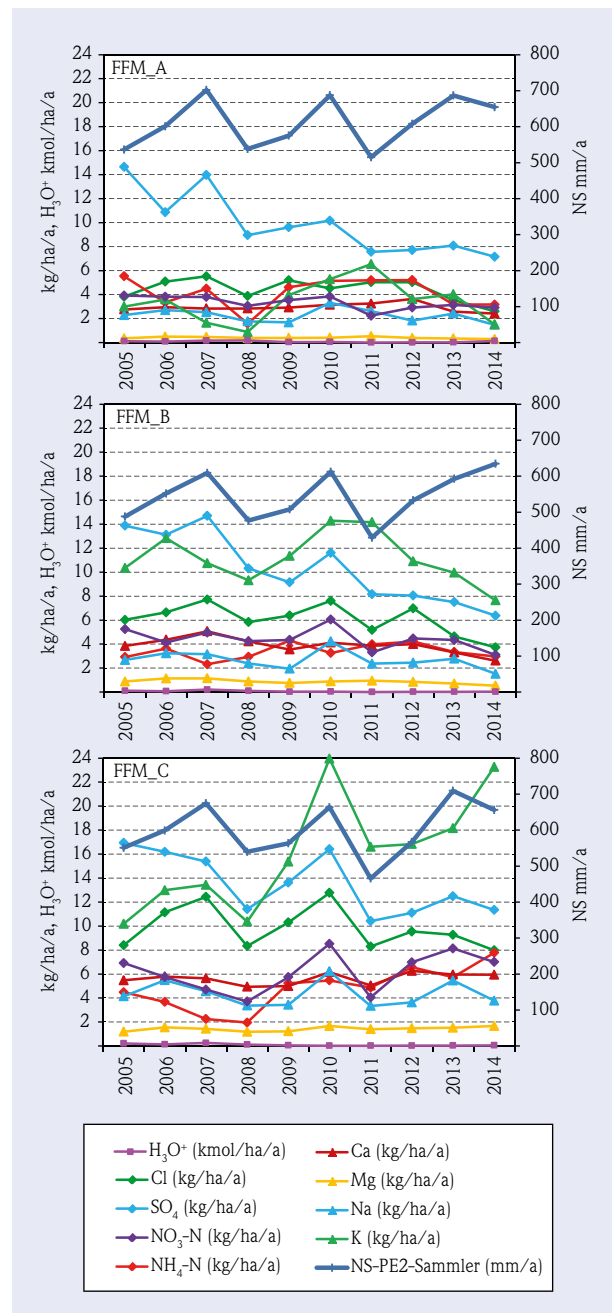


Abb. 3.1-1: Jahresdepositionen der Hauptelemente und Niederschlagshöhen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand).

eines jeweiligen Kalenderjahres. Die Berechnung wurde tagesscharf durchgeführt.

Tab. 3.1-1: Mittelwerte der mit PE2-Sammlern gemessenen Jahresniederschläge und Jahresdepositionen 2005 – 2014 der Hauptelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand) sowie Quotienten aus Bestands- zu Freilandwerten.

	NS PE2-Sammler	pH	H ₃ O ⁺	Cl	SO ₄	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Ca	Mg	Na	K
	mm/a	-	kmol/ha/a	kg/ha/a							
FFM-A (Freiland)	610	5,48	0,08	4,4	9,9	3,3	4,1	2,9	0,4	2,3	3,4
FFM-B (Bestand)	543	5,40	0,07	6,1	10,3	4,4	3,4	3,9	0,9	2,7	11,2
FFM-C (Bestand)	599	5,20	0,10	9,8	13,5	6,2	4,8	5,6	1,4	4,3	16,1
Quotient FFM_B/FFM_A	0,9		0,8	1,4	1,0	1,3	0,8	1,3	2,1	1,2	3,3
Quotient FFM_C/FFM_A	1,0		1,2	2,2	1,4	1,9	1,2	1,9	3,5	1,9	4,7

Ein deutlicher Trend zur Abnahme um ca. 50 % innerhalb von 10 Jahren lässt sich bei SO₄ beobachten und zwar einheitlich sowohl im Freiland als auch in den beiden Bestands-Messplots. Bei NO₃-N zeigt sich im Freiland eine deutliche, wenn auch geringe Abnahme, die bei den Bestands-Messplots in der größeren Wertestreuung verursacht durch Kronenraumprozesse untergeht. Bei allen anderen Parametern lässt sich kein Trend feststellen.

Betrachtet man die Höhe der Einträge, so hält die Intensiv-Messstelle Frankfurt ihre Position im unteren Wertebereich Südwest-Deutschlands (HLUG 2010), (Tab. 3.1-2). Gleichbleibende atmosphärische Einträge sind plausibel vor dem Hintergrund eines bundesweit niedrig konsolidierten Niveaus mit sehr gerin-

ger Tendenz zu weiterer Abnahme bei den Hauptelementen (Ihle 2001, UBA 2016). Die beobachtete weitere deutliche Reduktion bei SO₄ ist vor diesem Hintergrund beachtlich.

Tabelle 3.1-1 zeigt die Mittelwerte der Jahresdepositionen sowie die Verhältnisfaktoren zwischen Freiland- und jeweiliger Bestandesdeposition, aus denen sich Hinweise auf die wesentlichen Kronenraumprozesse Filterung (Interzeption) sowie Boden-Pflanze-Kreislauf und Aufnahme/Reaktion ableiten lassen. Dabei bestätigen sich die in HLUG (2010) festgestellten Verhältnisse.

So bleibt die Überschätzung der Einträge um ca. 10 % am Messplot FFM_C weiterhin bestehen, die

Tab. 3.1-2: 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	[H ₃ O ⁺]	NH ₄ -N	NO ₃ -N	SO ₄	Cl	Ca	K	Mg	Na
		mm/a	kmol/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

sich aus einer überproportionalen Positionierung der Sammler in Traufposition ergibt (Niederschlag PE2-Sammler FFM_C untypischerweise nahezu gleich Freiland FFM_A). Zieht man Natrium als Tracer heran, bei dem der Boden-Pflanze-Kreislauf gleich Null gesetzt werden kann, drückt sich im Verhältnisfaktor für Natrium nur noch die Interzeptionsleistung des Bestandes aus. Diese ist in FFM_C mit 1,9 (minus 10 %) gegenüber FFM_B mit 1,2 deutlich höher, was aufgrund der Bestandesstruktur zu erwarten ist, nicht aber aufgrund einer dominierenden Emission aus dem Startbahnbereich. Aufgrund der unterschiedlichen Bestandesstruktur mit unterschiedlichen Interzeptionsleistungen lässt sich bei den Hauptelementen nach wie vor keine Abhängigkeit der Einträge von der Entfernung zur Startbahn feststellen. Deutlich höhere Verhältnisfaktoren als bei Natrium, wie sie bei Magnesium und Kalium beobachtet werden, sind nicht durch Interzeption, sondern durch den Boden-Pflanze-Kreislauf verursacht, deutlich niedrigere wie bei H_3O^+ und NH_4-N durch Pufferung bzw. Aufnahme im Kronenraum.

Die Depositionsmessungen liefern bei den Hauptelementen demnach ein plausibles Ergebnis, das sich sehr gut in das Prozessverständnis einfügt und damit im Kapitel Stoffbilanzen weiter Verwendung finden kann.

3.2 Atmosphärische Deposition: Anorganische Spurenstoffe (Bergerhoff-Sammler)

Das Parameterspektrum der Bergerhoff-Messungen ergibt sich aus den Abbildungen 3.2-1 bis 3.2-3. Dargestellt sind die aus den jeweils 12-wöchigen Messintervallen tagesscharf berechneten Jahressummen bzw. Mittelwerte beim Variationskoeffizienten des Staubbiederschlags (Sammlung 4-wöchentlich bei 12-wöchentlicher Analytik).

Anhand der 10-jährigen Messreihe konnten die Daten auf Basis der Korrelationen mit den Staubeinträgen aber auch zwischen den Einträgen der drei einzelnen Messplots sowie saisonaler Zusammenhänge belastbar plausibilisiert werden. Details sind in den Datenlieferungen an das HLNUG dokumentiert. Die Beeinflussung durch den Nahbereich, gekennzeichnet durch die Variationskoeffizienten der 4-wöchentlichen Staubwerte der Einzelsammler (Abb. 3.2-3

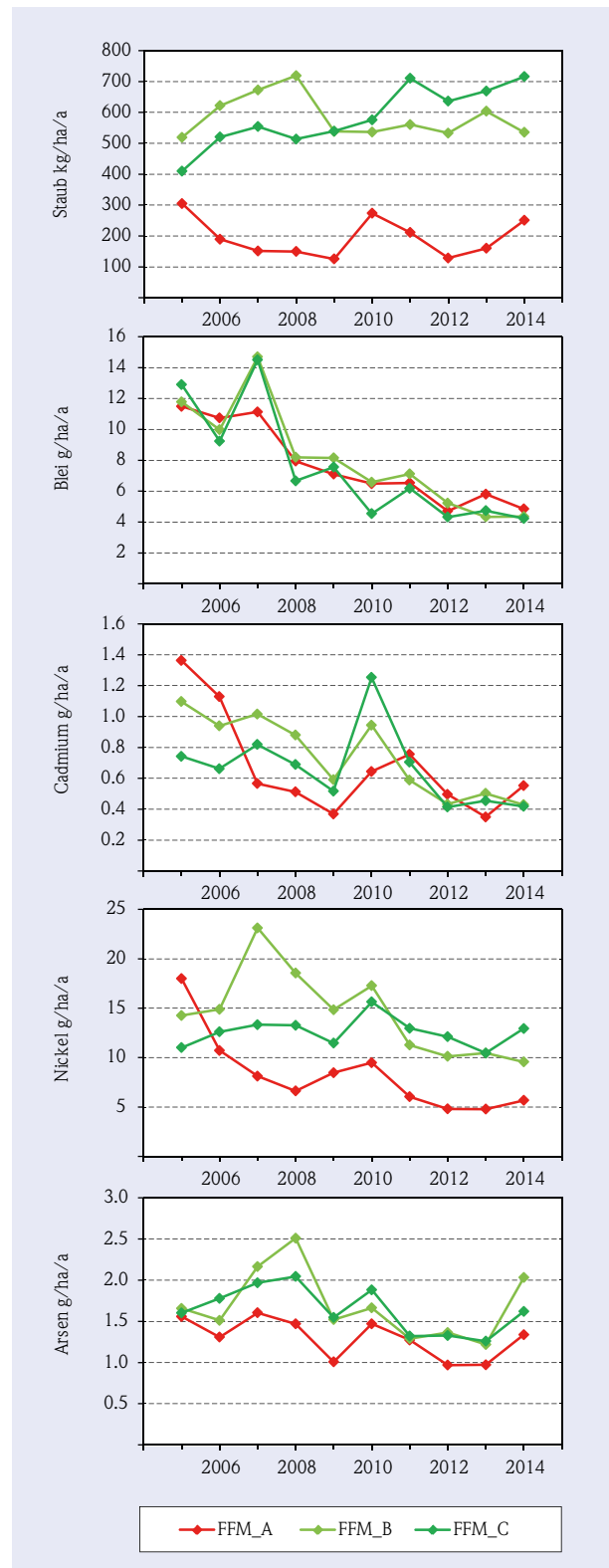


Abb. 3.2-1: Bergerhoff-Jahresdepositionen an Staub sowie verschiedener anorganischer Spurenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand).

Stoffdynamik Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

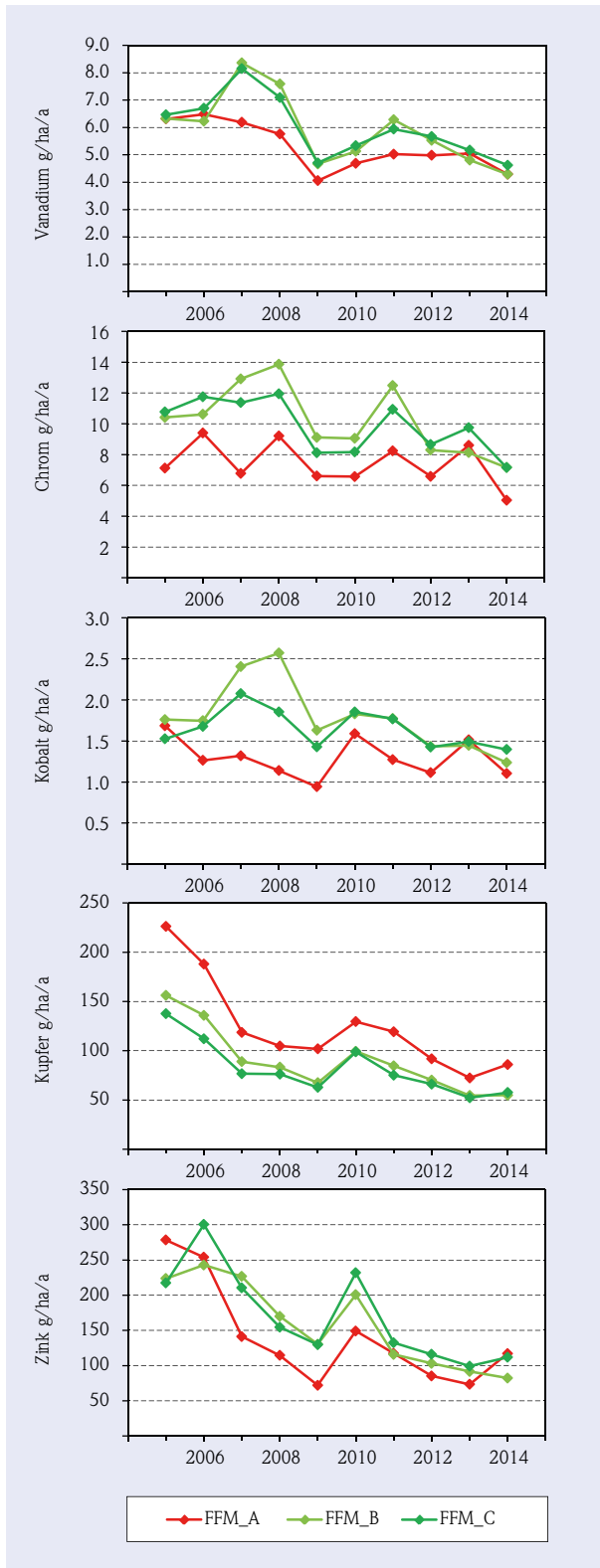


Abb. 3.2-2: Bergerhoff-Jahresdepositionen verschiedener anorganischer Spurenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand).

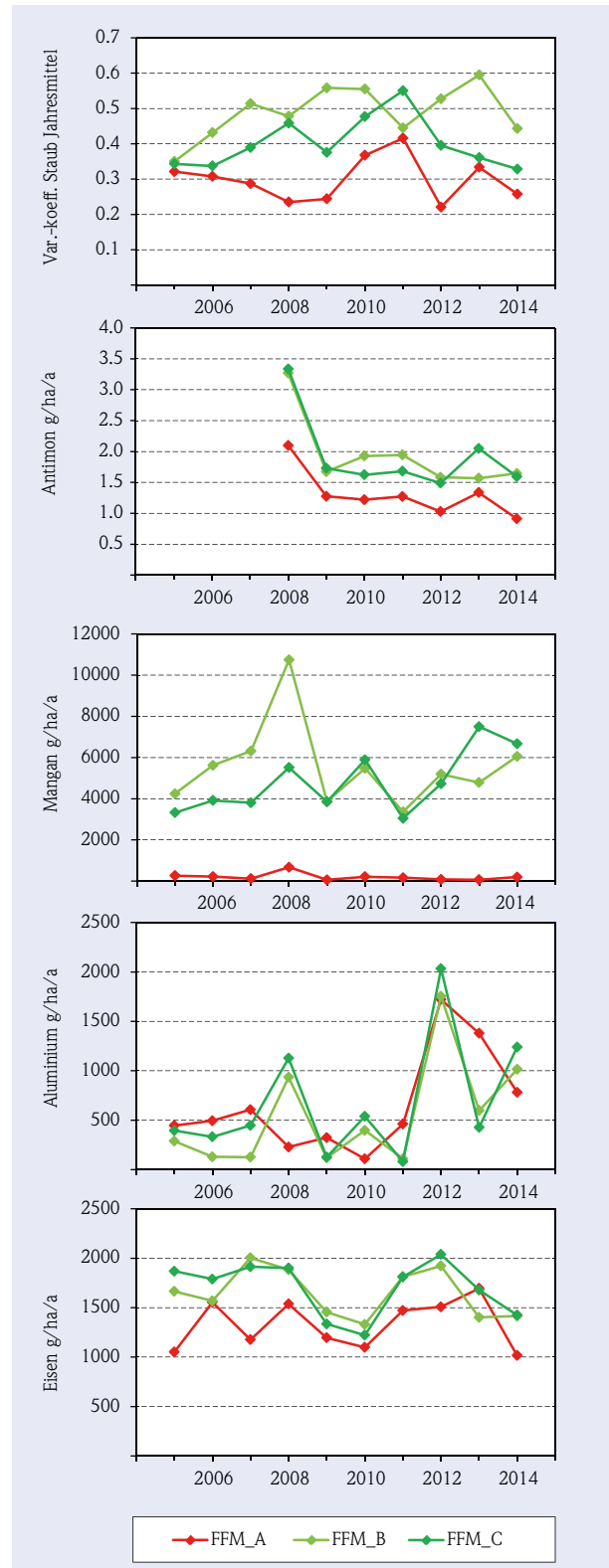


Abb. 3.2-3: Bergerhoff-Jahresdepositionen und Staub-Variationskoeffizient der 6 Einzelgefäße sowie Antimon, Mangan, Aluminium und Eisen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand).

oben) variiert, bleibt aber in der Tendenz über die vergangenen 10 Jahre unverändert.

Zeichnete sich ein abnehmender Trend bei fast allen Parametern schon in HLUG (2010) ab, so ist dieser anhand der längeren Zeitreihe nun meist deutlich. Ausnahmen bilden Mangan, Aluminium und Eisen. Die Staubeinträge blieben währenddessen auf gleichbleibendem Niveau, so dass tatsächlich die Staubkonzentrationen fielen. Hierin zeigt sich die Fortsetzung der Erfolge in der Luftreinhaltung, die insbesondere bei Blei, Cadmium, Kupfer und Zink ins Auge springen. Auch andere Messnetze berichten über entsprechende Abnahmen im Verlauf der vergangenen Dekade (z.B. HLUG 2005 b).

Generell liegen die Bestands-Depositionen über denen des Freilands, was durch Auskämmeffekte erklärbar ist. Bei Mangan kommen über den Boden-Pflanze-Kreislauf erhebliche Stoffmengen hinzu. Wie schon in HLUG (2010) berichtet, bildet Kupfer nach wie vor eine Ausnahme. Hier sind die Freiland-Einträge höher als die Bestands-Einträge, mit FFM_B leicht über FFM_C, was weiterhin für eine Quelle im Startbahnbereich spricht. Durch die deutliche Abnahme bei Kupfer haben sich diese Unterschiede im Untersuchungszeitraum absolut verringert, nicht aber relativ.

Neben den Gesamt-Staubeinträgen bleibt auch der jahreszeitliche Verlauf mit winterlichem Minimum und sommerlichem Maximum über die Jahre unverändert (Abbildung 3.2-4). Sommerliche Maxima lassen sich nicht durch korrespondierende Maxima bei anthropogenen Emissionen erklären. Hinzu treten regionale und überregionale Staubemissionen aus Böden (Landwirtschaft), technischen Oberflächen und Pflanzen (LUBW 2008). Zu beobachten ist, dass die Gehalte in diesen Emissionen abnehmen.

Aktuelle Vergleichswerte zur Beurteilung der Eintragungssituation an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen finden sich in LUBW (2008), die eine Einordnung der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen im unteren Wertebereich südwestdeutscher Ballungsräume erlauben (HLUG 2010). Auch an den Intensiv-Messstellen Baden-Württembergs lassen sich die gefundenen Abnahmen der Schwermetalleinträge nachweisen (LUBW, unveröffentlicht). Dadurch bleibt die getroffene Rangfolge im Großen und Ganzen bestehen, wenn auch auf merklich niedrige-

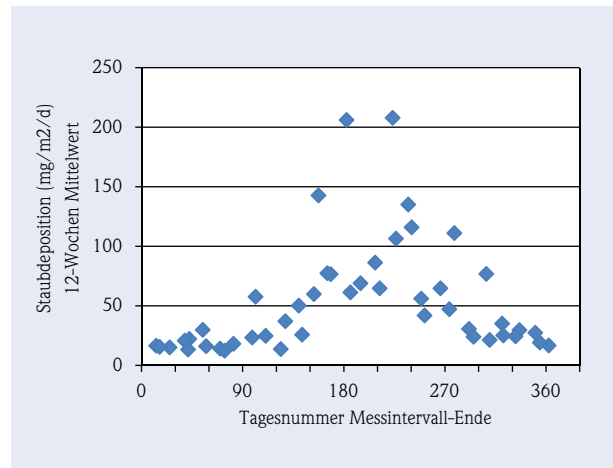


Abb. 3.2-4: Jahreszeitlicher Verlauf der Staubdepositionen (12-Wochen-Mittelwerte 10_2004 - 12_2014) an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A (Freiland).

Tab. 3.2-1: Vergleich der Bergerhoff-Depositionen ausgewählter Parameter an FFM_A mit der Intensiv-Messstelle Bruchsal-Forst in 15 - 20 m Abstand zur Bundesautobahn A5 (LUBW 2008).

Parameter	Bruchsal/Forst (2003 - 2007)	FFM_A (2004 - 2009)	MW FFM_A (2005 - 2014)
Staub (kg/ha/a)	191 - 307	125 - 305	195
As (g/ha/a)	2,0 - 2,8	1,0 - 2,8	1,30
Cd (g/ha/a)	0,4 - 0,8	0,4 - 1,4	0,67
Cr (g/ha/a)	31 - 40	7 - 19	7,4
Cu (g/ha/a)	92 - 173	102 - 227	124
Pb (g/ha/a)	26 - 35	7 - 15	7,7
Sb (g/ha/a)	12,2 - 16,0	1,3 - 4,6	1,31
Zn (g/ha/a)	337 - 523	72 - 291	140

Tab. 3.2-2: 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

rem Niveau. Für Eisen und Aluminium stehen nach wie vor keine Vergleichswerte zur Verfügung. Antimon weist weiterhin nicht auf einen maßgeblichen Straßenverkehrseinfluss hin (Tabelle 3.2-1). Obwohl der Kupfereintrag deutlich abgenommen hat, bleibt er vergleichsweise hoch. Lag er 2005 noch über den Werten, die im Nahbereich einer viel befahrenen Autobahn gemessen werden, so unterschreitet er diese inzwischen leicht, da die Autobahnwerte langsamer fallen (LUBW, unveröffentlicht). Die Argumente für eine Kupferemission direkt aus dem Bereich der Startbahn wurden oben schon genannt. Bezüglich der Treibstoffe als wahrscheinlichste Hauptquelle wird auf HLOG (2010) verwiesen: Da es sich um eine Start- und keine Landebahn handelt, scheidet Bremsabrieb als typische Emissionsquelle für Kupfer aus. Bezüglich einer Bewertung wird auf die Bilanz in Kapitel 5.4 verwiesen (vgl. auch Tabelle 3.2-2).

In Tabelle 3.2-3 sind die Mittelwerte der Bergerhoff-Depositionen über den Zeitraum 2005 bis 2014 dargestellt. Diese werden später für die Stoffbilanzen verwendet, wobei die zeitliche Dimension wegen des Trends zur Abnahme im Blick behalten werden muss.

Tab. 3.2-3: Mittelwerte der Bergerhoff-Jahresdepositionen 2005 - 2014 an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand).

	FFM_A	FFM_B	FFM_C
Staub (kg/ha/a)	195	584	585
Staub_VarK (-)	0,30	0,49	0,40
Pb (g/ha/a)	7,7	8,0	7,5
Cd (g/ha/a)	0,67	0,74	0,67
Ni (g/ha/a)	8,3	14,4	12,6
As (g/ha/a)	1,30	1,69	1,63
V (g/ha/a)	5,3	5,9	6,0
Cr (g/ha/a)	7,4	10,2	9,9
Co (g/ha/a)	1,3	1,8	1,6
Cu (g/ha/a)	124	90	82
Zn (g/ha/a)	140	159	170
Sb (g/ha/a)	1,31	1,94	1,93
Mn (g/ha/a)	207	5566	4824
Al (g/ha/a)	655	547	675
Fe (g/ha/a)	1331	1646	1698

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

Die Messungen der PAK-Depositionen werden mit Trichter-Adsorber-Sammlern nach DIN 19739 mit 12-wöchentlichem Sammelintervall durchgeführt. Im Zuge des Novellierungsverfahrens erfolgte auch eine Umorganisation, so dass das Verfahren künftig innerhalb der Richtlinienreihe „Messung atmosphärischer Depositionen“ VDI 4320, Blatt 4 dokumentiert sein wird.

Fehlwerte in den Zeitreihen sind selten und meist durch Frostbruch, aber auch durch Vogel-Verunreinigung verursacht. Sie konnten meist durch Werte des Parallelsammlers ersetzt werden, in wenigen Fällen musste gemäß jahreszeitlichem Verlauf interpoliert werden.

Wie schon in HLOG (2010) berichtet, ergaben sich höhere Blindwerte nach wie vor häufig bei Naphthalin, aber auch bei den weiteren leichter flüchtigen Kongeneren bis zum Fluoren. Trotz grundsätzlichem Abzug der Blindwerte vom Messwert bleiben die Einschränkungen bei der Quantifizierung dieser vier leichter flüchtigen Kongenere bestehen. Allerdings ist es ohnehin schwierig, von den Messungen mit einem Konventionsverfahren auf die tatsächlichen Einträge in Böden zu schließen (VDI 4320, Blatt 1). Mit zunehmendem Dampfdruck der Kongenere wird dies zunehmend unsicher, da die Affinität zur Gasphase wächst und die zur Oberflächenbindung abnimmt. Diese Frage wird im Bilanzkapitel noch näher beleuchtet.

Der typische jahreszeitliche Verlauf der PAK-Depositionen, wie er sich an allen drei Messplots beobachten lässt, ist exemplarisch für FFM_A, Sammler 1 in Abbildung 3.3-1 für die Summe 12 PAK dargestellt. Die Grafik wirkt phasenverschoben gegenüber der bei den Staubdepositionen. Während sich die winterlichen Maxima je nach Heizbedarf des jeweiligen Winters unterscheiden, stellen sich die sommerlichen Minima jeweils immer wieder in einem ähnlich geringen Wertebereich ein. Nach wie vor unklar ist der Beitrag zu diesem Verlauf durch verstärkt im Sommer stattfindenden photokatalytischen Abbau in der Atmosphäre. Dass hier zusätzlich weitere Einflussfaktoren eine Rolle spielen, wie beispielsweise Verbesserungen bei Energieeffizienz und Verbrennungstechnik, Heiz-

verhalten oder wetterbedingte Immissionsverhältnisse, wurde schon in HLUK (2010) begründet.

Die Verteilung der über die gesamte Zeitreihe gemessenen Kongeneren-Profile zeigt Abbildung 3.3-2. Es zeigen sich geringfügige Unterschiede zwischen Freiland und Bestand, die auf geringe Fraktionierungseffekte bei der Interaktion mit dem Kronenraum hindeuten, aber nicht maßgeblich sind. Ebenfalls geringe, nicht signifikante Unterschiede der Kongeneren-Profile sind im jahreszeitlichen Verlauf festzustellen (nicht dargestellt). Das Kongeneren-Profil entspricht gleichbleibend insgesamt am ehesten dem, wie es in einem urbanen Gebiet ubiquitär zu erwarten ist, ohne spezielle Signaturen, die auf einen dominierenden Einfluss von Verkehr oder Hausbrand hindeuten würden. Der Frage der Eintragsrelevanz wird später durch einen Abgleich mit den Kongeneren-Profilen der Böden noch nachgegangen.

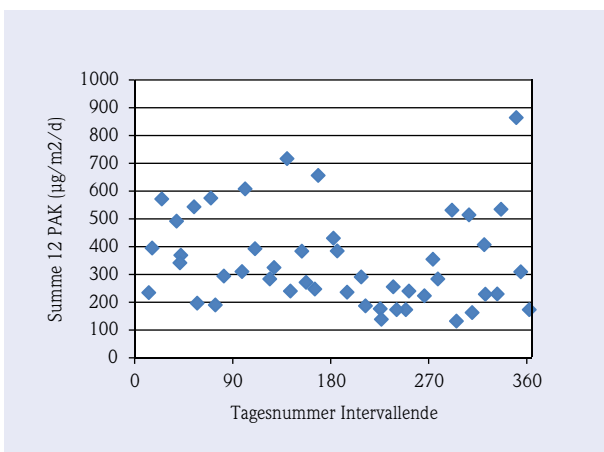


Abb. 3.3-1: Jahreszeitlicher Verlauf der Summe 12 PAK-Depositionen (12-Wochen-Sammelintervall = ca. 90 Tage) an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Beispiel Messplot FFM_A (Freiland), Sammler Nr. 1 Zeitreihe 2005 - 2014.

Tab. 3.3-1: Die EPA-PAK und ausgewählte Eigenschaften.

Summen-Nr.	Substanz	Summenformel	Molmasse g/mol	Dampfdruck [kPa] bei 25°C
16	Naphthalin	(C ₁₀ H ₈)	128	1,1 x 10 ⁻²
15	Acenaphthylen	(C ₁₂ H ₈)	152	3,9 x 10 ⁻³
14	Acenaphthen	(C ₁₂ H ₁₀)	154	2,1 x 10 ⁻³
13	Fluoren	(C ₁₃ H ₁₀)	166	8,7 x 10 ⁻⁵
12	Phenanthren	(C ₁₄ H ₁₀)	178	2,3 x 10 ⁻⁵
11	Anthracen	(C ₁₄ H ₁₀)	178	3,6 x 10 ⁻⁶
10	Fluoranthren	(C ₁₆ H ₁₀)	202	6,5 x 10 ⁻⁷
9	Pyren	(C ₁₆ H ₁₀)	202	3,1 x 10 ⁻⁶
8	Benz(a)anthracen	(C ₁₈ H ₁₂)	228	1,5 x 10 ⁻⁸
7	Chrysen	(C ₁₈ H ₁₂)	228	5,7 x 10 ⁻¹⁰
6	Benzo(b)fluoranthren	(C ₂₀ H ₁₂)	252	6,7 x 10 ⁻⁸
5	Benzo(k)fluoranthren	(C ₂₀ H ₁₂)	252	2,1 x 10 ⁻⁸
4	Benz(a)pyren	(C ₂₀ H ₁₂)	252	7,3 x 10 ⁻¹⁰
3	Dibenz(a,h)anthracen	(C ₂₂ H ₁₄)	278	1,3 x 10 ⁻¹¹
2	Indeno(1,2,3-cd)pyren	(C ₂₂ H ₁₂)	276	ca. 10 ⁻¹¹
1	Benzo(g,h,i)perylen	(C ₂₂ H ₁₂)	276	1,3 x 10 ⁻¹¹

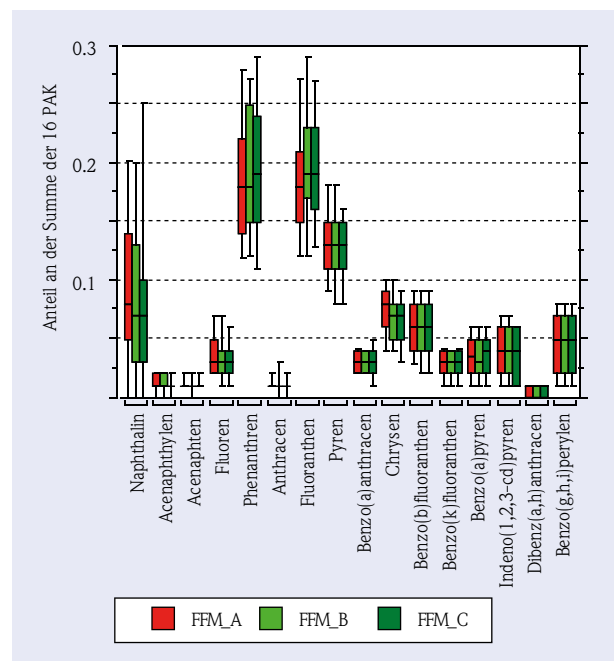


Abb. 3.3-2: Kongeneren-Profil der PAK-Depositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A (Freiland) sowie FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand), Daten 2005 - 2014.

Die sich ergebenden absoluten PAK-Einträge sind in Form der tagesscharf berechneten Jahressummen der 12-wöchigen Einzelintervalle in Abbildung 3.3-3 dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich die PAK-Einträge binnen der letzten Dekade innerhalb eines gleichbleibenden Wertebereichs bewegen. Es gibt keinen Trend zur Zu- oder Abnahme, wobei das Auf und Ab im Laufe der Zeitreihe im Wesentlichen mit den jeweils herrschenden Temperaturen während der Heizperiode zusammenhängt (HLUG 2010). Die Bestandeseinträge bleiben interzeptionsbedingt unter den Einträgen im Freiland, wobei nach wie vor keine Abhängigkeit vom Abstand zur Startbahn West zu erkennen ist.

Bei den Blindwerten ist eine kontinuierliche Abnahme aufgrund von Verfahrensverbesserungen zu verzeichnen. Da diese von den zugehörigen Jahres-

Tab. 3.3-2: Mittelwerte der PAK-Jahres-Depositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A (Freiland) sowie FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand), Daten jeweils Mittelwerte der Sammler 1 und 2, 2004 - 2014.

Parameter	FFM_A	FFM_B	FFM_C
	g/ha/a		
Naphthalin	0.192	0.125	0.132
Acenaphthylen	0.022	0.013	0.015
Acenaphthen	0.017	0.013	0.013
Fluoren	0.062	0.041	0.039
Phenanthren	0.272	0.240	0.229
Anthracen	0.016	0.011	0.013
Fluoranthen	0.266	0.204	0.214
Pyren	0.187	0.136	0.142
Benz(a)anthracen	0.050	0.036	0.038
Chrysen	0.114	0.078	0.083
Benzo(b)fluoranthen	0.098	0.067	0.072
Benzo(k)fluoranthen	0.047	0.032	0.034
Benz(a)pyren	0.056	0.040	0.043
Dibenz(a,h)anthracen	0.010	0.007	0.007
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0.062	0.044	0.045
Benzo(g,h,i)perylen	0.073	0.051	0.053
16_PAK	1.53	1.13	1.17
12_PAK	1.25	0.94	0.97
08_PAK	0.51	0.35	0.38
04_PAK	0.20	0.14	0.15

Depositionen abgezogen wurden, haben sie keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der gemessenen Depositionen.

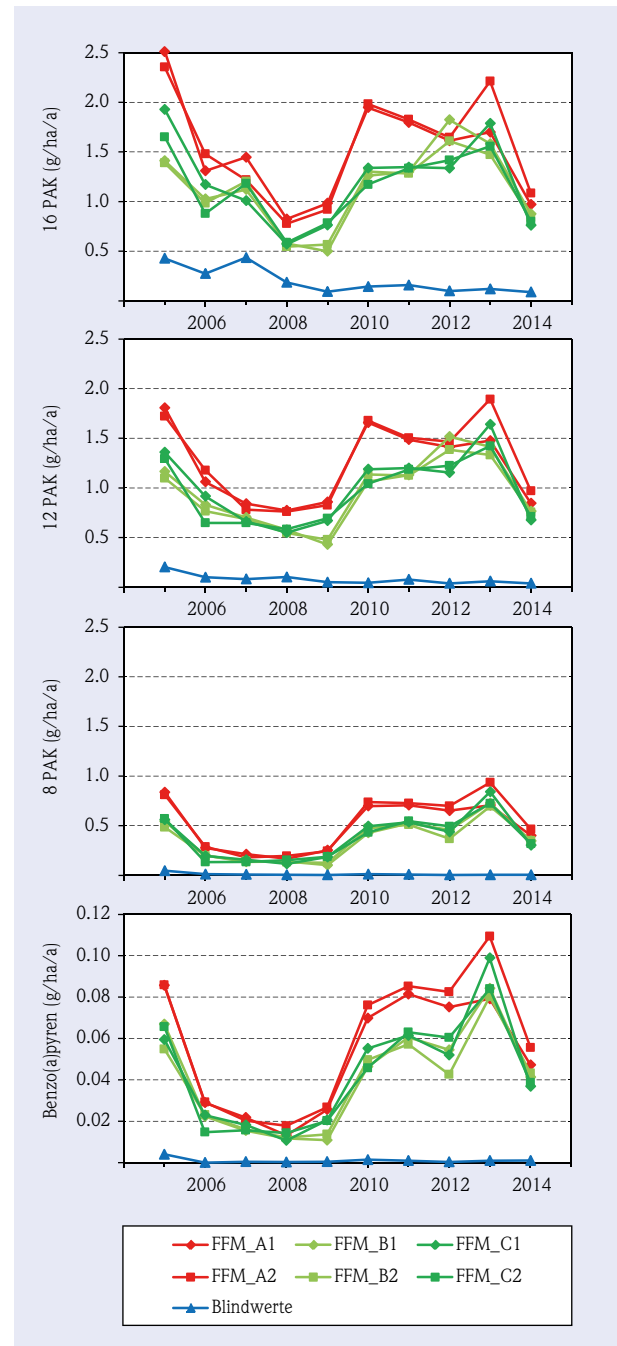


Abb. 3.3-3: Tagesscharfe Jahressummen der PAK-Depositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen am Messplot FFM_A, FFM_B und FFM_C jeweils für den Sammler Nr. 1 und Nr. 2 sowie Blindwerte 2005 - 2014.

Vergleichsdaten zu PAK-Depositionen sind in LUBW (2008) veröffentlicht. Demnach behauptet die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit 12 PAK-Depositionen zwischen 2,0 und 0,8 g/ha/a ihre Position im unteren Wertebereich, vergleichbar etwa mit dem, was im Umfeld eines Ballungsraums wie Stuttgart oder Mannheim/Heidelberg gegenwärtig zu erwarten ist. Die Dekadenmittelwerte der Periode 2005 - 2014 sind in Tabelle 3.2-2 dargestellt. Im Rahmen der Novellierung des Trichter-Adsorber-Verfahrens wurden auch Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Sammelintervallen durchgeführt. Bei einem 12-wöchentlichen Sammelintervall, wie es hier zum Einsatz kommt, wurde eine Wiederfindung von ca. 80 % gegenüber der Summe aus drei 4-wöchentlichen Sammelintervallen festgestellt. Entsprechende Minderbefunde sind bei den Stoffbilanzen zu berücksichtigen, auf die hier betrachtete relative Bewertung der Eintragungssituation auf Basis eines identischen Verfahrens haben sie jedoch keinen Einfluss.

3.4 Streufallfrachten

Streusammler sind seit Anfang Januar 2010 in beiden Bestandesmessplots in 4 Parallelen installiert, so dass inzwischen eine fünfjährige Zeitreihe vorliegt. Das Spektrum der im Streufall untersuchten Parameter ist größer als bei den anderen Stoffflüssen. Zusätzlich werden Gesamt-C, -N und -S, Hg, eine Vielzahl von Chlorpestiziden (siehe Anhang Tabelle A-6) sowie PCB untersucht. Tabelle 3.4-1 zeigt die Mittelwerte 2010 - 2014 der Parameter, bei denen mehrere Werte oberhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (BG) gemessen wurden und für die deshalb eine Quantifizierung und Darstellung sinnvoll ist. Gerade die Chlorpestizide lagen überwiegend unterhalb der BG. Bestandesmessplot FFM_C weist bei nahezu allen Parametern die höheren Einträge auf, wobei die Unterschiede nicht groß sind. Eher ist die gute Übereinstimmung ein Hinweis auf die Robustheit der Messungen.

Abbildung 3.4-2 zeigt eine Auswahl an Parametern, bei denen robuste Trends zu erkennen sind, die sich gegenüber der starken zeitlichen Variabilität behaupten. Als Bezugsgröße ist auch die Streufallmenge dargestellt, die gleichbleibend bis leicht ansteigend verläuft. Der allgemeinen abnehmenden Tendenz in der atmosphärischen Deposition folgend, nehmen Cd,

Cu und Pb auch im Streufall ab. Ähnlich verhalten sich auch die Nährelemente (nicht dargestellt). Bei PAK ergeben sich Streufalleinträge etwa in Höhe der Freiland- und Bestandsdepositionen, allerdings stehen die jeweiligen zeitlichen Verläufe kaum in Zusammenhang (vergl. Abb. 3.3-3). Die Ursache liegt vermutlich am Probennahmetermin der Streu, mitten in der Hauptdepositionszeit der PAK, sowie in einer Zwischenspeicherung im Kronenraum zumindest bei der Kiefer, deren Nadelalter bis 7 Jahre beträgt. Bei 6 PCB sind die Streueinträge ziemlich gleichbleibend. Bei PAK und 6 PCB sind die Unterschiede zwischen den Min- und Max-Werten gering, so dass hier nur ein geringer Einfluss durch Analysenwerte kleiner als die (variierende) BG besteht und die jeweiligen Mittelwerte für die Bilanzen verwendet werden können.

Betrachtet man das PAK-Kongenerenprofil im Streufall in Abbildung 3.4-1, fallen deutliche Verschiebungen gegenüber dem Profil in der atmosphärischen Deposition auf (Abb. 3.3-2). So dominieren im Streufall Naphthalin und Phenanthren auf Kosten der schwerer flüchtigen Kongenere ab Pyren. Es erscheint zunächst unplausibel, dass sich im Streufall die leichter flüchtigen PAK gegenüber den schwerer flüchtigen

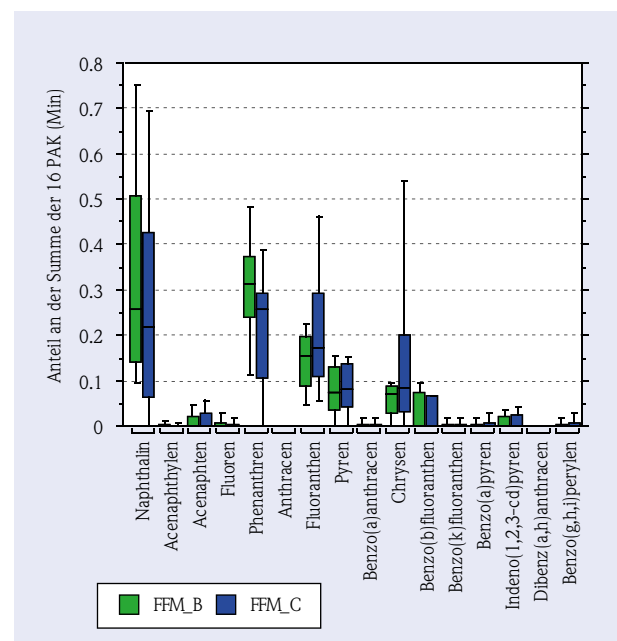


Abb. 3.4-1: PAK-Kongeneren-Profil im Streufall der beiden Bestandesmessplots FFM_B und FFM_C der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen (Daten 2010 - 2014, jeweils n = 5).

Tab. 3.4-1: Mittelwerte 2010 - 2014 der jährlichen Streufallmengen und Streufallfrachten an den beiden Bestandesmessplots FFM_B und FFM_C der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für Parameter mit mehreren Werten > BG (Min-Werte: < BG = 0, Max-Werte: < BG = BG bzw. alle > BG).

	FFM_B Min	FFM_B Max	FFM_C Min	FFM_C Max
	kg/m ²			
Streufallmenge (Trockensubstanz bei 105°C)		0,32		0,38
	kg/ha/a			
C _{org}		1696		2033
N _{org}		36		45
P _{org}		1,3		1,6
S _{org}		2,6		2,7
Ca		19,1		18,2
K		4,8		4,4
Mg		1,9		2,2
	g/ha/a			
As	0,0	10,9	0,0	12,9
Cd	0,77	0,96	0,91	1,12
Cr		15,2		17,9
Co		1,4		1,6
Cu		47		61
Mn		10394		9174
Fe		813		1134
Hg	0,06	0,17	0,05	0,20
Ni		12,4		15,1
Pb		6,1		8,4
Sb	0,0	1,7	1,9	3,4
Zn		148,4		199,2
	mg/ha/a			
Benzo(a)pyren	5	19	10	25
Biphenyl	20	27	21	31
HCB	3	5	5	6
HCH-gamma			1	5
Trichlorbenzol 1,2,4	5	8	6	9
6 PCB	65	73	81	88
	g/ha/a			
16 PAK	0,732	0,892	0,810	0,997
12 PAK	0,532	0,645	0,617	0,746
8 PAK	0,108	0,199	0,147	0,247
4 PAK	0,019	0,075	0,033	0,092

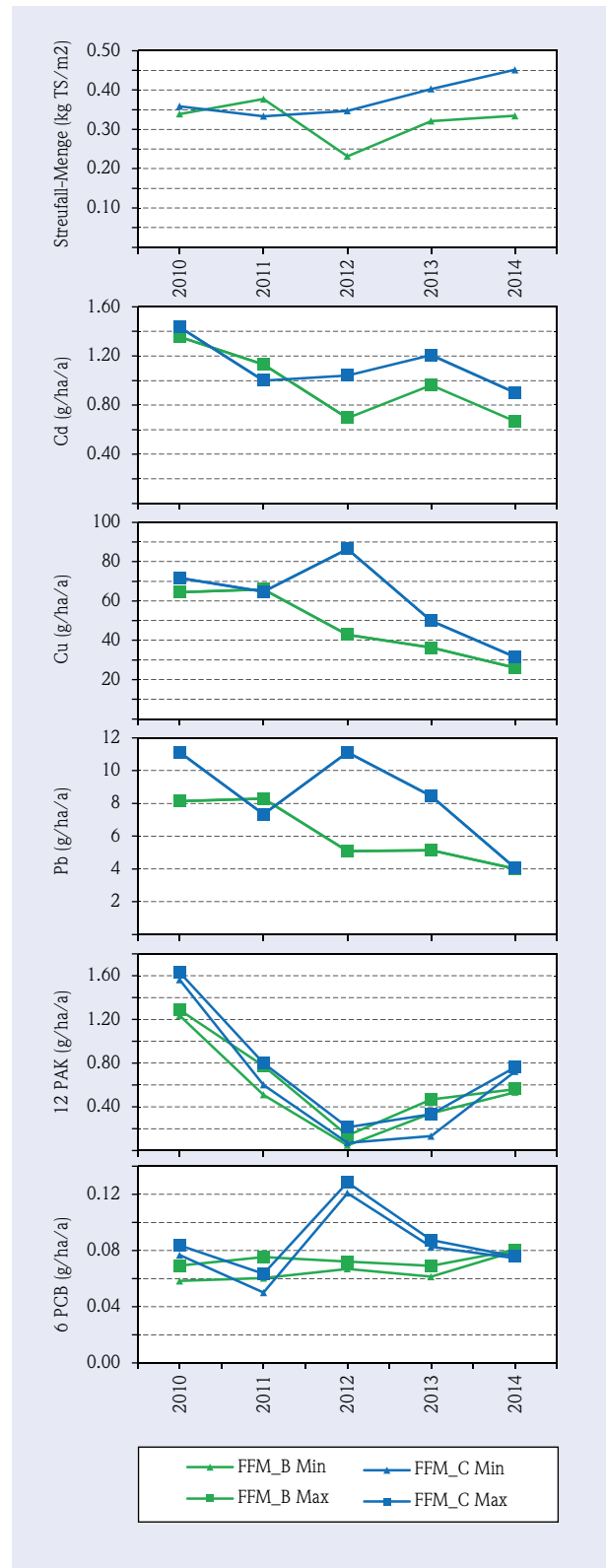


Abb. 3.4-2: Jährliche Streufallmengen und Streufallfrachten 2010 - 2014 an den beiden Bestandesmessplots FFM_B und FFM_C der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für Parameter mit mehreren Werten > BG (Min-Werte: < BG = 0, Max-Werte: < BG = BG bzw. alle > BG).

anreichern sollten, man würde eher einen umgekehrten Effekt vermuten. Ob es sich hierbei nun um eine tatsächliche Fraktionierung der PAK im Streufall handelt, deren Mechanismus noch unklar ist, oder um eine Fraktionierung durch die Analytik in einer problematischen Probenmatrix (vermutlich Extraktion), kann auf Basis der vorliegenden Daten nicht abschließend entschieden werden und sollte bei der weiteren Verwendung der Ergebnisse im Blick behalten werden.

Vergleichswerte für Spurenstoffe im Streufall finden sich in der Literatur nach wie vor selten. An wenigen Standorten kann aber als grobe Faustregel abgeleitet werden, dass die Streufrachten ähnlich hoch liegen, wie ihre zugehörigen Bestandesdepositionen (LUBW 2008). Dies würde sich hier grob bestätigen. Da eine eingehendere Diskussion der Streufrachten nur im Rahmen der Bilanzen sinnvoll ist, wird auf das entsprechende Kapitel verwiesen.

3.5 Wasserhaushaltsmodellierung und Sickerraten

Sickerfrachten werden als Produkt aus gemessener Bodenwasserkonzentration und korrespondierender Sickerrate berechnet. Da Sickerraten bislang nicht direkt gemessen werden können, müssen sie mit einem Wasserhaushaltsmodell berechnet werden.

Die Simulationsperiode 2004 - 2014 wurde mit dem Simulationsprogramm BROOK90 (BROOK90 2015) berechnet. Aus Kompatibilitätsgründen konnte das in HLUG (2010) verwendete WHNSIM (Huwe 1992) nicht weitergeführt werden. BROOK90 ist für den forstlichen Bereich konzipiert und durch eine Vielzahl von Anwendungen validiert. Es rechnet tagesbasiert, eindimensional ohne Hysterese sowie deterministisch nach den bodenphysikalischen Fließgleichungen. Makroporenfluss kann berücksichtigt werden, wurde vorliegend aber mangels Kalibrierdaten ausgeschaltet. Die Unterschiede zum bisherigen Modell: BROOK90 beinhaltet ein eigenes Interzeptionsmodell, das durch einen atmosphärischen Verdunstungsantrieb und boden-/pflanzenabhängige Widerstände sowie einen

Tab. 3.5-1: Modellarchitektur BROOK90_FFM mit einigen wesentlichen Parametrisierungen (Stand 11/2015). Hervorgehoben die Positionen der FDR-Sonden bzw. Tensiometer und der Einbautiefen der Saugsonden.

Layer	obere Grenze	Modell Mitte	reale Mitte	untere Grenze	reale untere Grenze	Dicke [mm]	Horizont	kf [mm/d]	Skelett [%]	Wurzeln
1	0	2,5	-12,5	5	-10	50	1	500	0	0
2	5	7,5	-7,5	10	-5	50	1	80	0	1
3	10	12,5	-2,5	15	0	50	1	50	0	1
4	15	17,5	2,5	20	5	50	2	1	1	1
5	20	22,5	7,5	25	10	50	2	1	1	1
6	25	30	15	35	20	100	2	1	1	1
7	35	40	25	45	30	100	2	1	1	1
8	45	50	35	55	40	100	3	1	1	0,7
9	55	60	45	65	50	100	4	1	1	0,6
10	65	70	55	75	60	100	4	1	1	0,5
11	75	77,5	62,5	80	65	50	5	1	1	0,4
12	80	85	70	90	75	100	5	0,8	2	0,3
13	90	92,5	77,5	95	80	50	5	0,8	2	0,2
14	95	97,5	82,5	100	85	50	5	0,8	2	0,2
15	100	105	90	110	95	100	6	0,8	2	0,2
16	110	117,5	102,5	125	110	150	6	0,8	2	0,1
17	125	132,5	117,5	140	125	150	6	0,8	2	0,05
18	140	147,5	132,5	155	140	150	6	0,7	3	0
19	155	165	150	175	160	200	7	0,5	3	0

vom Blattflächenindex (BFI) bestimmten Speicher gesteuert wird. Bei den bodenphysikalischen Beziehungen zwischen Wassergehalt, Saugspannung und ungesättigter Wasserleitfähigkeit gibt es keinen Restwassergehalt. Dies bewirkt keinen signifikanten Unterschied bei der Zielgröße, den Sickeraten, da diese im Wesentlichen weit oberhalb eines Restwassergehalts entstehen. Die untere Randbedingung in BROOK90 ist durch das Gravitationspotenzial definiert. Das neu kalibrierte Modell BROOK90_FFM ist in Tabelle 3.5-1 in den wesentlichen Aspekten dokumentiert.

Klimadaten wurden von der DWD-Messstation Frankfurt Flughafen übernommen, die Globalstrahlung von nächstgelegenen Messstellen des DWD sowie des HLNUG. DWD-Flughafen-Frankfurt lag bis 21.10.2014 ca. 5 km nordöstlich, nach Umzug nur noch ca. 2 km nördlich der Intensiv-Messstelle. Trotz den vergleichsweise geringen räumlichen Distanzen, mussten hierbei Datenanpassungen beim Parameter Niederschlag vorgenommen werden. Dies deshalb, weil bei den 4-wöchentlichen Niederschlagssummen zwischen DWD und den PE2-Sammlern an FFM_A (Freiland) deutliche Unterschiede auftraten, die aus der räumlichen Heterogenität der Niederschlagsverteilung auf der Skala von wenigen km zu erklären sind. Diese gleichen sich langfristig zu fast 100 % aus, so dass Sammlerartefakte ausgeschlossen werden können (Gesamt-Summe PE2-Sammler = 6610 mm, DWD = 6612 mm). Ergänzend wurden erstmals auch

quantitative stündliche Radardaten des Niederschlags auf einem 1-km-Raster (RADOLAN 2015) einbezogen. Die Zeitreihe für FFM_A wurde dabei so aufgebaut, dass in einem 4-wöchentlichen Sammelintervall jeweils die Tagessummen von DWD oder RADOLAN übernommen wurden, die die besten Übereinstimmungen mit den gemessenen PE2-Sammlerwerten erzielten (Abbildung 3.5-1). RADOLAN-Daten stehen ab Mitte 2010 zur Verfügung. Die in Abbildung 3.5-1 dargestellten Unsicherheiten beim Parameter Freilandniederschlag auf Zeitskala eines Probennahmeintervalls sind bei der weiteren Beurteilung der Modellergebnisse zu berücksichtigen. Eine Verbesserung wäre nur durch eigene Niederschlagsmessungen vor Ort erzielbar.

Mit der gegebenen Niederschlagszeitreihe wurde das Interzeptionsmodell von BROOK90_FFM kalibriert. Mit einem BFI von 1,5 bis 3 (Blattaustrieb 15.04. bis 15.05., Laubfall 15.10. bis 15.11. eines Jahres) ergaben sich gute Anpassungen (Abbildung 3.5-2).

Die weiteren Boden- und Pflanzen-Parameter wurden anhand der gemessenen Wassergehalte kalibriert, da diese im Vergleich zu den gemessenen Saugspannungen deutlich robustere Zeitreihen aufweisen. Die erzielten Anpassungen sind exemplarisch in Abbildung 3.5-3 für die Tiefe 15 cm dargestellt. Der Schwerpunkt wurde auf eine gute Übereinstimmung bei hohen Wassergehalten gelegt, weil unter feuchten

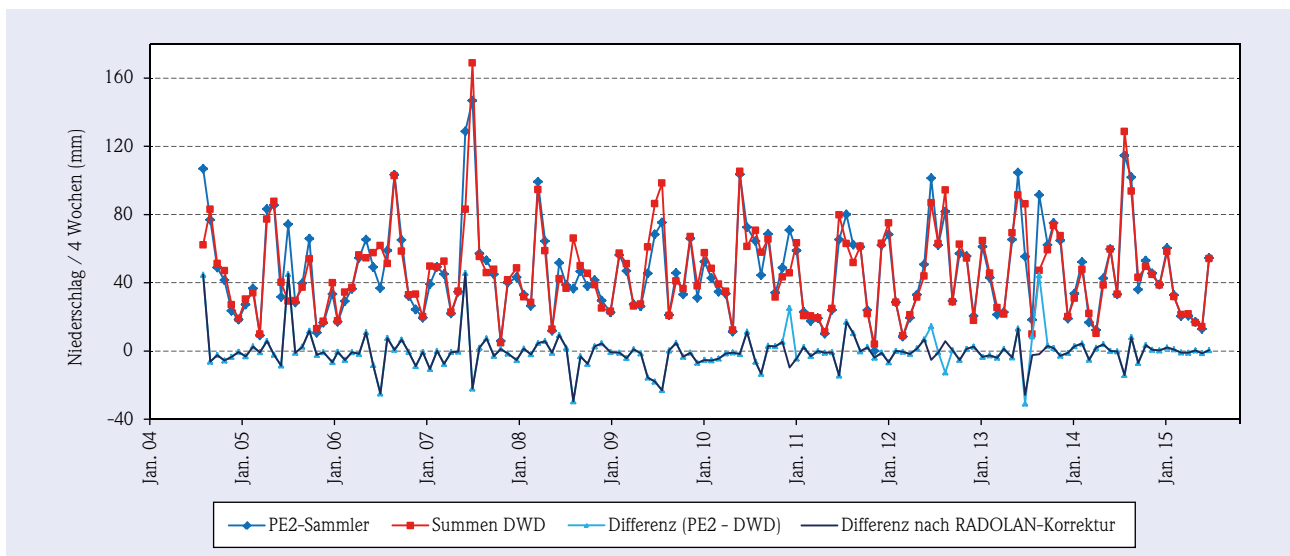


Abb. 3.5-1: Vergleich der 4-wöchentlichen Niederschlagssummen pro Probennahmeintervall zwischen PE2-Sammlern und DWD-Niederschlagsdaten 2004 - 2015. Gesamt-Niederschlagshöhe im Zeitraum: PE2-Sammler = 6610 mm, DWD = 6612 mm.

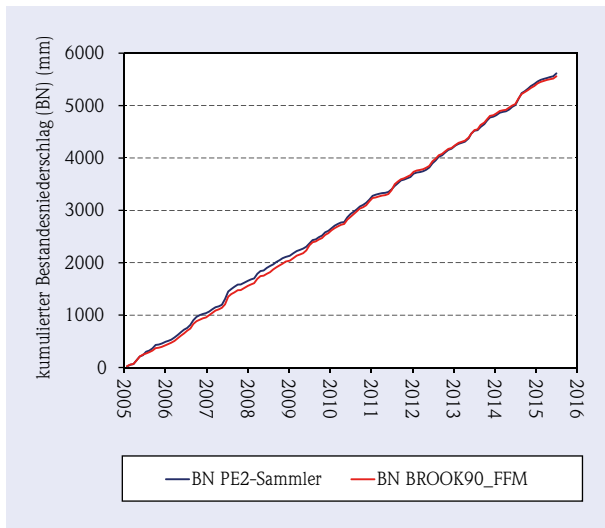


Abb. 3.5-2: Vergleich der mit PE2-Sammlern gemessenen mit der mit dem Interzeptionsmodell BROOK90_FFM berechneten Bestandsniederschlagshöhe.

Verhältnissen die maßgebliche Sickerung stattfindet. Im Trockenem rechnet BROOK90_FFM zu trocken, was am unberücksichtigten Restwassergehalt liegen kann. Dies ist aber wegen vernachlässigbarem Einfluss auf die Sickerraten ohne Belang. Ansonsten zeigt sich eine Glättung im Modell gegenüber der Realität, wie sie für tagesbasierte Modelle typisch ist, die nur einen homogenen Matrixfluss berücksichtigen.

Zur weiteren Plausibilisierung wurde die mit BROOK90_FFM berechnete Grundwasserspende mit den gemessenen Grundwasserständen abgeglichen. Laut dokumentierter Bohrprofile befindet sich bei FFM_C in 3,5 m Tiefe eine wasserundurchlässige Tonschicht. Im Schwankungsbereich des oberflächennahen Grundwassers kann vereinfacht von einem 2-schichtigen Aufbau mit nach oben zunehmender hydraulischer Leitfähigkeit und effektivem Porenvolumen ausgegangen werden. Der Grundwasserabfluss wurde als proportional zum Grundwasserstand angenommen. Die unter diesen Annahmen und der Grundwasserspende von BROOK90_FFM berechnete Grundwasserganglinie ist in Abbildung 3.5-4 der gemessenen gegenübergestellt. Mit Ausnahme der gegenwärtig nicht gut erklärbaren Anfangsjahre, für die es auch nur sporadische Grundwassermessungen gibt, kann die erreichte Übereinstimmung als Bestätigung der Modellergebnisse betrachtet werden. Auffallend ist eine zeitliche Verzögerung der theoretischen Ganglinie gegenüber der gemessenen. Sehr wahrscheinlich spielt also am Standort der Makroporenfluss eine nicht zu vernachlässigende Rolle, der am Matrixfluss vorbei zu einer schnelleren Reaktion des Grundwasserspiegels führt. Es muss hier aus Aufwandsgründen einer Sonderuntersuchung vorbehalten bleiben, eine Modellierung mit BROOK90 unter Berücksichtigung des Makroporenflusses zu versuchen. Um Unterterminiertheit zu vermeiden, müssten dazu weitere unabhängige Messdaten gewonnen werden.

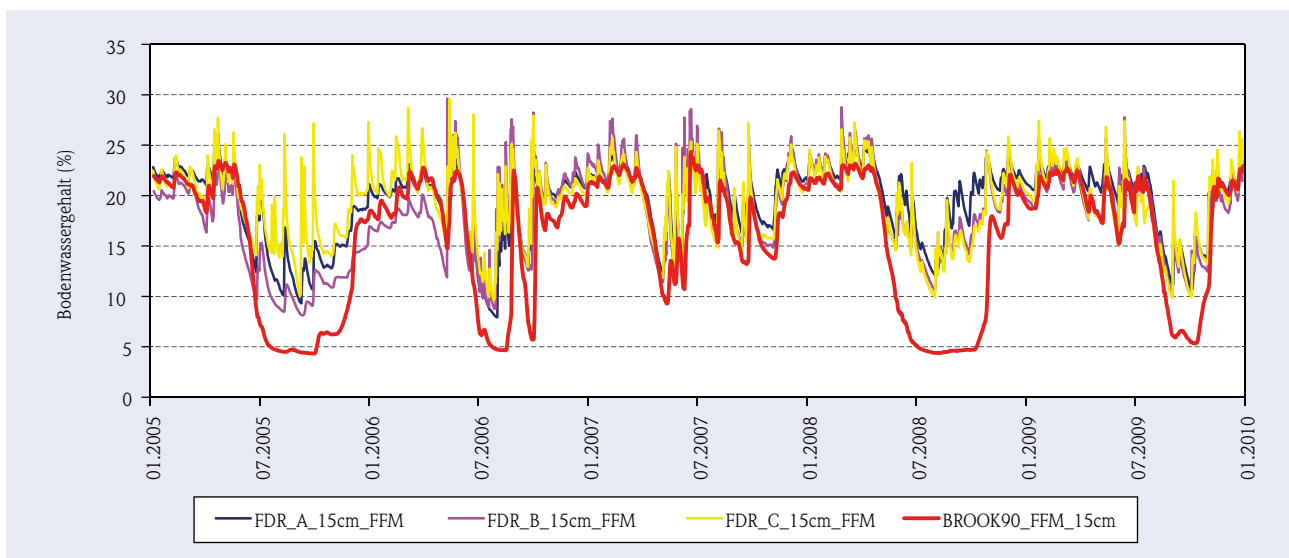


Abb. 3.5-3: Vergleich der in 15 cm Tiefe in drei Parallelen mit FDR-Sonden gemessenen mit den mit BROOK90_FFM modellierten Bodenwassergehalten (exemplarischer Auszug 2005 - 2009).

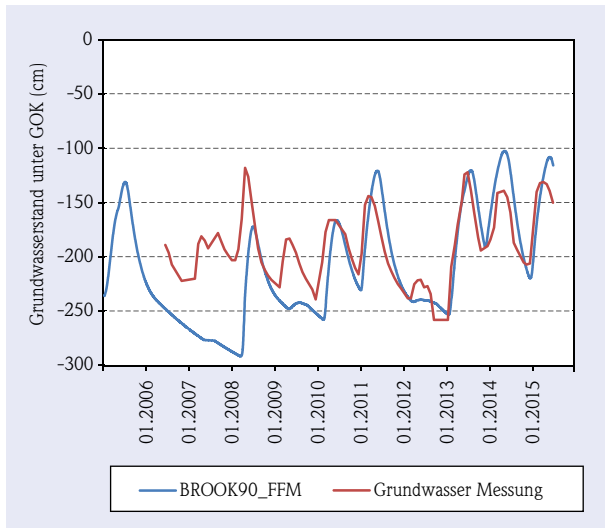


Abb. 3.5-4: Vergleich des gemessenen Grundwasserstands mit dem auf Basis der Grundwasserspense aus BROOK90_FFM berechneten.

Die mit dem oben beschriebenen Modell BROOK90_FFM berechneten wesentlichen Glieder des Wasserhaushalts sind in Tabelle 3.5-2 in Form der Jahreswerte dargestellt. Die bekannte Trockenheit des Standorts wird insbesondere durch die geringe Grundwasserspense getroffen. 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 berechnet.

3.6 Sickerfrachten 2005 - 2014

Das im Sickerwasser gemessene Parameterspektrum ergibt sich aus Tabelle 3.6-1. 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. Fehlende Proben sind überwiegend auf Trockenheit zurückzuführen, nur zum Teil auf technische Defekte. Die Datenplausibilisierung wurde auf Ebene der Sickerfrachtenraten in der Einheit g/ha und Tag durchgeführt. Zum überwiegenden Teil wurden Ersatzwerte über die parameterspezifischen Regressionen mit der 4-wöchentlichen Sickerrate berechnet, jedoch mit Vorrang jahreszeitlicher Zusammenhänge. Der Einfluss auf die Jahresfrachten ist gering, da dies hauptsächlich während Trockenheit mit dann sehr geringen Frachten erforderlich war. Die Nachvollziehbarkeit ist über die Datenlieferung an das HLNUG gegeben.

Aus den ermittelten 4-wöchentlichen Sickerfrachten wurden die Jahres-Sickerfrachten tagesscharf berechnet. Jahresfrachten glätten die 4-wöchentlichen Zeitreihen und machen Trends deutlicher sichtbar. Deshalb sind nur diese hier dargestellt und auch nur für solche Parameter, die deutliche zeitliche Trends aufweisen (Abbildung 3.6-1, Jahreswerte siehe Anhang Tab. A-5). Bei der Beurteilung der Trends ist zu beachten, dass die Sickerfrachten parameterspezifisch unterschiedlich stark mit den Sickerraten korrelieren. Rein wetterbedingt ist bei den Sickerraten ein leichter Trend zur Zunahme im Betrachtungszeitraum festzu-

Tab. 3.5-2: Ausgewählte Wasserhaushaltsbilanzglieder mit BROOK90_FFM berechnet, Jahreswerte 2005 - 2014 in mm.

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Freiland-Niederschlag	496	626	699	567	665	703	505	631	700	650
Interzeptionsverdunstung	71	91	104	87	91	100	78	98	106	92
Bestandes-Niederschlag	425	536	595	480	574	603	427	533	594	558
Evaporation	75	81	82	74	82	80	69	82	84	77
Transpiration	410	435	432	403	421	379	405	372	359	380
Sickerrate FFM_0cm	258	355	426	294	396	457	285	390	460	416
Sickerrate FFM_10cm	199	271	357	221	324	400	203	334	405	355
Sickerrate FFM_30cm	143	160	234	172	217	298	109	227	313	244
Sickerrate FFM_60cm	104	57	119	122	99	200	74	113	226	157
Grundwasserspense	81	0	1	46	3	53	82	4	110	94

stellen. Deshalb sind z.B. leichte Zunahmen der Sickerfrachten als Konstanz zu interpretieren.

Bei den Sickerraten fallen die trockenen Jahre 2005, 2008 und 2011 mit jeweils geringen Raten ins Auge, die sich erwartungsgemäß unterschiedlich bis auf die Sickerfrachten durchpausen. Bei SO_4 ist ein Anstieg der Sickerfrachten im Mineralboden, nicht aber aus der Auflage zu beobachten. Hier scheinen sich Schwefel-Pools aus Zeiten höherer Deposition verstärkt abzubauen. Die weitere Reduktion der Schwefeleinträge scheint durch einen verstärkten Abbau des Auflagevorrats zunächst noch überlagert zu werden. Dieser Abbau der Auflage könnte die Ursache für die zunehmenden Kalium-Sickerfrachten aus der Auflage sein, bei gleichzeitiger Konstanz im Mineralboden (Kalzium und Magnesium verhalten sich analog, nicht dargestellt). Blei aus der Auflage zeigt eine geringe Tendenz zur Abnahme, die unter Berücksichtigung der zunehmenden Sickerraten tatsächlich stärker sein muss. Antimon scheint ohne Trend aus der Auflage verlagert zu werden. Der Antimonaustrag aus 10 cm Tiefe nimmt dagegen zu, wie dies als verzögerte Reaktion auf den Stoffeintrag gut zu verstehen wäre. Weitere Schlussfolgerungen sollten auf umfassenderer Basis der Stoffbilanzen gezogen werden.

Für alle Parameter, auch für diejenigen, die keinen zeitlichen Trend aufweisen, sind die Mittelwerte der Sickerfrachten der vergangenen Dekade in Tabelle 3.6-1 dargestellt. Diese finden unter Berücksichtigung der hier dargestellten Dynamik Verwendung im Bilanzkapitel. An dieser Stelle sei nur noch kurz auf einige interessante Ergebnisse hingewiesen, die sich aus den langjährigen Mittelwerten der Tabelle 3.6-1 ableiten lassen.

Anorganische Spurenstoffe, deren Sickerfrachten im Profil von oben nach unten stark abnehmen, können der Gruppe der vorwiegend atmosphärisch eingetragenen Stoffe zugeordnet werden. Dazu zählen Blei, Kupfer und Antimon. Zunahmen nach unten sind bei dominierender Freisetzung aus dem Ausgangsgestein festzustellen, hier nur bei Kobalt klar ersichtlich. In allen anderen Fällen sind Überlagerungen atmosphärischer und geogener Quellen anzunehmen. Bei den Nährelementen, speziell Kalium, aber auch bei Mangan tritt ein hoher Anteil des Boden-Pflanzen-Kreislaufs hinzu, wie im Kapitel Deposition schon angesprochen. Bei SO_4 zeigt sich der an den Jahresfrachten schon gezeigte Abbau von Schwefelvorräten

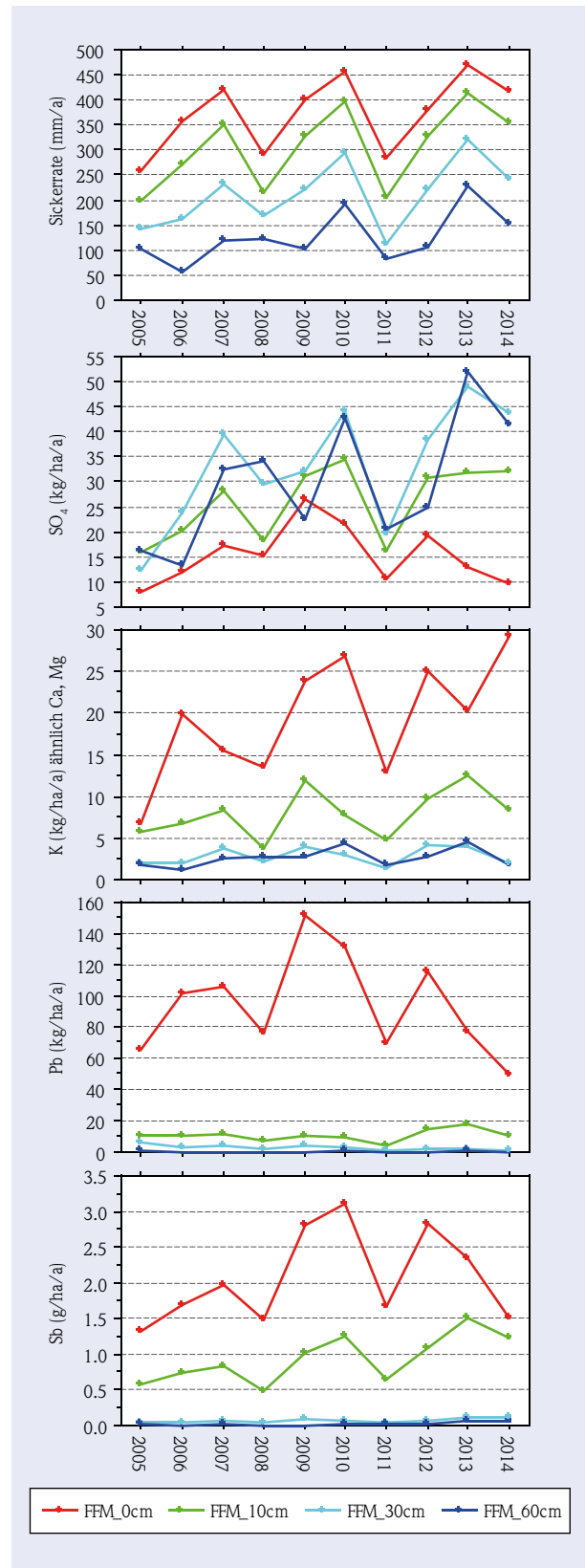


Abb. 3.6-1: Jahreswerte der Sickerraten sowie Sickerfrachten ausgewählter Parameter an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen 2005 - 2014.

Tab. 3.6-1: Mittelwerte 2005 – 2014 der jährlichen Sickerraten, des pH-Werts sowie der Jahressickerfrachten der Hauptelemente und anorganischen Spurenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in den 4 Probennahmetiefen.

	0 cm Auflage	10 cm	30 cm	60 cm
Sickerrate (mm/a)	374	307	212	127
eL ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	141	100	91	127
pH (-)	3,96	4,14	4,20	4,07
H_3O^+ (kmol/ha/a)	0,51	0,25	0,14	0,13
	kg/ha/a			
Cl	9,9	14,7	12,4	7,9
SO_4	15,3	25,9	33,2	30,0
$\text{NO}_3\text{-N}$	13,4	10,8	4,6	5,2
$\text{NH}_4\text{-N}$	1,33	0,05	0,02	0,01
Ca	20,4	10,6	5,8	3,4
Mg	4,4	3,4	2,2	1,5
Na	4,3	6,9	8,0	6,1
K	19,4	8,0	2,8	2,6
	g/ha/a			
Pb	94,4	10,8	3,1	0,4
Cd	2,0	1,5	1,6	1,3
Ni	28,4	26,8	22,0	16,3
As	6,2	4,8	1,2	0,4
Cr	9,5	9,5	0,9	0,4
Cu	128,3	46,0	4,6	2,2
Co	6,8	8,9	20,9	13,3
Sb	2,07	0,94	0,07	0,03
Zn	242	171	137	91
Al	5218	7670	3020	2534
Mn	6758	2688	2537	3296
Fe	2856	689	30	14

aus früheren Einträgen. Ein analoges „Zehren“ deutet sich bei Natrium und Chlorid an.

Insgesamt zeigt sich damit bei den Sickerfrachten ein sehr plausibles Bild, das mit den bodenkundlichen Erkenntnissen zum Stofftransport in der ungesättigten Zone in Einklang steht. Vergleichswerte für Sickerfrachten stehen aufgrund starker Standortabhängigkeit kaum zur Verfügung. An einem hinsichtlich Boden, Klima und Hydrogeologie 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 Tracer wie z.B. Natrium oder Chlorid stützen. Siehe hierzu das folgende Kapitel.

3.7 Zusammenschau der Stoffflüsse

Die Zusammenschau der Stoffflüsse aller untersuchten Pfade ist auf Basis der Mittelwerte der Jahresfrachten in den Tabellen 3.7-1 bis 3.7-4 dargestellt. Sie dient dem Überblick, aber auch einer weitergehenden Plausibilisierung und Diskussion der bisher erzielten Ergebnisse.

Anhand von Chlorid und Natrium als konservativen Tracern, die das System ohne Interaktion nur durchlaufen und auch nicht über den Streufall eingetragen werden, lassen sich die berechneten Sickerfrachten plausibilisieren. Es sollten sich vom Bestandsniederschlag an FFM_C bis zum Austrag in 60 cm Tiefe im mehrjährigen Mittel die gleichen Frachten ergeben. Bei beiden Parametern zeigen sich ähnlich gute bis sehr gute Übereinstimmungen. In 10 cm und 30 cm Tiefe scheinen sich früher, bei höheren Einträgen gebildete Bodenvorräte abwärts zu bewegen. Lediglich die Abnahme in 60 cm Tiefe passt nicht ganz ins Bild und deutet auf einen Minderbefund in dieser Tiefe hin. Gegenüber HLOG (2010) hat sich damit die Plausibilität der Sickerfrachten deutlich gesteigert, primär aufgrund der veränderten Sickerraten aus dem neuen Modell BROOK90_FFM. Ähnlich plausible Sickerraten können aus den gleichen Eingangsdaten auch über physikalisch sehr vereinfachte sogenannte Speichermodelle erzielt werden (z.B. Modell SIMPEL, HLOG 2011). Zur Aufwandsminimierung wären Vergleichsmodellierungen der inzwischen 10-jährigen Messreihe interessant.

Bei H_3O^+ ist zu erkennen, dass in der Auflage zusätzliche Säure entsteht, die dann auf der Bodenpassage neutralisiert wird. Bei SO_4 wird die schon angesprochene Mobilisierung aus dem Bodenvorrat deutlich. Bezieht man den im Streufall organisch gebundenen Schwefel und Stickstoff mit ein, so zeigt sich, dass Schwefel überwiegend anorganisch als SO_4 in

die Auflage gelangt und dieser auch kaum von den Pflanzen aufgenommen wird. Stickstoff dagegen gelangt vorrangig über die Streu in die Auflage und wird merklich über die Wurzeln aufgenommen. Bezüglich der Humusbildung ist festzuhalten, dass in den beiden Beständen im Mittel 1,7 t/ha/a bzw. 2,0 t/ha/a C_{org} durch den Streufall beigetragen werden. Kalzium wird 5-fach, Magnesium und Mangan 2-fach stärker über die Streu als über den Bestandsniederschlag in die Auflage eingetragen, Kalium dagegen vorwiegend über den Bestandsniederschlag. Daraus folgt, dass alle Nährkationen eine deutliche Wurzelaufnahme zeigen. Nur die Mechanismen, über die der Boden-

Pflanze-Kreislauf geschlossen wird, unterscheiden sich je nach Parametergruppe.

Für anorganische Spurenstoffe lässt sich als grobe Faustregel ableiten, dass Streufrachten ähnlich hoch wie die korrespondierenden Bestandsdepositionen liegen (LUBW 2008). Dies wird in Tabelle 3.7-3 bestätigt. Abweichend ist Kupfer, das wegen hoher Bestandsdeposition vergleichsweise geringere Streufrachten aufweist und hierin seine schon festgestellte Sonderrolle erneut zum Ausdruck bringt. Entgegen gesetzt weicht Chrom ab, hier sind die Streufrachten höher. Eine Wurzelaufnahme kann also meist ver-

Tab. 3.7-1: Mittelwerte der Wasserflüsse und der ermittelten Jahresfrachten 2005 - 2014 (Streufrachten 2010 - 2014) der Hauptelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen im Überblick (FN = Freilanddeposition, BN = Bestandesdeposition).

	Fracht	NS bzw. Sickerrate	H_3O^+	Cl	SO_4	SO_4-S	S_{org}	NO_3-N	NH_4-N	N_{org}	C_{org}	P_{org}
		mm/a	kmol/ha/a	kg/ha/a								
FFM_A	FN	610	0.08	4.4	9.9	3.3		3.3	4.15			
FFM_B	BN	543	0.07	6.1	10.3	3.4		4.4	3.39			
	Streu						2.6			36	1696	1.3
	BN + Streu	543	0.07	6.1	10.3	3.4		4.4	3.39			
FFM_C	BN	599	0.10	9.8	13.5	4.5		6.2	4.80			
	Streu						2.7			45	2033	1.6
	BN + Streu	599	0.10	9.8	13.5	4.5		6.2	4.80			
FFM_C	0 cm	374	0.51	9.9	15.3	5.1		13.4	1.33			
	10 cm	307	0.25	14.7	25.9	8.6		10.8	0.05			
	30 cm	212	0.14	12.4	33.2	11.1		4.6	0.02			
	60 cm	127	0.13	7.9	30.0	10.0		5.2	0.01			

Tab. 3.7-2: Mittelwerte der ermittelten Jahresfrachten 2005 - 2014 (Streufrachten 2010 - 2014) der Hauptkationen sowie Mangan, Aluminium und Eisen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen (FN = Freilanddeposition, BN = Bestandesdeposition).

	Fracht	Ca	Mg	Na	K	Mn	Al	Fe
		kg/ha/a						
FFM_A	FN	2.9	0.4	2.3	3.4	0.2	0.7	1.33
FFM_B	BN	3.9	0.9	2.7	11.2	5.6	0.5	1.65
	Streu	19.1	1.9		4.8	10.4		0.81
	BN + Streu	23.0	2.7	2.7	16.0	16.0	0.5	2.46
FFM_C	BN	5.6	1.4	4.3	16.1	4.8	0.7	1.70
	Streu	18.2	2.2		4.4	9.2		1.13
	BN + Streu	23.9	3.7	4.3	20.5	14.0	0.7	2.83
FFM_C	0 cm	20.4	4.4	4.3	19.4	6.8	5.2	2.86
	10 cm	10.6	3.4	6.9	8.0	2.7	7.7	0.69
	30 cm	5.8	2.2	8.0	2.8	2.5	3.0	0.03
	60 cm	3.4	1.5	6.1	2.6	3.3	2.5	0.01

nachlässigt werden, wenn diese auch zumindest bei den für Pflanzen essentiellen Spurenelementen Kupfer und Zink in geringem Maße anzunehmen ist. Unterscheiden sich die beiden Bestandsmessplots noch merklich hinsichtlich ihrer jeweiligen Bestandsdepositionen und Streufrachten, so werden diese Unterschiede in der Summe nivelliert. D.h. beide Bestände weisen einen nahezu identischen Gesamteintrag auf, der nur unterschiedlich auf die beiden Transportpfade aufgeteilt wird.

Meist nehmen die Sickerfrachten ihrer Bodenchemie entsprechend nach unten hin mehr oder weniger stark ab. Bei Kobalt kommt eine deutliche Freisetzung aus dem Ausgangsgestein hinzu. Cadmium und Nickel befinden sich im Fließgleichgewicht.

Die Ermittlung von Sickerfrachten für PAK ist ein noch ungelöstes Problem der Forschung. Für PAK liegen deshalb nur Depositionswerte vor. Beide Messplots zeigen individuell sowie in der Summe sehr ähnliche Werte, allerdings mit geringerem Anteil der Streufrachten. Möglicherweise spielt hier ein analytischer Minderbefund hinein, der sich über das veränderte Kongenerenmuster oben stehend schon angedeutet hat.

Die ermittelten Ergebnisse fügen sich demnach insgesamt in ein sehr schlüssiges Bild, wodurch ihre Plausibilität und Verwendbarkeit für Bilanzierungen bestätigt wird. Kleinere Unstimmigkeiten ebenso wie die teilweise festgestellten zeitlichen Trends sind hierbei im Blick zu behalten.

Tab. 3.7-3: Mittelwerte der ermittelten Jahresfrachten 2005 - 2014 (Streufrachten 2010 - 2014) der anorganischen Spurenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen im Überblick (FN = Freilanddeposition, BN = Bestandesdeposition, Werte in Klammern: fehlender Wert für Streufalldeposition wurde durch Wert für Bestandesdeposition ersetzt).

		Pb	Cd	Ni	As	V	Cr	Co	Cu	Zn	Sb	Hg
		g/ha/a										
FFM_A	FN	7.7	0.67	8.3	1.3	5.3	7.4	1.3	124	140	1.31	
FFM_B	BN	8.0	0.74	14.4	1.7	5.9	10.2	1.8	90	159	1.94	
	Streu	6.1	0.87	12.4	< 10.9		15.2	1.4	47	148	< 1.7	0.11
	BN + Streu	14.2	1.61	26.9	(3.4)	(11.8)	25.4	3.2	137	307	(3.9)	
FFM_C	BN	7.5	0.67	12.6	1.6	6.0	9.9	1.6	82	170	1.93	
	Streu	8.4	1.01	15.1	< 12.9		17.9	1.6	61	199	2.69	0.12
	BN + Streu	15.9	1.68	27.7	(3.3)	(12.0)	27.7	3.2	142	370	4.62	
FFM_C	0 cm	94.4	1.96	28.4	6.2		9.5	6.8	128	242	2.07	
	10 cm	10.8	1.53	26.8	4.8		9.5	8.9	46	171	0.94	
	30 cm	3.1	1.56	22.0	1.2		0.9	20.9	5	137	0.07	
	60 cm	0.4	1.26	16.3	0.4		0.4	13.3	2	91	0.03	

Tab. 3.7-4: Mittelwerte der ermittelten Jahresfrachten 2005 - 2014 (Streufrachten 2010 - 2014) der organischen Spurenstoffe an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen im Überblick (es liegen keine Sickerfrachten vor, FN sowie BN nur bei PAK).

		16 PAK	12 PAK	8 PAK	4 PAK	Benzo(a) pyren	6 PCB	Biphenyl	HCB	HCH- gamma	1,2,4 Tri- chlorbenzol	
		g/ha/a					mg/ha/a					
FFM_A	FN	1.53	1.25	0.51	0.20	55.8						
FFM_B	BN	1.13	0.94	0.35	0.14	40.3						
	Streu	0.81	0.59	0.15	0.05	12.0	69.2	23.5	4.3	< BG	6.4	
	BN + Streu	1.95	1.53	0.51	0.19	52.3						
FFM_C	BN	1.17	0.97	0.38	0.15	42.9						
	Streu	0.90	0.68	0.20	0.06	17.4	84.3	26.0	5.7	3.0	7.5	
	BN + Streu	2.07	1.66	0.57	0.21	60.3						

4. Bodenuntersuchungen

Untersuchungen im Boden-Feststoff wurden 1992 im Zuge der Erstbeprobung an der Bodenbeprobungsfläche sowie an der Profilgrube (Abb. 4.1-1) durchgeführt. Wiederholuntersuchungen der Bodenbeprobungsfläche bis 30 cm Tiefe fanden 1997, 2001, 2006 und 2011 auf einem kreuzförmigen Beprobungsraster bei 3 Parallelen mit jeweils 6 Einstichen statt. Die Beprobungen wurden durch das HLNUG, die Analytik von verschiedenen Laboren durchgeführt. Elementaranalytik, Königswasser- und Ammoniumnitrat-extrahierbare Gehalte wurden jeweils an den 3 Parallelen gemessen, die organischen Spurenstoffe mit Ausnahme von 2001 an einer Mischprobe der 3 Parallelen. In 2001 wurden Rückstellproben der drei bis dahin vorliegenden Inventuren einheitlich auf eine Auswahl anorganischer Spurenstoffe hin nachgemessen.

4.1 Trends der Stoffgehalte im Boden

Bei den absoluten Stoffgehalten im Boden zeigen sich keine Auffälligkeiten, die Werte liegen im Erwartungsbereich für die vorliegende Gley-Braunerde aus umgelagertem Flugsand mit dem Immissionseinfluss eines Ballungsraums (vgl. Anhang Tab. A-7 bis A-9).

Im Fokus dieses Bilanzberichts stehen vielmehr Bodenveränderungen und die Frage, ob sich aus den Bodenuntersuchungen mögliche Trends ableiten lassen. Es ist bekannt, dass der Nachweis von Bodenveränderungen, speziell im Mineralboden, durch wiederholte Inventuren methodisch bedingt nur unter besonderen Umständen möglich ist (Meuli et. al. 2014, LUBW 2009). Grund sind naturgemäß geringe Änderungs-raten in Verbindung mit starker räumlicher Heterogenität der Bodengehalte, die Unmöglichkeit zerstörungsfreier Probenahmen sowie Unsicherheiten aus Beprobung, Aufbereitung und chemischer Analyse. Besser gelingt der Nachweis von Veränderungen in der organischen Auflage, die aufgrund ihrer Natur „erneuerbar“ ist und höhere Umsatzraten aufweist.

Abbildung 4.1-2 zeigt die Zeitreihen für die anorganischen Parameter, bei denen zumindest in einer untersuchten Bodenschicht ein Trend erkennbar ist. Als

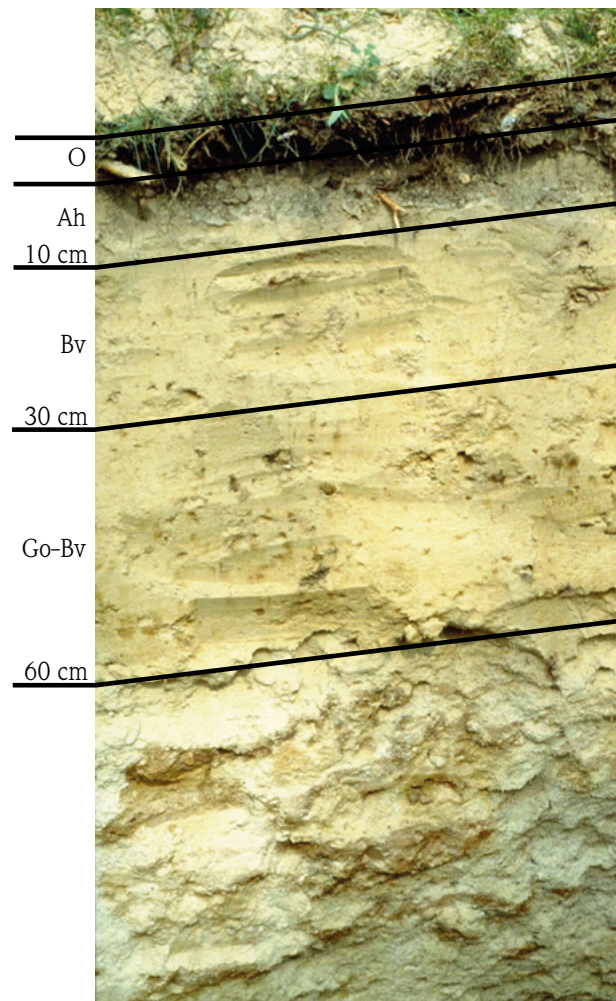


Abb. 4.1-1: Gley-Braunerde-Bodenprofil an der Profilgrube der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen im Jahr 1992 mit bilanzbezogener Horizontierung.

Maß für die Streuung der Einzelwerte ist zusätzlich das Vertrauensintervall auf dem 95%-Niveau dargestellt. In der hier verwendeten einfachen statistischen Betrachtung wären Gehaltsänderungen dann als statistisch signifikant anzusehen, wenn sich die durch die Vertrauensintervalle aufgespannten Wertebereiche nicht mehr überlappen. Statistisch signifikant bedeutet hier also „nicht mehr allein durch Streuung und Stichprobenzufall erklärbar“. Es wird im Folgenden noch deutlich, dass aufgrund der Datenlage bei Bodenfeststoffuntersuchungen elaboriertere statistische Signifikanztests hier nicht weiterhelfen.

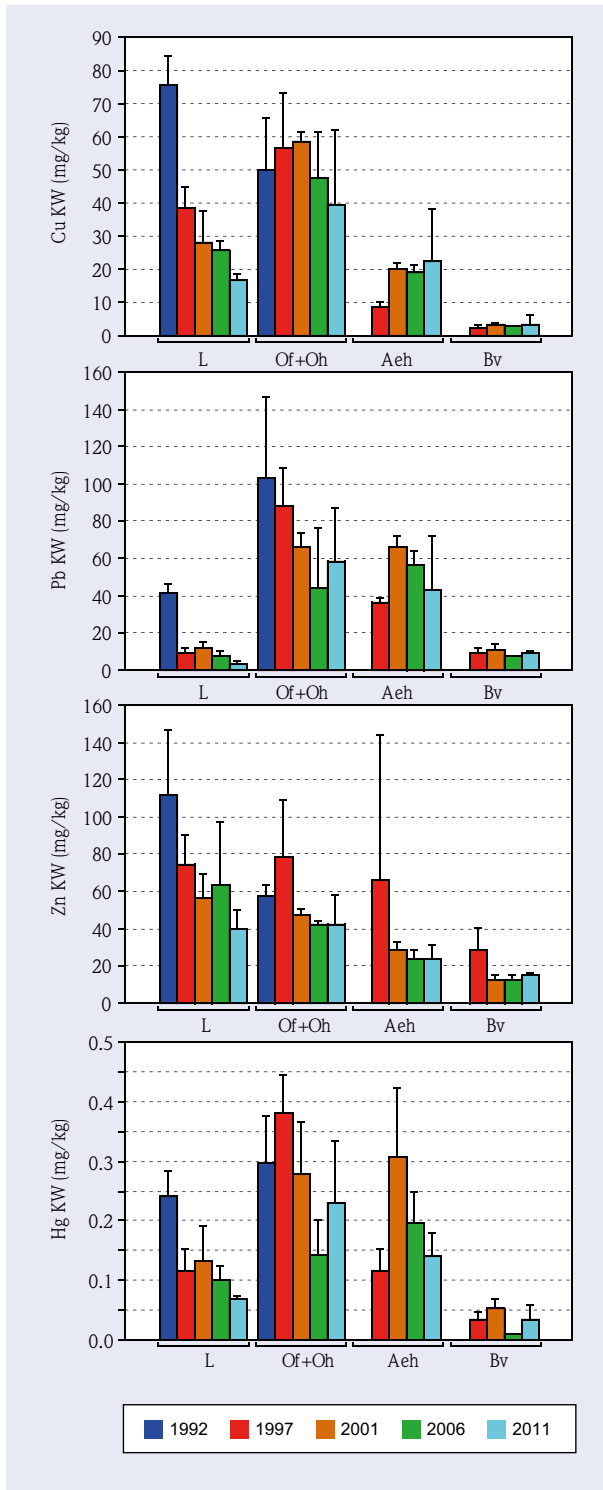


Abb. 4.1-2: Zeitreihen der Bodenfeststoffanalysen anorganischer Spurenstoffe, die einen Trend zeigen, Beprobungsfläche der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Fehlerbalken = Vertrauensintervall auf 95%-Niveau. L = -5 bis -3 cm; Of+Oh = -3 bis 0 cm; Aeh = 0 bis 5 cm; Bv = 5 bis 30 cm Tiefe.

Die Nachmessungen im Jahre 2001 haben die Vormessungen im Wesentlichen bestätigt, so dass diese mit den eigentlichen Messwerten zusammengefasst dargestellt werden konnten. Für 1992, 1997 und 2001 erhöht sich damit die Anzahl der Parallelmessungen von 3 auf 6, wodurch die Vertrauensintervalle und damit die statistische Trennschärfe in der Tendenz kleiner werden. Da aber beide Messkampagnen unvermeidbar analytische Offsets aufweisen, fallen die resultierenden Vertrauensintervalle nicht einheitlich kleiner aus, als in den Folgejahren 2006 und 2011.

Bei der Erstuntersuchung 1992 wurden im Mineralboden andere Horizontierungen und damit auch andere Beprobungstiefen gewählt. Für die Zeitreihendarstellung sind nur vergleichbare Einheiten gegenübergestellt, deshalb fehlen die Mineralbodenhorizonte des Jahres 1992 in den folgenden Zeitreihen.

Bei Kupfer zeigt sich eine signifikante Abnahme in der noch wenig zersetzten Streuauflage (L). Im stärker zersetzten Of+Oh-Horizont der organischen Auflage deutet sich über den Gesamtzeitraum eine Abnahme an, die aber nicht signifikant ist. Im Aeh-Horizont zeigt sich eine Gehaltsverdopplung von 1997 auf 2001, die nicht mehr durch Stichprobenezufall erklärt werden kann. Da eine solch große Änderung in kurzer Zeit unplausibel ist, sind hier andere Gründe wahrscheinlich, z.B. analytische Offsets. Eine ähnliche Entwicklung ist auch bei Cadmium zu erkennen (nicht dargestellt).

Blei zeigt in der L-Lage einen dramatischen Einbruch von 1992 auf 1997, der durch die Vergleichsmessungen gestützt wird (hier nicht dargestellt). Die Änderung ist signifikant und könnte auch plausibel sein, denn sie fällt in die Zeit der maximalen Wirkungsentfaltung des Benzinbleiverbots (stufenweise ab 1989). Langfristiger nehmen die Bleigehalte in der gesamten organischen Auflage ab. Im Aeh-Horizont zeigen sich 1997 sehr geringe Werte, die einen Bruch in der sonst nicht signifikant aber doch stetig abnehmenden Zeitreihe bilden. Die Nachmessungen 2001 haben diese Werte bestätigt, so dass die Frage der Ursachen an dieser Stelle zunächst offenbleiben muss. Im Bv-Horizont ist keine Änderung zu erkennen, die größer wäre, als die entsprechenden Unsicherheiten.

Eine Abnahme in der Auflage deutet sich auch bei Zink an. Im Mineralboden liegt 1997 vermutlich eine Überschätzung vor, ansonsten liegen mögliche Verän-

derungen innerhalb der Unsicherheitsbereiche.

Bei Quecksilber ist eine Abnahme in der Auflage ansatzweise ebenfalls erkennbar. Geht man bei den 1997er Werten, speziell im Aeh-Horizont, analog zu den bereits besprochenen Parametern von Ausreißern aus, so wäre eine deutliche Abnahme im Aeh-Horizont festzustellen. Im Bv-Horizont liegen mögliche Veränderungen wiederum innerhalb der Unsicherheitsbereiche.

Bei allen anderen anorganischen Parametern zeigen sich keine Trends, und dies insbesondere auch bei den vorliegenden Ammoniumnitrat-extrahierbaren Gehalten. Die Hoffnung besteht darin, hiermit eine Art mobilen Pool quantifizieren zu können, der sensitiver auf Veränderungen reagiert. Dies ist nicht zu beobachten. Stattdessen zeigen die mobilen Gehalte wohl eher nur ein Bild der Austauschbelegung im gut gepufferten System Boden. Hohe Streuungen sind durch die zusätzliche pH-Abhängigkeit bedingt.

Generell deuten die beobachteten Trends auf abnehmende Stoffgehalte hin. Eine gegenläufige Entwicklung könnte einzig bei Antimon vorliegen, die aber auf Basis der Wiederholuntersuchungen nicht belegbar ist (nicht dargestellt). Die weitere Aufklärung erfolgt über die Einbeziehung der ermittelten Stoffflüsse im Bilanzkapitel.

Bei den organischen Spurenstoffen können Unsicherheitsmaße nur für 2001 berechnet werden, da bisher nur hier die beprobten 3 Parallelen getrennt analysiert wurden (Ausnahme Dioxine/Furane, hier durchgehend n=1). Bei den organischen Spurenstoffen liegen keine Nachmessungen an Rückstellproben vor.

Bei der Summe der EPA-PAK ist die Entwicklung im L-Horizont uneinheitlich, während sich in der Auflage insgesamt eine leichte Abnahme andeutet. Im Aeh-Horizont besteht wegen analytischer Offsets Unklarheit, im Bv-Horizont liegen die Gehalte überwiegend unterhalb der Bestimmungsgrenze, wie bei den meisten der hier untersuchten Parametern. Bei der Summenbildung der 16 EPA-PAK werden Analysenwerte kleiner der Bestimmungsgrenze gleich Null gesetzt. Im vorliegenden Fall ist der Einfluss durch unterschiedliche Bestimmungsgrenzen vernachlässigbar gering.

Bei der Summe der 6 PCB (nach Ballschmiter) ist möglicherweise der extrem hohe Wert 1992 in der

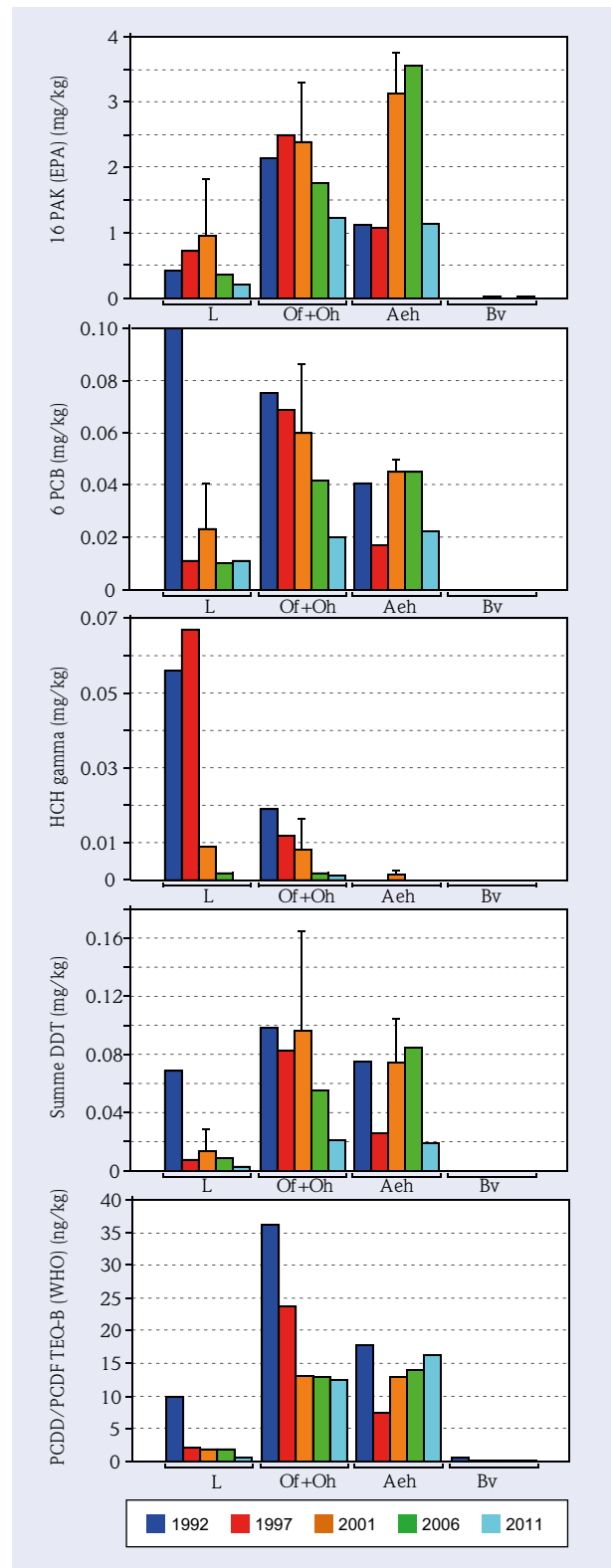


Abb. 4.1-3: Zeitreihen der Bodenfeststoffanalysen organischer Spurenstoffe, die einen Trend zeigen, Beprobungsfläche der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Fehlerbalken = Vertrauensintervall auf 95%-Niveau. L = -5 bis -3 cm; Of+Oh = -3 bis 0 cm; Aeh = 0 bis 5 cm; Bv = 5 bis 30 cm Tiefe.

L-Lage und die drastische Abnahme bis 1997 realistisch, denn mit gleichbleibenden L-Gehalten in der Vergangenheit wäre die deutliche Abnahme im Of+Oh-Horizont über den Gesamtzeitraum schwer erklärbar. Zur Erhärtung müssten jedoch weitere Daten herangezogen werden.

Bei HCH-gamma (Lindan, gamma-Hexachlorcyclohexan) fällt die Abnahme in der organischen Auflage deutlich aus, während es im Mineralboden kaum mehr oberhalb der Bestimmungsgrenze gemessen wird.

Analog, wenn auch nicht ganz so deutlich, nimmt DDT in der Auflage ab. Es wird allerdings auch im Aeh-Horizont gefunden, jedoch sind mögliche Trends durch analytische Offsets überlagert.

Ähnliche Verläufe zeigen auch die Dioxine und Furane, die in Abbildung 4.1-3 als sogenannte TEQ-B-Werte dargestellt sind, bei denen bei der Berechnung der Toxizitätsäquivalente Analysenwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze gleich Null gesetzt werden. Zu den zugehörigen TEQ-A-Werten inklusive der Bestimmungsgrenzen bestehen bei den vorliegenden Analysen keine relevanten Unterschiede und damit auch keine Beeinflussung der Zeitreihen.

Die weitere Aufklärung der Stoffdynamik bei den organischen Spurenstoffen ist im Bilanzkapitel zu erwarten.

Ein Maß für die mit den Bodenuntersuchungen erreichte statistische Trennschärfe kann aus dem Verhältnis der Vertrauensintervalle zum zugehörigen Mittelwert abgeleitet werden. Auf einen einzigen Standort bezogen, erlaubt dies eine Schätzung, ab wann mit dem Gesamtverfahren eine relative Änderung als signifikant detektiert werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1-4 für die anorganischen und organischen Spurenstoffe getrennt dargestellt. Bei den anorganischen Parametern liegen die Mediane der Verhältnisse etwa um die 50 %. Das bedeutet, dass im Mittel eine Gehaltsänderung mindestens 50 % betragen muss, um als signifikant detektiert werden zu können. Bei den organischen Parametern fallen die Unsicherheiten im Mittel deutlich größer aus. Wesentliche Gründe für die vergleichsweise hohen Unsicherheiten sind analytische Messunsicherheiten, Probennahmeartefakte und die mit meist $n=3$ wenigen Paralleluntersuchungen.

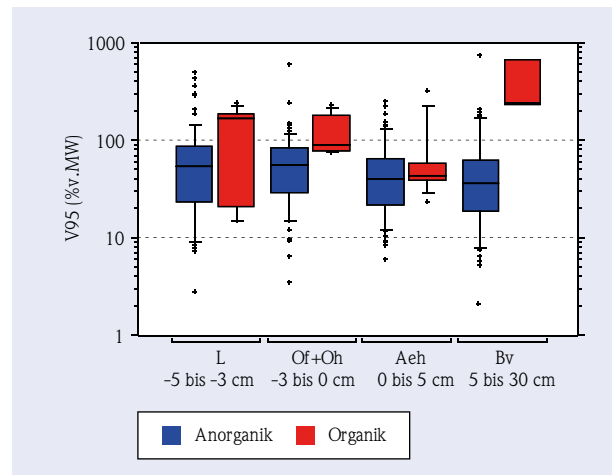


Abb. 4.1-4: Abschätzung der statistischen Trennschärfe von Bodenfeststoffuntersuchungen an der Beprobungsfläche der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen formuliert als Quotienten aus Vertrauensintervall auf dem 95%-Niveau und zugehörigen Mittelwerten in Prozent.

4.2 Stoffvorräte im Boden

Stoffvorräte zeichnen gegenüber Stoffgehalten meist ein diametral anderes Bild der Stoffverteilung in Böden. Das liegt am üblichen Massebezug in der chemischen Analytik, der bei starken Dichteunterschieden, wie sie z.B. zwischen organischer Auflage und Mineralboden bestehen, zu Fehleinschätzungen führen kann. Stoffvorräte sind aber auch die einzig richtige Größe für die bilanzierende Kopplung mit den ermittelten Stoffflüssen bzw. -frachten.

Stoffvorräte sind das Produkt aus Stoffgehalten, Bodentrockenrohdichten und Schichtmächtigkeiten (Skelettanteil hier vernachlässigt, da $< 1\%$). Die Berechnungen wurden bis 60 cm Tiefe durchgeführt, da nur bis an diese Untergrenze korrespondierende Sickerfrachten zur Verfügung stehen. Die verwendeten Gehaltswerte stammen bis 30 cm Tiefe von der Bodenbeprobungsfläche, darunter von der Profilgrubenbeprobung 1992 und teilweise aus über den Profilverlauf begründeten Schätzungen.

Soweit möglich, wurden Gehalte des Jahres 2001 zur Vorratsberechnung verwendet, um einen sinnvollen Startwert für den durch Stoffflussmessungen definierten Bilanzzeitraum 2005-2014 zu erhalten. Wegen abweichender Probennahmetiefen wurde die Erstbeprobung der Beprobungsfläche 1992 nicht verwen-

det. Die für die Beprobungstiefen berechneten Stoffvorräte wurden anschließend auf die Tiefenstufen umgerechnet, für die Sickerfrachten vorliegen (0 cm, 10 cm, 30 cm und 60 cm). Der Gesamtvorrat der organischen Auflage wurde aus der Summe der L- und Of+Oh-Vorräte berechnet.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4.2-1 bis 4.2-3 dargestellt und werden im Bilanzkapitel weiter verwendet. Um sich ein aussagekräftiges Bild über die räumliche Verteilung der Stoffe im Profil machen zu können, sind die nach unten zunehmenden Schichtmächtigkeiten zu berücksichtigen.

Ebenfalls zu berücksichtigen ist die relativ große Unsicherheit der ermittelten Vorräte. Unter der vertretbaren Annahme über die Zeit konstanter Boden-

ichten ist diese gleichzusetzen mit der in Kapitel 4.1 dargestellten Unsicherheit der entsprechenden Stoffgehalte im Boden. Wie noch ersichtlich werden wird, spielen Unsicherheiten bei den Vorräten im Kontext der Stoffbilanzen aber keine vorrangige Rolle mehr, da bei ihnen der Schwerpunkt auf Relationen und Größenordnungen liegt.

Aus der getrennten Beprobung des L-Horizontes lassen sich Streufallfrachten für die jeweiligen Beprobungsjahre abschätzen. Dies ist für die folgenden Bilanzen nützlich, da hierdurch einerseits die Zeitreihen der Streufallfrachten weiter in die Vergangenheit extrapoliert werden können, andererseits aber auch Streufallfrachten für Parameter abgeleitet werden können, die in der Streu nicht gemessen oder aber nicht quantifiziert wurden (wegen Analysenwerten

Tab. 4.2-1: Abschätzung der Stoffvorräte an Nährstoffen und Hauptelementen im Boden der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Angaben in kg/ha und Bodenschicht. N aus Gehalten 2001, Ca, K, S aus 2011, alle anderen 2006, Go-Bv bei Al aus Grube 1992, alle anderen aus Schätzung.

Horizont	Tiefe (cm)	N	P	S	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn
Auflage	-5 - 0	817	25	57	109	36	55	4	224	227	106
Ah	0 - 10	1372	112	129	407	752	753	83	7835	6335	252
Bv	10 - 30	1728	285	220	1183	2600	2487	288	26992	20600	897
Go-Bv	30 - 60	251	251	200	1002	4008	3507	601	41851	32565	1503

Tab. 4.2-2: Abschätzung der Stoffvorräte an anorganischen Spurenstoffen im Boden der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Angaben in g/ha und Bodenschicht. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn aus Gehalten 2001, Co, Hg, Sn aus 2006, Tl aus 2011, alle anderen 1997, Go-Bv aus Grube 1992, Erstbeprobung oder Schätzung.

Horizont	Tiefe	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Sn	Tl	V	Zn
Auflage	-5 - 0	324	24	-	434	3219	8	601	3516	53	987	11	1001	2614
Ah	0 - 10	4388	35	2420	7465	6299	43	5847	21496	356	3096	101	16313	13469
Bv	10 - 30	10800	65	8305	22961	11567	32	17064	40284	832	10584	285	51840	36115
Go-Bv	30 - 60	13260	75	15030	32189	18913	65	36122	15907	284	15030	251	76820	70340

Tab. 4.2-3: Abschätzung der Stoffvorräte an organischen Spurenstoffen im Boden der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Auflage, Ah und Bv aus Gehalten 2001, Go-Bv Schätzwert gleich Null.

Horizont	Tiefe (cm)	PAK (EPA)	12_PAK	8_PAK	4_PAK	6 PCB	g-HCH	Summe DDT	TEQ-A (WHO 2005)	TEQ-B (WHO 2005)
		g/ha/Horizont							mg/ha/Horizont	
Auflage	-5 - 0	133	132	83	27	3,3	0,5	5,3	0,72	0,72
Ah	0 - 10	574	569	376	118	8,1	0,2	13,3	2,54	2,48
Bv	10 - 30	40	40	26	4	0,0	0,0	0,0	0,85	0,62
Go-Bv	30 - 60	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00

< BG). Möglich ist dies, da die L-Lage definitionsgemäß der mehr oder weniger in einem Jahr gefallenen Streu entspricht. Nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005) entspricht die L-Lage einem organischen Horizont aus Ansammlung von nicht und wenig zersetzter Pflanzsubstanz an der Bodenoberfläche.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2-4 dargestellt. Die Beprobung 2011 wurde Anfang Mai durchgeführt, es wurde also praktisch der Streufall des Jahres 2010 beprobt, dessen Werte deshalb als Vergleichswerte herangezogen wurden. Insgesamt zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen, so dass die Zeitreihen der Streufallfrachten tatsächlich mit dem gezeigten Verfahren rückwirkend abgeschätzt werden können. Deutliche Unterschätzungen der Streufrachten durch den L-Vorrat ergeben sich bei Zn, PAK und PCB, die im Weiteren berücksichtigt werden müssen. Ob es sich um systematische Unterschätzungen handelt, kann mangels weiterer Vergleichsdaten nicht beurteilt werden.

Tab. 4.2-4: Rückblickende Abschätzung der Streufallfrachten aus den Stoffvorräten des L-Horizontes und Vergleich mit den Streufallfrachten des Jahres 2010 an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen.

	Probennahmejahr					Streufracht 2010
	1992	1997	2001	2006	2011	
	kg/m ² /a					
Horizontgewicht	0,35	0,42	0,34	0,31	0,33	0,36
	kg/ha/a					
N _{org}	60	-	48	42	50	40
P _{org}	-	-	-	1,3	1,9	1,8
S _{org}	-	-	-	-	3,5	3,4
Ca	-	-	-	-	22,1	22,9
K	-	-	-	-	4,7	4,0
Mg	-	-	-	3,0	2,9	2,6
Na	-	-	-	0,2	-	-
Al	-	-	-	4,4	1,8	-
Fe	-	-	-	4,6	1,9	-
Mn	-	-	-	14,1	13,9	11,2
	g/ha/a					
As	5,2	4,6	19,0	5,3	0,5	<BG
Cd	2,4	1,2	-	0,7	0,8	1,4
Co	-	-	-	0,5	-	2,2
Cr	27	13	22	-	35	21
Cu	245	143	95	79	55	72
Hg	-	-	-	0,31	0,22	0,23
Ni	44	29	18	18	27	18
Pb	149	47	51	24	12	11
Sb	5,9	2,2	-	3,8	-	<BG
Sn	-	-	-	326	-	-
Tl	-	-	-	-	0,2	<BG
V	36	12	-	108	-	-
Zn	293	284	169	197	130	218
	g/ha/a					
16_PAK	1,5	3,0	3,2	1,1	0,7	1,7
12_PAK	1,5	2,8	3,2	1,1	0,8	1,6
8_PAK	0,3	0,6	1,3	0,6	0,4	0,5
4_PAK	0,16	0,14	0,46	0,08	0,16	0,13
6 PCB	5,50	0,05	0,08	0,03	0,04	0,08
g-HCH	0,20	0,28	0,03	0,01	-	<BG
Summe DDT	0,24	0,03	0,04	0,03	0,01	<BG
	TEQ (WHO 2005) µg/ha/a					
TEQ-A	34,9	8,6	6,6	5,7	2,4	-
TEQ-B	34,9	8,5	6,6	5,7	2,3	-

5. Stoffbilanzen

In diesem Kapitel werden die bisher getrennt und durch unabhängige Methoden untersuchten Stoffflüsse bzw. Bodenvorräte zu einem Gesamtbild, den Stoffbilanzen, kombiniert. Erst auf diesem hohen Aggregationsniveau lässt sich die Stoffdynamik eines Standorts vollständig erfassen und die Plausibilität der unabhängig gewonnenen Ergebnisse prüfen.

Kapitel 5.1 und 5.2 sollen dem Leser den Einstieg in die Stoffbilanzen mit ihren hohen Informationsdichten erleichtern.

5.1 Allgemeine Bilanz-Annahmen

In einem Dauermessprogramm genügt es, sich in einer Aufwands-/Nutzen-Abwägung auf die wesentlichen Teilmglieder einer Stoffbilanz messtechnisch zu beschränken. So blieb hier der Stammabfluss unberücksichtigt, der in der Literatur für Kiefer mit ca. 3 - 4 % vom Freilandniederschlag angegeben wird und bei der Buche mit 2 - 20 % (z.B. Peck 2004). Überträgt man diese Anteile auf die Stofffrachten, resultieren für einen Mischwald mit Verhältnis Kiefer zu Buche von 1:1 Minderbefunde von 2 % bis maximal 12 %. Damit hat die Vernachlässigung des Stammabflusses keinen wesentlichen Einfluss auf die Bilanzergebnisse.

Ebenso vernachlässigt wurde der Stofftransport durch Turbation (meist durch wühlende Bodentiere verursacht). Aus dem Bodenprofil mit scharfer Horizontgrenze (Abb. 4.1-1) lässt sich ableiten, dass im vorliegenden sehr sauren Mineralboden Bioturbation keine bedeutende Rolle spielt (von sporadischem Baumwurf abgesehen). Störungen des Auflagehorizonts durch Futter suchende Wildschweine sind für die Beprobungsfläche dokumentiert.

Bei den anorganischen Spurenstoffen lässt sich die Wurzelaufnahme und damit der gesamte Boden-Pflanze-Kreislauf in guter Näherung gleich Null setzen. Das vereinfacht die Bilanzen noch einmal deutlich. Ausnahmen sind die für Pflanzen essentiellen Spurenstoffe Kupfer und Zink. Eine weitere Vereinfachung ergibt sich aus der vollständigen Persistenz der Schwermetalle. Es muss kein Abbau in den Bilanzen berücksichtigt werden.

5.2 Bilanz-Anleitung am Beispiel Blei

Die für diesen Bericht gewählte zentrale Darstellung der Bilanzergebnisse gliedert sich in drei Teile (Abbildung 5.2-1): eine tabellarische Bilanz, ein Balkendiagramm mit der räumlichen Verteilung der Vorräte und den stoffflussbedingten Vorratsänderungen sowie ein Diagramm mit den Zeitreihen der wiederholt gemessenen Bodengehalte.

Die Bilanz gliedert sich in die bilanzierten Systemkompartimente Vegetationsschicht (Veg), die Bodenhorizonte mit den Tiefenstufen Auflage (-5-0 cm), Ah (0-10 cm), Bv (10-30 cm) und Go-Bv (30-60 cm) sowie das Gesamtsystem (Sys). In den Zeitreihen der Bodengehalte sind abweichende Tiefenstufen zu berücksichtigen: die Auflage getrennt in L- und Of+Oh-Horizont, der Aeh-Horizont mit 0-5 cm Tiefe und der Bv-Horizont mit 5-30 cm Tiefe.

Bilanz-Ergebnisse

Der Stofffluss in die Vegetationsschicht (in, Kronenraum) ist gleich dem gemessenen 10-Jahres-Mittelwert des Freiland-Eintrags (Tabelle 3.7-1 bis 3.7-4) multipliziert mit dem Faktor für die Interzeptionsleistung der Vegetation. Dieser beträgt für die sich konservativ verhaltenden Parameter Natrium 1,9 bzw. für Chlorid 2,2 (Tabelle 3.1-1). Der Einfachheit und Nachvollziehbarkeit halber wird der Interzeptionsfaktor im Folgenden für alle Parameter gleich 2 gesetzt. Am Beispiel Blei werden demnach $7,7 \text{ g/ha/a}$ (Tabelle 3.7-3) $\times 2 = 15,4 \text{ g/ha/a}$ in die Vegetation deponiert.

Aus dem Kronenraum ausgetragen werden der Bestandsniederschlag am Messplot FFM_C (BN, Pb = $7,5 \text{ g/ha/a}$) plus die Streufallfracht (FFM_C Streufall Pb = $8,4 \text{ g/ha/a}$) mit insgesamt $15,9 \text{ g/ha/a}$ (Tabelle 3.6-3). Dieser Stofffluss stellt für den Auflagehorizont den Input dar (in). Aus der Auflage werden über das Sickerwasser $94,4 \text{ g/ha/a}$ ausgetragen (Tabelle 3.7-3). Dieser Austrag stellt für das darunterliegende Kompartiment wiederum den Eintrag dar. Dies setzt sich fort bis zur Systemuntergrenze in 60 cm Tiefe, in der $0,4 \text{ g/ha/a}$ Blei das System über das Sickerwasser verlassen.

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Pb	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	15,4	15,9	-	-0,5	-
Aufl.	3516	15,9	94,4	0	-78,5	-22,3
Ah	21496	94,4	10,8	0	83,5	3,9
Bv	40284	10,8	3,1	0	7,7	0,2
Go-Bv	15907	3,1	0,4	0	2,7	0,2
Sys	81203	15,4	0,4	-	15,0	0,2

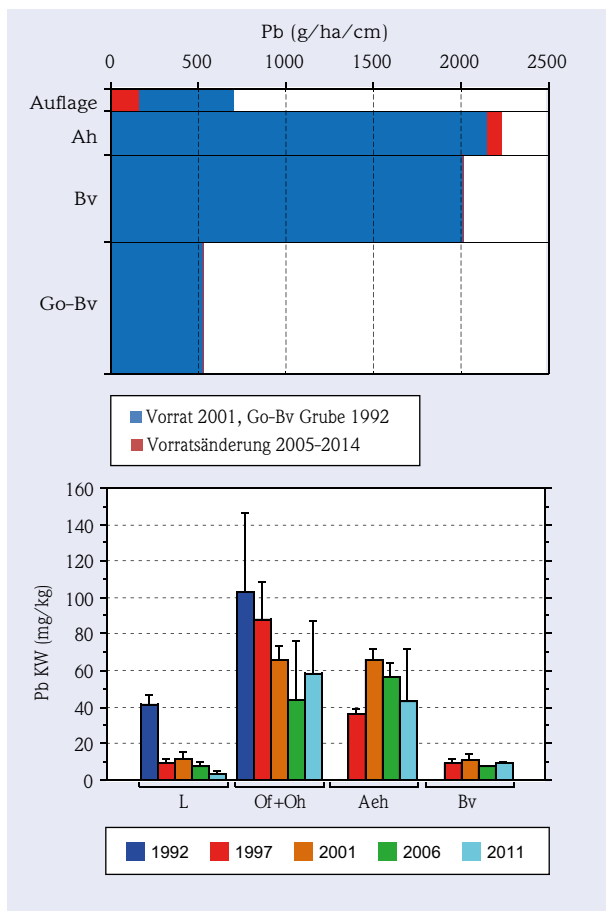


Abb. 5.2-1: Blei-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzelaufnahme).

Aus der Differenz zwischen Input und Output (in minus out) berechnet sich die Vorratsänderung absolut z.B. für die Auflage zu $-78,5$ g/ha/a. Da sich Stoffdynamik am deutlichsten in Relationen zeigt, ist in der Spalte „dV/10a“ zusätzlich die Vorratsänderung in Prozent vom initialen Vorrat (hier: Blei-Vorrat des Jahres 2001) dargestellt, die sich über einen Zeitraum von 10 Jahren (2004-2014) aus der jeweiligen Flussdifferenz ergibt. Im Fall der Auflage nahm also der

Bleivorrat im Zeitraum 2005-2014 um 22,3 % ab. Im Ah-Horizont führt die starke Einwaschung aus der Auflage zu einer Vorratszunahme von 3,9 % innerhalb von 10 Jahren. Im Bv-Horizont akkumulieren noch 7,7 g/ha/a Blei, im Go-Bv-Horizont noch 2,7 g/ha/a. Aufgrund der unterschiedlichen Vorräte jedoch ergibt sich für beide eine relative Änderung von 0,2 % innerhalb von 10 Jahren.

Die Wurzelaufnahme (WA) als weitere Outputgröße für die Bodenkompimente wurde bei Blei auf Null gesetzt. Dies wird durch die Kronenraumbilanz bestätigt, die sich bis auf $-0,5$ g/ha/a aus Deposition in den Kronenraum und Austrag aus demselben vollständig schließen lässt, d.h. im Kronenraum ist keine weitere Blei-Quelle vorhanden, wie dies bei den Nährstoffbilanzen beispielsweise noch der Fall sein wird.

Die tabellarischen Bilanzergebnisse sind in Abbildung 5.2-1 zusätzlich als Balkendiagramme dargestellt. Um hierbei ein realistisches Bild der Blei-Verteilung im Raum zu geben, wurden die Vorräte und Vorratsänderungen in die Einheit g/ha/cm umgerechnet. In dieser Darstellung entsprechen die Flächen der Diagrammbalken den jeweiligen Vorräten bzw. Vorratsänderungen in 10 Jahren der zugehörigen Bilanztafel. Positive Vorratsänderungen stehen rechts, negative links vom zugehörigen Vorratsbalken.

Bei den Zeitreihen der wiederholt gemessenen Bodengehalte (Abbildung 5.2-1 unten) sind deren in Kapitel 4 diskutierten Unsicherheiten zu berücksichtigen (siehe bei Blei z.B. die unplausible, nahezu Verdopplung der Bleigehalte im Aeh-Horizont von 1997 auf 2001). Außerdem sind abweichende Tiefenstufen bei den Bodenkompimenten zu berücksichtigen. Deshalb sind die Zeitreihen stärker hinsichtlich ihrer langfristigen Tendenzen belastbar, als hinsichtlich ihrer Einzelinformationen.

Bilanz-Plausibilität

Aus dem Bilanzdiagramm lässt sich abschätzen, welcher Anteil am Bleivorrat atmosphärisch eingetragen wurde und welcher vom Ausgangsmaterial stammt. Hierzu lässt sich bei Blei grafisch eine Trennlinie bei etwa 500 g/ha/cm ziehen. Vorräte oberhalb von 500 g/ha/a sollten demnach atmogen sein, da beim vorhandenen Bodentyp keine anderen Anreicherungsprozesse anzunehmen sind. Ganz grob geschätzt ergibt sich so etwas mehr als 1.500 g/ha/cm \times 30 cm also 45.000 g/ha atmosphärisch eingetragenes Blei.

Bei der bilanzierten Eintragsrate von 15,9 g/ha/a würden ca. 3.000 Jahre zum Erreichen dieses Vorrats benötigt. Es ist aber bekannt, dass die Bleieinträge vor dem Benzin-Blei-Gesetz (1988, Verbot in Normalbenzin) sehr viel höher waren (am Beispiel Feinstaubgehalt 1986 gegenüber heute um ca. den Faktor 30, LfU Bayern), so dass der atmogene Bleivorrat plausibel durch den Eintrag während der vergangenen 100 Jahre erklärt werden kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Blei ab vielleicht 1950 bis 1987 zwar vornehmlich durch den Kfz-Verkehr in Böden gelangt ist, zuvor und parallel dazu aber zusätzlich von einem Grundstock an anderen Quellen, wie z.B. Industrie auszugehen ist.

Abgleich mit den Bodenfeststoffuntersuchungen

Die Blei-Bilanz weist für die Auflage eine Abnahme von ca. 20 % in 10 Jahren aus. Dies findet sich recht gut - auch quantitativ - in der Gehalts-Zeitreihe von L- und Of+Oh-Horizont wieder, wenn man eine mittlere Ausgleichsgerade durch diese legt. Die bilanzierte ca. 4 % Zunahme im Ah-Horizont steht vordergründig im Widerspruch zur Zeitreihe, die ab 2001 eine nicht signifikante Abnahme beim Aeh-Horizont zeigt. Man könnte auch eine Ausgleichsgerade durch die gesamte Zeitreihe von 1997 bis 2011 legen. Diese würde die bilanzierte leichte Zunahme bestätigen. Die für den Bv-Horizont bilanzierte Zunahme von 0,2 % in 10 Jahren ist zu gering, als dass sie über Gehaltsmessungen detektiert werden könnte, steht aber in Einklang mit der als konstant interpretierbaren Zeitreihe. Insgesamt zeigt sich hiermit eine widerspruchsfreie bis quantitative Übereinstimmung und damit Bestätigung der Bleibilanz.

Fazit Bleibilanz

Die Bleibilanz erweist sich als quantitativ plausibel. Es zeigt sich aktuell eine Verlagerung früher eingetragener Bleivorräte maßgeblich von der Auflage in den Ah-Horizont. Der Auflagevorrat verringert sich deutlich, da die Auswaschung den Neueintrag überwiegt, bis zur künftigen Einstellung eines neuen Fließgleichgewichts. Auf einem geringeren Niveau, mit 0,4 % pro 10 Jahre, wird Blei aber weiterhin im Gesamtsystem akkumulieren, da nahezu ein quantitativer Rückhalt zu beobachten ist, der auf die bekannt geringe Löslichkeit der Bleiverbindungen auch in sauren Böden zurückgeführt werden kann.

5.3 Abschätzung des Auflagealters aus der Bleibilanz

Über das Auflagealter (Of, Oh) lässt sich der Stofffluss aus der Auflage auch für die Parameter abschätzen, für die eine Messung im Sickerwasser bislang nicht möglich ist, d.h. speziell für die organischen Spurenstoffe. Aufgrund der deutlichen Reduktion des Bleieintrags um das Jahr 1988 eignet sich Blei als Tracer zur Datierung des Auflagealters. Extrapoliert man die beobachtete Zeitreihe der Bleigehalte in der Auflage gegen Null, würde ein Alter von 30 bis 50 Jahren resultieren, je nach dem, wie man hier eine Ausgleichsgerade legt. Dabei wird von einem schichtweisen Abbau der Auflage ausgegangen, nicht von einem Abbau, der vom Vorrat abhängt. Da aber weiterhin Blei eingetragen und dadurch die Vorratsabnahme verlangsamt wurde, muss das tatsächliche Auflagealter geringer sein. Als Schätzwert für die später folgenden Bilanzen der organischen Spurenstoffe wird von 30 Jahren ausgegangen. An einem vergleichbaren Standort wurden mit dem selben Ansatz 20 - 25 Jahre geschätzt (LUBW 2009).

5.4 Bilanzen weiterer anorganischer Spurenstoffe

Die **Cadmium-Bilanz** (Abbildung 5.4-1) kann als analog zur Blei-Bilanz betrachtet werden. Der Unterschied besteht in der geringeren Stabilität der Cadmium-Vorräte aufgrund der besseren Löslichkeit des Cadmiums. Das atmosphärisch eingetragene Cadmium durchwandert den Boden leichter, wobei der Bv-Vorrat aktuell ab- und der Go-Bv-Vorrat deutlich zunimmt. Die Kronenraumbilanz ist mit -0,33 g/ha/a leicht negativ. Einen Boden-Pflanze-Kreislauf auszuschließen ist deshalb plausibel. Bedingt durch die ebenfalls deutlichen Reduktionen der Cadmium-Einträge seit Ende der 1980er Jahre zeigt sich in der aktuellen Cadmium-Bilanz der Übergang von einer Akkumulationsphase hin zu einem Fließgleichgewicht. Bei Fortgang der jüngsten Entwicklung wird der Systemaustrag den Systemeintrag übersteigen. Allein auf Basis der Wiederholuntersuchungen im Feststoff sind Tendaussagen bei Cadmium nicht abzusichern. Vor dem Hintergrund der Bilanz-Ergebnisse können sie aber als Bestätigung in Bezug auf die bilanzierten Trends gewertet werden.

Die **Nickel-Bilanz** zeigt die für Nickel typische, dominierend geogene Prägung, zu erkennen an den nach unten zunehmenden Vorräten. Dennoch spielt atmosphärischer Eintrag eine Rolle. Die Kronenraumbilanz ist mit $-11,2 \text{ g/ha/a}$ gemessen am Gesamteintrag auffallend negativ. Hier ist es so, dass die Streufrachten möglicherweise überschätzt sind, aufgrund eines untypisch hohen Einzelwertes 2013. Nach Korrektur verbliebe aber dennoch eine merklich negative

Bilanz. Wahrscheinlich trifft die aus dem Verhalten von Natrium und Chlorid abgeleitete Berechnung des Gesamteintrags als Freilandeintrag multipliziert mit 2 für Nickel nicht genau zu. Zwar zählt Nickel zu den essentiellen Spurenelementen bei Pflanzen, eine Wurzelaufnahme vom Betrag der Kronenraumbilanz wäre aber einerseits hoch gegriffen und würde andererseits die Auflage in ein deutliches Minus bringen, das sich in der Gehaltszeitreihe 2001 bis 2011 nicht

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Cd	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	1,3	1,7		-0,33	-
Aufl.	24	1,7	2,0	0	-0,28	-11,8
Ah	35	2,0	1,5	0	0,43	12,1
Bv	65	1,5	1,6	0	-0,03	-0,5
Go-Bv	75	1,6	1,3	0	0,30	3,9
Sys	199	1,3	1,3		0,08	0,4

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Ni	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	16,5	27,7		-11,2	-
Aufl.	601	27,7	28,4	0	-0,7	-1,2
Ah	5847	28,4	26,8	0	1,7	0,3
Bv	17064	26,8	22,0	0	4,8	0,3
Go-Bv	36122	22,0	16,3	0	5,7	0,2
Sys	59634	16,5	16,3		0,3	0,0

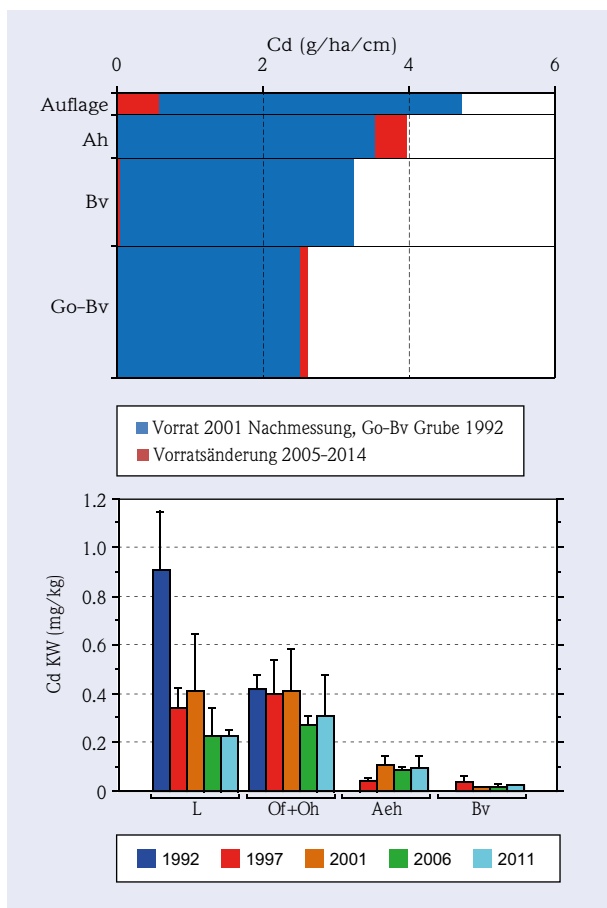


Abb. 5.4-1: Cadmium-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzelaufnahme).

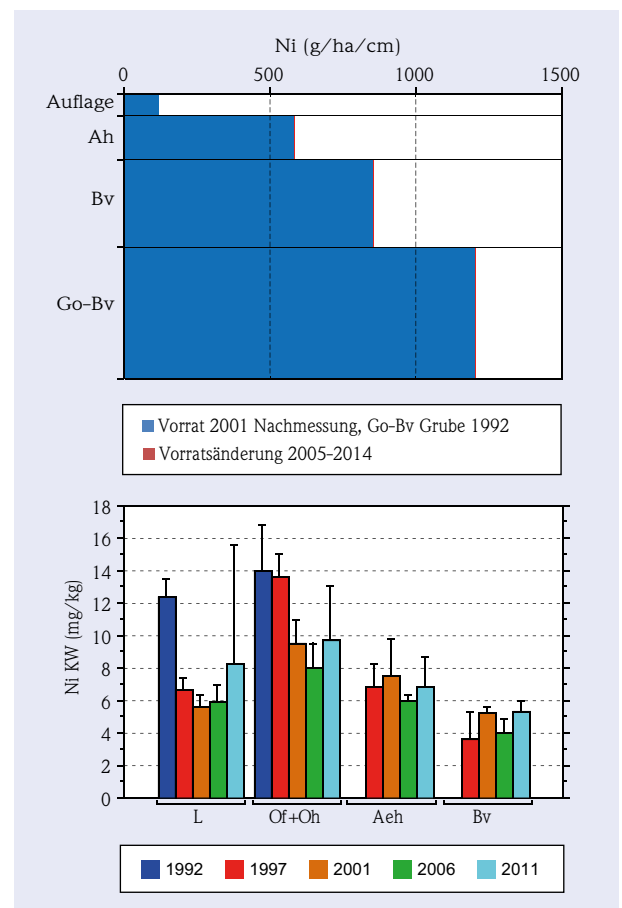


Abb. 5.4-2: Nickel-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzelaufnahme).

wiederfindet. Dort zeigen sich eher gleichbleibende Verhältnisse, wie sie in der Bilanz auch im Mineralboden zum Ausdruck kommen.

Atmosphärischer Gesamteintrag und Systemaustrag halten sich bei Nickel gegenwärtig in der Waage, so dass Fließgleichgewicht herrscht. Atmosphärisches Nickel wurde in der Vergangenheit nicht in bestimmten Bodenhorizonten akkumuliert, sondern im gesamten Solum verteilt. Bei weiter nachlassenden Nickel-Einträgen werden die Vorräte im System durch Sickerung in tiefere Bodenschichten sehr langsam abnehmen.

Kobalt ähnelt Nickel in seiner geogenen Prägung. Bei geringfügigem atmosphärischem Einfluss ist im Wesentlichen die Auflösung geogener Vorräte mit Nettoverlust im System zu beobachten. Für Kobalt gibt es keine Zeitreihen im Feststoff.

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Co	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	2,6	3,2		-0,6	-
Aufl.	-	3,2	6,8	0	-3,6	-
Ah	2420	6,8	8,9	0	-2,1	-0,9
Bv	8305	8,9	20,9	0	-12,0	-1,4
Go-Bv	15030	20,9	13,3	0	7,6	0,5
Sys	25755	2,6	13,3	0	-10,7	-0,4

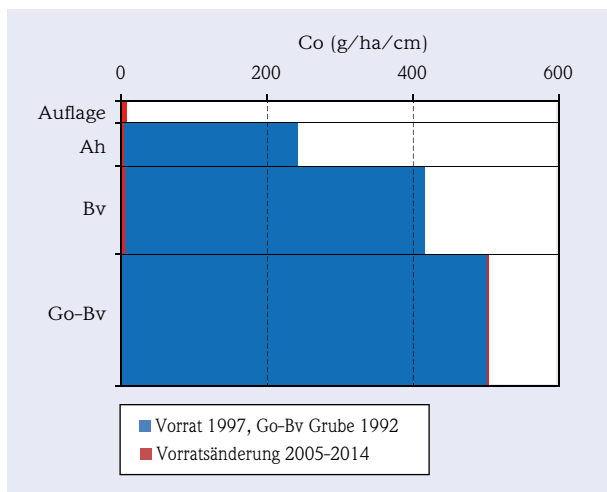


Abb. 5.4-3: Kobalt-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014, Feststoffuntersuchungen bisher nur einmalig (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzel Aufnahme).

Zink gehört zu den essentiellen Spurenelementen für Pflanzen. Dies kommt in der mit $-89,1 \text{ g/ha/a}$ deutlich negativen Kronenraumbilanz zum Ausdruck. Auch zeigt die Auflage-Zeitreihe eine belastbare Abnahme von ca. 10 % in 20 Jahren an, die in der Bilanz nur durch zusätzliche Wurzel Aufnahme von 140 g/ha/a dargestellt werden kann ($-4,8 \%$ in 10 Jahren). Nadel- bzw. Blattgehalte nach LWF (2014) machen einen systemischen Umsatz von $70 - 240 \text{ g/ha/a}$ Zink bei Kiefer/Eiche denkbar. In der vorliegenden

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Zn	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	280	370		-89,1	-
Aufl.	2614	370	242	140	-12,5	-4,8
Ah	13469	242	171	0	71,0	5,3
Bv	36115	171	137	0	33,9	0,9
Go-Bv	70340	137	91	0	46,0	0,7
Sys	122539	281	91		189,3	1,5

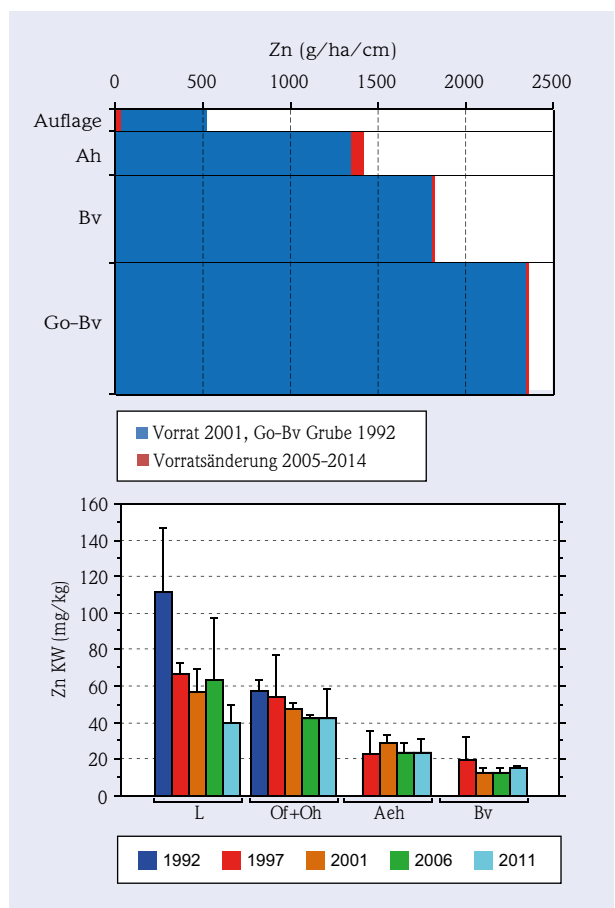


Abb. 5.4-4: Zink-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzel Aufnahme).

den Zink-Bilanz wird also ca. 50 g/ha/a mehr Zink dem Boden über die Wurzeln entzogen, als an diesen wieder über Bestandsniederschlag und/oder Streufall abgegeben wird (140 minus 89,1 g/ha/a). Dieser Betrag wäre dem Bestandeszuwachs zuzuschlagen. Vergleichswerte aus der Forstwirtschaft konnten nicht gefunden werden. Der Entzug durch Zuwachs läge damit bei etwa der Hälfte dessen, was pro Jahr durch eine Kupfer-sparende Kultur wie z.B. Sommerfutterraps dem Boden entzogen wird (LVWO 2005), was durchaus plausibel wäre. Andererseits könnte auch die atmosphärische Gesamtd deposition höher sein, die ja einen Schätzwert aus Freilanddeposition mal Interzeptionsfaktor 2 darstellt. Möglicherweise spielt beides eine Rolle, wodurch aber auch einmal mehr die Grenzen der quantitativen Belastbarkeit der Bilanz-Methode zum Ausdruck kommt.

Zink stellt sich demnach als primär geogen dar, mit messbarer atmosphärischer Überprägung. In der jüngeren Vergangenheit abnehmende Einträge führen lediglich zu Abreicherung aus der Auflage, das Gesamtsystem bleibt weiterhin über das Gesamtsolum hinweg akkumulierend. Für eine ausgeglichene Bilanz wären Reduktionen auf ein Drittel der derzeitigen Einträge erforderlich. Wegen möglicherweise hohen Zink-Vorräten in der Vegetationsschicht spielt die Nutzungsform (Verbleib der Erntereste) in einer Gesamtbilanz eine Rolle, ganz analog zu den klassischen Nährstoffen.

Die **Kupfer-Bilanz** fällt auf durch relativ hohe Akkumulationsraten speziell im Ah- aber auch Bv-Horizont. Die Kupfer-Einträge sind zwar rückläufig im Bilanzzeitraum, aber immer noch vergleichsweise hoch. Dadurch befindet sich das System aktuell im Übergang von geogener hin zu atmosphärischer Dominanz. Die großen relativen Kupferzuwachsrate der letzten 10 Jahre weisen darauf hin, dass die Kupfereinträge noch nicht lange in dieser Größenordnung eingewirkt haben können. Dies ist ein weiterer Beleg für die Herkunft aus dem Flugbetrieb (Startbahn West ab 1984 in Betrieb).

Extrapoliert man den Gesamteintrag von 163 g/ha/a während des Bilanzzeitraums im Verhältnis der gemessenen L-Gehalte rückwärts bis 1984 lassen sich mittlere ca. 300 g/ha/a mal 30 Jahre bzw. 9.000 g/ha an atmosphärischem Eintrag abschätzen. Damit stammt etwa die Hälfte des aktuellen Kupfer-Vorrats im Ah- und Bv-Horizont (ca. 600 g/ha/a mal 30 cm

= 18.000 g/ha) aus atmosphärischem Kupfer seit Inbetriebnahme der Startbahn West.

Bei der Kupferbilanz bestehen besondere quantitative Unsicherheiten, da bei Kupfer ein Gradient in Abhängigkeit von der Startbahndistanz vorliegt. Deshalb kann die atmosphärische Gesamtd deposition nicht wie bei den anderen Stoffen aus der Freilanddeposition an FFM_A abgeschätzt werden. Stattdessen wurde die Freilanddeposition für FFM_C aus der Beobachtung abgeleitet, dass bei den anorganischen Spurenstoffen

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Cu	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	(163)	142		20,7	-
Aufl.	3219	142	128	70	-55,9	-17,4
Ah	6299	128	46	0	82,3	13,1
Bv	11567	46	5	0	41,4	3,6
Go-Bv	18913	5	2	0	2,3	0,1
Sys	39998	163	2		160,9	4,0

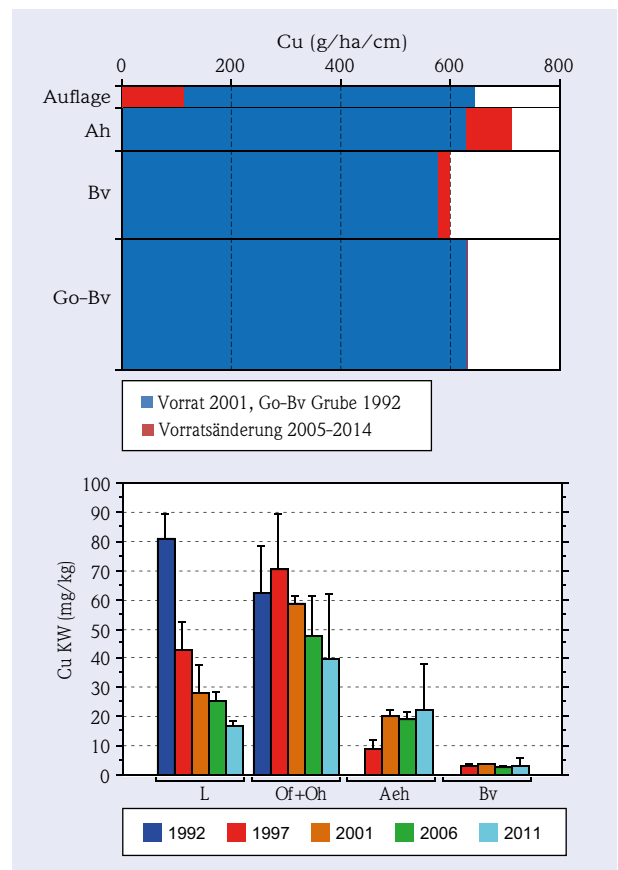


Abb. 5.4-5: Kupfer-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsrate der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzelaufnahme).

die Freilanddepositionen im Mittel ähnlich groß sind, wie die Depositionen über die Bestandesniederschläge. Vorliegend wurde also für Kupfer der Bestandesniederschlagseintrag mal 2 für die Gesamtdeposition verwendet. Dies führt bei der Kronenraumbilanz zu einem positiven Wert, der aber korrigiert werden kann, weil Kupfer als Parameter mit abnehmendem Trend aufgrund der später beginnenden Zeitreihe im Streufall unterschätzt wird.

Unplausibel hoch erscheint die Wurzel Aufnahme von 70 g/ha/a (Streu-korrigiert wären es 90 g/ha/a), die sich aus der Anpassung der Bilanz an die beobachtete, recht gut abgesicherte Gehaltsabnahme in der Auflage ergibt (ca. 30 % in 20 Jahren). Denn abgeleitet aus den Nadel- und Blattgehalten nach LWF (2014) können für Kiefer/Eiche nur zwischen 12 und 30 g/ha/a Kupfer für den systemischen Kreislauf angesetzt werden. Demnach müssten nach der vorliegenden Bilanz mindestens 40 g/ha/a Kupfer in den Bestandeszuwachs gehen. Ob dies realistisch ist, z.B. weil übersättigte Pflanzen verstärkt aufnehmen, kann hier nicht entschieden werden. Sommerfutterraps z.B. entzieht 48 g/ha/a Kupfer durch Ernte (LVWO 2005). Möglicherweise ist die zu hoch erscheinende Wurzel Aufnahme auch nur Ausdruck messtechnischer Unsicherheiten bei Kupfer. Da ein Gradient zur Startbahn vorliegt, wäre es auch möglich, dass die Kupfereinträge an der weiter entfernten Beprobungsfläche stärker abgefallen sind als im Bereich des Sickerwassermessfeldes, für das die ermittelten Sickerfrachten streng genommen nur gelten. Es bleiben also in quantitativer Hinsicht Fragen offen, die die oben ausgeführten Überlegungen jedoch im Grundsatz nicht berühren.

Die geschätzten Gesamteinträge ins System liegen bei 163 g/ha/a, ein Austrag findet praktisch nicht statt. Zum Vergleich: Kupfereinträge aus Pflanzenschutz liegen bei 2 kg/ha/a im ökologischen Kartoffelanbau und bei ca. 0,5 kg/ha/a als Abschluss-spritzung im konventionellen Weinbau (UBA 2005 a). Der Nettoeintrag in Ackerböden allein durch Düngung wird im Mittel der Betriebe auf ca. 100 g/ha/a geschätzt (SLfL 2007). Trotz sinkender Einträge akkumuliert Kupfer demnach auch weiterhin relativ stark. Es wird schon im Bv-Horizont nahezu quantitativ zurückgehalten. Weiter sinkende Einträge führen lediglich zu sinkenden Akkumulationsraten. Wegen merklicher Pflanzenbeteiligung sind Nutzungsaspekte bei Langzeitbilanzen einzubeziehen. Die Kupfergehalte liegen

im Ah-Horizont (0-10 cm Tiefe) mit schätzungsweise 10 mg/kg noch unter dem Vorsorgewert von 20 mg/kg (Bodenart Sand) und werden diesen bei gleichbleibenden Verhältnissen in etwa 70 Jahren überschreiten. Da aber die zulässige zusätzliche Fracht von 360 g/ha/a nach BBodSchV eingehalten wird, wäre dies rechtlich nicht zu beanstanden.

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Cr	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	14,8	27,7		-12,9	-
Aufl.	434	27,7	9,5	18,2	0,0	0,0
Ah	7465	9,5	9,5	0	0,0	0,0
Bv	22961	9,5	0,9	0	8,6	0,4
Go-Bv	32189	0,9	0,4	0	0,5	0,0
Sys	63050	14,8	0,4		14,5	0,2

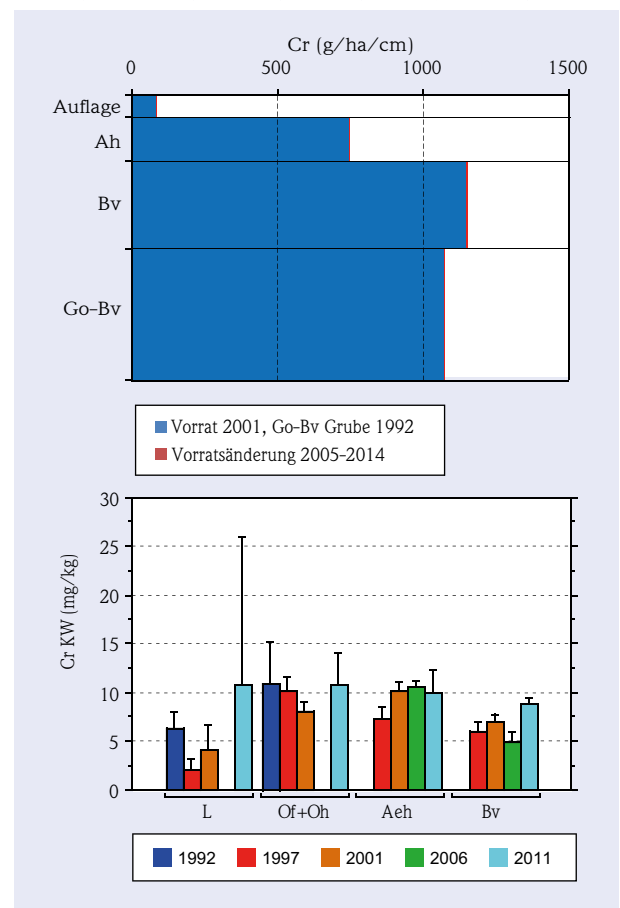


Abb. 5.4-6: Chrom-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzel Aufnahme).

Chrom zeigt sich in der Bilanz als erwartungsgemäß geogen dominiert. Ein atmogener Einfluss ist sichtbar, wobei die Akkumulation derzeit im Wesentlichen im Bv-Horizont stattfindet. Die Gehalts-Zeitreihen bestätigen die sehr geringen Änderungsraten. Auffallend ist lediglich die negative Kronenraumbilanz, die auf eine Beteiligung des Boden-Pflanze-Kreislaufs hindeutet. Chrom zeigt einen auffallend hohen Wert an FFM_C mit 41 g/ha/a im Jahre 2013. Schließt man diesen von der Mittelwertbildung aus, verringert sich der Wert um rund 8 g/ha/a. Selbst dann müsste noch eine Wurzel Aufnahme von ca. 10 g/ha/a angenommen werden, um mit der horizontalen Gehalts-Zeitreihe in Einklang zu kommen. Ohne Wurzel Aufnahme entstünde in der Auflage eine Zunahme um ca. 20 % in 10 Jahren, die der beobachteten Gehaltszunahme von 2001 auf 2011 ziemlich genau entspricht. In der Literatur wird Chrom als essentieller Pflanzennährstoff zwar diskutiert, bislang scheinen aber weder Befunde noch Messdaten vorzuliegen. Die vorliegende Chrom-Bilanz mag als Hinweis auf eine geringe systemische Rolle des Chrom dienen oder, wahrscheinlicher, als Maßstab für die verbleibenden messtechnischen Unsicherheiten. Insgesamt akkumuliert Chrom weiterhin praktisch unmerklich im System.

Arsen war wegen Gehalten kleiner der Bestimmungsgrenze im Streufall bisher nicht quantifizierbar. Auf Basis des bei den anorganischen Spurenstoffen zu beobachtenden mittleren Zusammenhangs, dass die Bestandseinträge gleich hoch wie die Streueinträge sind, wurde als Näherungswert der Bestandeseintrag verwendet. Der Vegetations-Output 2004-2014 wurde damit auf 1,63 g/ha/a mal 2 abgeschätzt. Laut Abschätzung der Streufallfrachten aus L-Lage-Vorräten (Tabelle 4.2-4) ergibt sich 5,3 g/ha/a für 2006 und 0,5 g/ha/a für 2011, so dass diese Schätzung für den Zeitraum 2005-2014 in einem plausiblen Wertebereich liegt.

Trotz der Unsicherheit beim Streufall kann die ausgewiesene Bilanz im Gesamteindruck als plausibel angesehen werden. Denn Arsen erweist sich, wie zu erwarten, geogen dominiert mit geringem atmogener Einfluss. Vor dem Hintergrund abnehmender Arsen-Einträge vor Messbeginn 2004 (z.B. LfU Bayern 2015) ist der Vorratsabbau in der Auflage von knapp 9 % in 10 Jahren plausibel, ebenso die langsame Akkumulation, die sich im gesamten Mineralboden zeigt und gut mit der Löslichkeit des Arsens in Einklang

steht. Die Gehaltszeitreihen sind bei Arsen wegen starker Sprünge wenig belastbar und stehen mit der Bilanz nicht in Widerspruch.

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
As	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	2,6	(3,3)		-(0,7)	-
Aufl.	324	(3,3)	6,2	0	-(2,9)	-8,9
Ah	4388	6,2	4,8	0	1,4	0,3
Bv	10800	4,8	1,2	0	3,6	0,3
Go-Bv	13260	1,2	0,4	0	0,8	0,1
Sys	28772	2,6	0,4	0	2,2	0,1

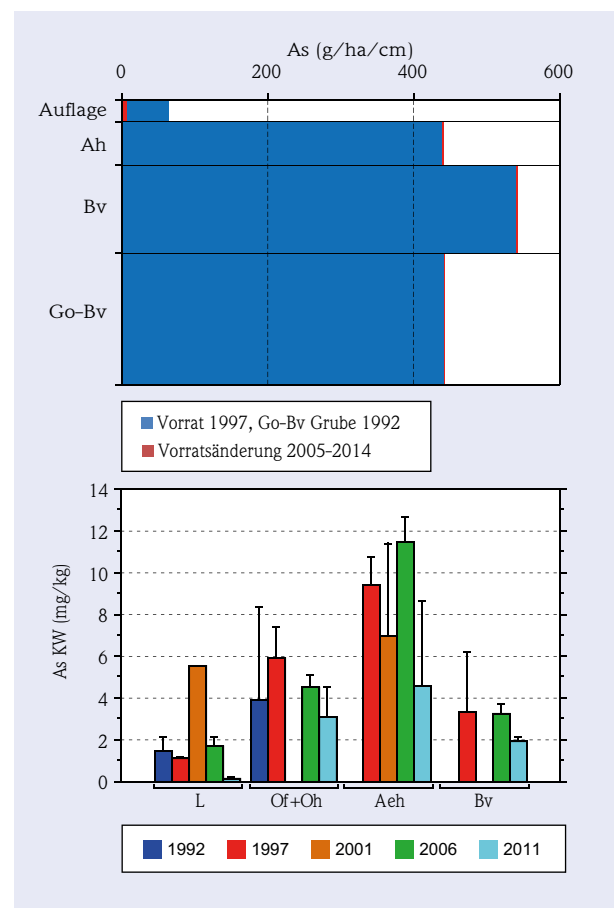


Abb. 5.4-7: Arsen-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzel Aufnahme).

Antimon wurde im Streufall bisher nur ein einziges Mal größer der Bestimmungsgrenze gemessen (vermutlich ein Ausreißer), sonst zwischen $< 2,3$ und $< 0,9$ g/ha/a (Anhang A-4). Bei der dargestellten Bilanz wurde der Gesamteintrag in die Auflage (BN + Streufall) deshalb gleich $2,61$ g/ha/a gesetzt, um die Kronenraumbilanz auszugleichen. Die Streufracht ergibt sich so bei einer Bestandesdeposition von $1,93$ g/ha/a rechnerisch zu $0,68$ g/ha/a, die rückblickende Abschätzung aus den L-Vorräten gemäß Tabelle 4.2-4 bringt mit $5,9$ g/ha/a bis $< BG$ keine Klärung.

Hor	Vorrat	in	out	WA	in-out	dV/10a
Sb	g/ha/Hor	g/ha/a				%
Veg	n.b.	2.61	(2.61)		0.00	-
Aufl.	53	2.61	2.07	0	0.54	10.3
Ah	356	2.07	0.94	0	1.13	3.2
Bv	832	0.94	0.07	0	0.87	1.0
Go-Bv	284	0.07	0.03	0	0.04	0.2
Sys	1524	2.6	0.0		2.59	1.7

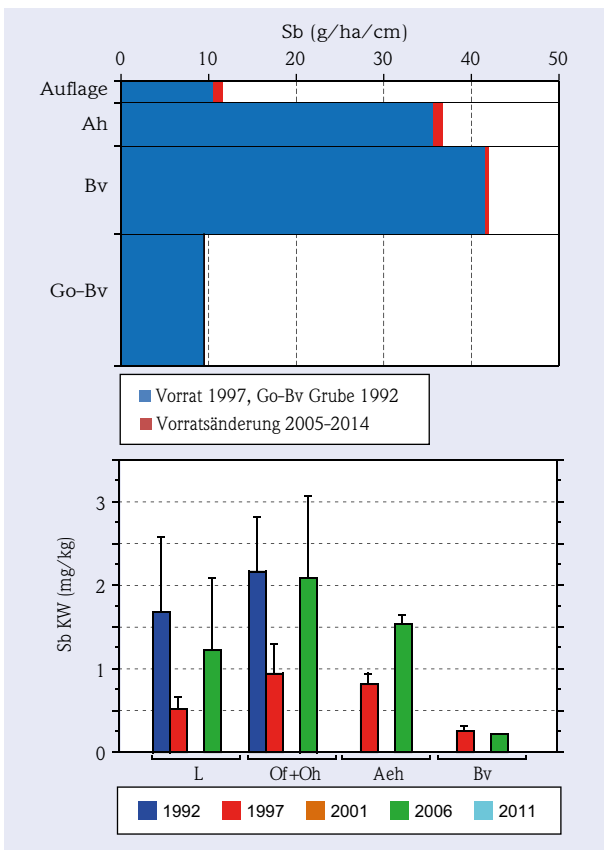


Abb. 5.4-8: Antimon-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsdaten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen (n.b. = nicht bestimmt, WA = Wurzelaufnahme).

Antimon wird seit 1993 als Ersatz für das verbotene Asbest in Bremsbelägen eingesetzt und gelangt seither um diesen zusätzlichen Pfad verstärkt in Böden. In der Deposition wurde 2008 bis 2014 eine leichte Abnahme gemessen (Abb. 3.2-3), die sich z.B. auch an Hintergrundmessstellen Bayerns schon ab 1999 zeigt (LfU Bayern 2015). Trotz dieses jüngsten Rückgangs der Antimon-Einträge kann die bilanzierte Zunahme von 10% in 10 Jahren in der Auflage plausibel sein. Denn Antimon wurde erst ab ca. 1993 verstärkt eingetragen, so dass dieser Impuls in der geschichteten 30 -jährigen Auflage noch nicht als Auflage-Output zur Wirkung kommt. Dementsprechend zeigt Abbildung 3.6-1 bei Antimon auch zunehmende Sickerfrachten im Bilanzzeitraum.

Ordnet man alle Vorräte oberhalb 10 g/ha/cm dem atmosphärischen Eintrag zu, wären das ca. 30 g/ha/cm \times 30 cm = 900 g/ha Antimon. Bei aktuellen Einträgen von rund 3 g/ha/a hätte es ca. 300 Jahre gedauert, diesen Vorrat aufzubauen. Laut LfU Bayern (2015) lagen die Antimon-Depositionen im Hintergrundbereich 1999 knapp dreifach höher als im Bilanzzeitraum 2005-2014. Messungen von Schnee- und Eisproben aus der kanadischen Arktis zeigen einen Anstieg in den letzten dreißig Jahren um 50% gegenüber einem anthropogenen Grundstock (Krachler et. al. 2005). Für den Mineralboden kann die Bilanz deshalb insgesamt als plausibel eingestuft werden, wenn neben dem Bremsabrieb jüngerer Zeit weitere Emissionsquellen in Betracht gezogen werden, wie z.B. Verhüttung, die schon über lange Zeiträume zum Eintrag in Böden beigetragen haben.

Der Abgleich mit der Zeitreihe der Antimon-Gehalte zeigt, dass auch bei den Feststoffuntersuchungen methodische Unsicherheiten bestehen. Selbst wenn man die Analysenwerte 1992 als Ausreißer bewertet, wären die Verdopplungen von 1997 auf 2006 in Auflage und Aeh-Horizont nicht plausibel.

Im deutlich durch anthropogene Deposition überprägten Gesamtsystem wird Antimon selbst bei künftig weiter sinkenden Einträgen noch lange akkumulieren, da es bei den gegebenen sauren Bodenverhältnissen kaum ausgeglichen wird.

Für **Vanadium**, **Zinn**, **Thallium** und **Quecksilber** können mangels ausreichender Stoffflussdaten keine Bilanzen berechnet werden.

5.5 Bilanzen organischer Spurenstoffe

Im Folgenden wird nur auf die organischen Parameter eingegangen, für die Bilanzen sinnvoll berechnet werden konnten. Da keine Sickerfrachten vorliegen, wurden diese wie folgt geschätzt: Für den Austrag aus der Auflage wurde auf das aus der Bleibilanz geschätzte Alter der Auflage von 30 Jahren zurückgegriffen. Unter der Annahme, dass der Auflage-Output dadurch entsteht, dass fest gebundene Organik durch Mineralisierung der Auflage in das Sickerwasser freigesetzt wird, wurde dieser aus dem Auflagevorrat geteilt durch 30 Jahre berechnet. Aufgrund der in den Gehaltsprofilen sichtbaren Verteilung der organischen Spurenstoffe, die im Bv-Horizont kaum mehr quantifizierbar sind, wurde der Austrag aus dem Ah-Horizont vereinfachend gleich Null gesetzt. Input-Flüsse wurden für PAK vollständig gemessen, für PCB nur in der Streu. Es zeigt sich, dass die PAK-Frachten über den Streufall und diejenigen über den Bestandesniederschlag ähnlich hoch sind. Die Übertragung dieses Zusammenhangs auf PCB ergibt für den Gesamteintrag in die Auflage den PCB-Streufachtwert multipliziert mit 2. Bei den Dioxinen und Furanen wurde ein mittlerer Freiland-Wert für Gebiete ohne besondere Belastung für den Zeitraum nach dem Jahr 2000 von $3 \text{ pg/m}^2/\text{d}$ aus UBA (2005 b) übernommen und zur Berücksichtigung der Streufracht zum Gesamteintrag in die Auflage verdoppelt.

Es wird bei den organischen Parametern davon ausgegangen, dass diese nicht am Boden-Pflanze-Kreislauf beteiligt sind. Dadurch bleibt das Vegetationskompartiment unberücksichtigt.

Die **PAK-Bilanz** macht zunächst die typische Verteilung nichtmobiler Schadstoffe ohne geogenen Anteil in Böden deutlich. Den Vorrat im Go-Bv-Horizont auf Null zu schätzen, kann angesichts der Verteilung im Profil als gerechtfertigt gelten. Die Bilanz ist nur leicht kongenerenspezifisch, was z.B. aus den geringfügigen Änderungsraten der verschiedenen PAK-Summenparametern hervorgeht. Im Mittel einheitlich zeigt sich eine deutliche Abnahme des Auflage-Vorrats um die 20 % in 10 Jahren sowie eine Zunahme im Ah-Horizont um ca. 7 % in 10 Jahren.

Hor	Tiefe	Vorrat	in	out	in-out	dV/10a
	cm	g/ha/Hor	g/ha/a			%
16_PAK						
Aufl.	-5-0	133	2,07	(4,43)	-(2,36)	-(17,8)
Ah	0-10	574	(4,43)	(0,00)	(4,43)	(7,7)
Bv	10-30	40				
Go-Bv	30-60	0				
Sys	O-60	746	2,07	(0,00)	(2,07)	(2,8)
12_PAK						
Aufl.	-5-0	132	1,66	(4,39)	-(2,74)	-(20,8)
Ah	0-10	569	(4,39)	(0,00)	(4,39)	(7,7)
Bv	10-30	40				
Go-Bv	30-60	0				
Sys	O-60	740	1,66	(0,00)	(1,66)	(2,2)
8_PAK						
Aufl.	-5-0	83	0,57	(2,78)	-(2,21)	-(26,5)
Ah	0-10	376	(2,78)	(0,00)	(2,78)	(7,4)
Bv	10-30	26				
Go-Bv	30-60	0				
Sys	O-60	485	0,57	(0,00)	(0,57)	(1,2)

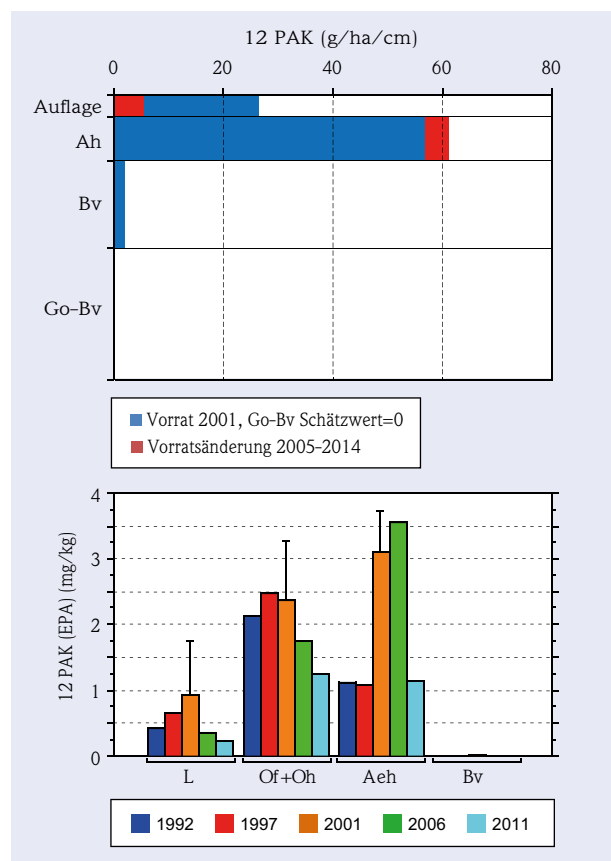


Abb. 5.5-1: 12 PAK Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen. Werte in Klammern = Schätzwerte.

Tendenziell plausibel wird die Bilanz über die Betrachtung des Gesamtsystems. Bei aktuellen Einträgen würden für den Aufbau des gesamten System-Vorrats bei 16 PAK 360 Jahre benötigt, bei 12 PAK 447 Jahre und bei 8 PAK 847 Jahre (jeweils Min-Szenarien mit Werten $< BG = 0$). Die Unterschiede könnten auf einen stärkeren Abbau der kurzzeitigen PAK in Böden hindeuten. Da aber 8 PAK in der Auflage auch die stärksten Abnahmen zeigt, ist eine systematische Unterschätzung der langzeitigen PAK bei der Bestimmung der Einträge die wahrscheinlichere Ursache (mutmaßlich Streufallanalytik). Die PAK-Einträge lagen in der Vergangenheit mit Sicherheit deutlich höher (rauchende Schornsteine, anhand von Bodenseesedimenten ca. um den Faktor 3 (Gocht 2005)), so dass die Größenordnungen in der PAK-Bilanz mit Entstehungszeiträumen von ca. 120 bzw. 150 und 280 Jahren zumindest nicht unplausibel erscheinen. Der im Messverfahren für die PAK-Deposition festgestellte Minderbefund mit 80 % Wiederfindung reduziert diese Zeiten auf 80 %, spielt also in der Bilanzbetrachtung insgesamt nur eine geringe Rolle.

Der Abgleich mit den Zeitreihen der Feststoffanalysen kann in zwei Richtungen interpretiert werden (gezeigt an 12 PAK, die die Summe mit besserer Bodenrelevanz darstellt): Einmal als eine gute Übereinstimmung in der Tendenz, wobei Bilanz-Feinheiten in den Messunsicherheiten der Feststoffanalytik untergehen. Man kann die Zeitreihe aber auch als quantitativ ziemlich verlässlich ansehen, denn sie zeichnet ein plausibles Bild: Demnach hätten die Einträge im Sinne der L-Gehalte bis 2001 zugenommen, danach wieder ab. Of+Oh zeichnen diesen Verlauf gut nach. Im Aeh weisen drei Werte auf der Zeitachse auf Konstanz hin, 2001 und 2006 wären als Ausreißer anzusehen. Bestimmungsgrenzen-Effekte beeinflussen die Zeitreihe nicht. Eine solche sinnvolle Abfolge ist durch Stichprobenzufall nicht gut zu erklären. Die Gehalts-Abnahme im Of+Oh kann von 2001 bis 2011 auf knapp 50 % geschätzt werden, das ist deutlich mehr als die bilanzierten 20,8 %. Folgt man der zweiten Sichtweise, wäre durch die Annahme eines PAK-Abbaus eine bessere Übereinstimmung mit der Bilanz erzielbar. Die Abbauraten würden demnach unter derzeitigen Bedingungen bei ca. 7 % im Ah-Horizont und ca. 30 % innerhalb von 10 Jahren für die Auflage liegen. Letztlich ist dies kein Beweis für einen PAK-Abbau, sondern lediglich ein Hinweis. Problematisch ist eine Konsequenz aus der Abbau-Annahme. Es würden gegenwärtig 4,39 g/ha/a allein

im Ah abgebaut. Die historischen PAK-Einträge hätten also zumindest um diesen Betrag noch höher sein müssen, um den Gesamtvorrat aufzubauen. Möglich wäre das unter besonderen Bedingungen (z.B. Emittentennähe, Köhlerei), erscheint aber am Standort unwahrscheinlich.

In der Literatur wird über die unterschiedlichsten Abbauraten bzw. Halbwertszeiten von PAK in Böden meist unter Laborbedingungen berichtet. Es wird aber andererseits auch aus den großen vorhandenen Vorräten im Verhältnis zu historischen Einträgen auf eine gute in-situ-Stabilität der PAK in Böden geschlossen (z.B. Gocht 2005).

Da letztlich mit den vorhandenen Daten nicht entscheidbar, wird hier der Bilanz ohne Abbau der Vorzug gegeben, da sie dem Vorsorgeprinzip Rechnung trägt. PAK akkumulieren demnach im Gesamtsystem mit einer Rate von ca. 2 % in 10 Jahren. Bei den Einträgen sind jüngst auch wieder Anstiege zu beobachten, die sehr wahrscheinlich auf vermehrte Holzfeuerung zurückzuführen sind. Die Prognose ist demnach abhängig von der weiteren Entwicklung der PAK-Emissionen.

In der **6 PCB-Bilanz** ist der Input in die Auflage ein Schätzwert aus gemessenen Streufall-Einträgen plus dem gleichen Wert für den Eintrag über den Bestandsniederschlag. Mit diesen Werten ergibt sich eine bilanzierte Vorratszunahme in der Auflage von 17,5 % in 10 Jahren. Selbst wenn der PCB-Eintrag über den Bestandsniederschlag unrealistisch auf Null gesetzt wird, ist in der Bilanz nur eine Abnahme von maximal 8 % in 10 Jahren für die Auflage erreichbar. Die Gehaltszeitreihen deuten auf einen wesentlich schnelleren Vorratsabbau in der Auflage hin, von 2001 auf 2011 z.B. um etwa zwei Drittel, ein Bestimmungsgrenzen-Einfluss liegt nicht vor.

Die für den Ah bilanzierte Zunahme um 13,7 % erscheint hoch und müsste sich in dieser Größenordnung in der Gehaltszeitreihe für den Aeh zumindest tendenziell als Zunahme bemerkbar machen. Dies ist nicht der Fall, die Zeitreihe lässt sich am ehesten als Konstanz deuten.

Hor	Tiefe	Vorrat	in	out	in-out	dV/10a
	cm	g/ha/Hor	g/ha/a			%
6 PCB						
Aufl.	-5-0	3,3	(0,17)	(0,11)	(0,06)	(17,5)
Ah	0-10	8,1	(0,11)	(0,00)	(0,11)	(13,7)
Bv	10-30	0,0				
Go-Bv	30-60	0,0				
Sys	O-60	11,4	(0,169)	(0,00)	(0,17)	(14,8)

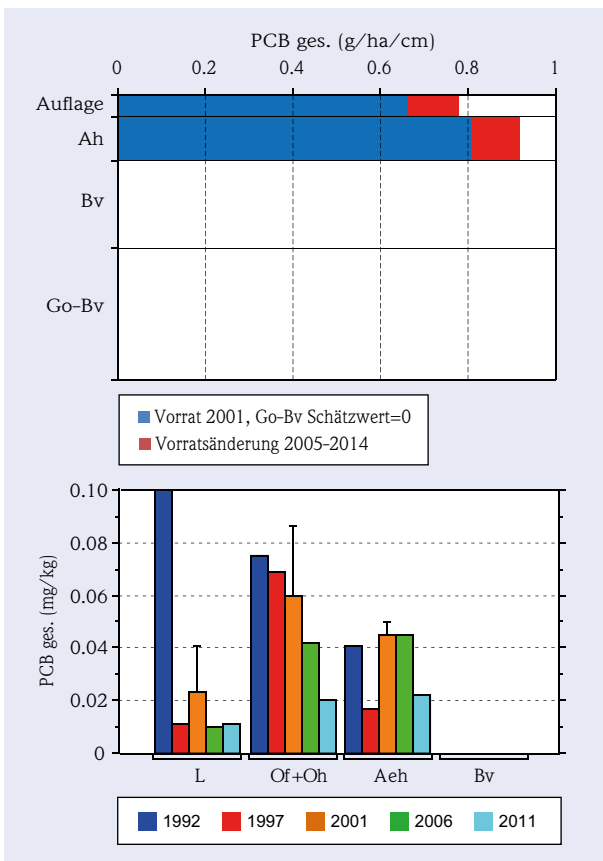


Abb. 5.5-2: 6 PCB-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen. Werte in Klammern = Schätzwerte.

Die beobachteten Diskrepanzen lassen sich sehr gut durch die Annahme eines Senkenterms auflösen, der mikrobiellen PCB-Abbau oder auch Ausgasung berücksichtigt. Die Literaturangaben hierzu sind sehr unterschiedlich und zum Teil widersprüchlich. Für natürliche Böden unter Feldbedingungen konnten keine Literaturwerte gefunden werden.

Bliebe ein Abbau unberücksichtigt, würden bei aktuellen Einträgen (Schätzung = nur Streufall = 0,084 g/ha/a) ca. 135 Jahre zum Aufbau des Vorrats 2001 benötigt. Nimmt man für den Eintrag über den Bestandesniederschlag den gleichen Wert an, wären noch ca. 68 Jahre erforderlich, was gut den Beginn massenhafter Chlorchemie in den 1950er Jahren treffen würde. Da die Einträge in der Vergangenheit sicher deutlich höher lagen, ist hier noch durchaus Spielraum für Verluste durch Abbau und/oder Ausgasung.

Abbaubedingt wird sich bei 6 PCB künftig ein Fließgleichgewicht auf niedrigerem Niveau als heute einstellen. Wegen der bestehenden Unsicherheiten insbesondere bei der Eintragsbestimmung und den Halbwertszeiten wären quantitative Prognosen spekulativ.

In der **Dioxine/Furane-Bilanz** wurde für die Freilanddeposition ein Wert von 3 pg/m²/d bzw. 0,011 mg/ha/a WHO-TEQ-B aus UBA (2005 b) übernommen. Dieser Wert entspricht dort dem bundesweiten Mittelwert der Gesamtdeposition von Stationen ohne besondere Belastungssituation. Er wurde anhand HLUg (2005 b) auf regionale Übertragbarkeit geprüft und als Wert für den Bestandeseintrag übernommen. Zur Berücksichtigung der Streufallfracht wurde dieser Wert verdoppelt.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der bilanzierten mit den beobachteten Änderungsraten ab Starttermin 2001. Im Bv-Horizont zeigen die Zeitreihen keine klare Richtung. Da es aber durchaus nennenswerte Vorräte im Bv-Horizont gibt, ist die Annahme einer Sickerfracht aus dem Ah-Horizont gleich Null nicht ganz gerechtfertigt. Ein Zufluss aus dem Ah-Horizont in den Bv-Horizont reduziert in der Bilanz die Zunahme im Ah-Horizont, was aber immer noch gut verträglich mit der gemessenen Zeitreihe unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Horizontmächtigkeiten ist (Ah: 0-10 cm, Ahe: 0-5 cm).

Zuvor lagen die Einträge höher, was sich gut mit den Zeitreihen aus UBA (2005 b), aber auch HLUg (2005 b) für die hessische Situation deckt, die für Anfang der 1990er Jahre ungefähr dreifach höhere Einträge ausweisen. Bei gegenwärtigen Einträgen wären ca. 175 Jahre erforderlich, den Vorrat 2001 aufzubauen. Bei Einträgen um 1990 nur noch knapp 60 Jahre, was gut mit dem Datum des breiteren Einstiegs in die Chlor-

Hor	Tiefe	Vorrat	in	out	in-out	dV/10a
	cm	mg/ha/Hor	mg/ha/a			%
WHO-TEQ-B						
Aufl.	-5-0	0,72	(0,022)	(0,024)	-(0,002)	-(3,1)
Ah	0-10	2,48	(0,024)	(0,000)	(0,024)	(9,7)
Bv	10-30	0,62				
Go-Bv	30-60	0,00				
Sys	O-60	3,8	(0,022)	(0,000)	(0,022)	(5,7)

der Gesamtvorrat im System um ca. 5 % in 10 Jahren bezogen auf den Vorrat 2001 dennoch weiter erhöhen.

Für weitere organische Spurenstoffe, etwa **DDT** oder **HCB**, wurden keine Bilanzen aufgestellt, da insbesondere brauchbare Flussdaten in der Literatur nicht gefunden werden konnten. Gemäß ihren Gehaltsverteilungen im Bodenprofil lassen sie sich vermutlich am ehesten mit PCB parallelisieren.

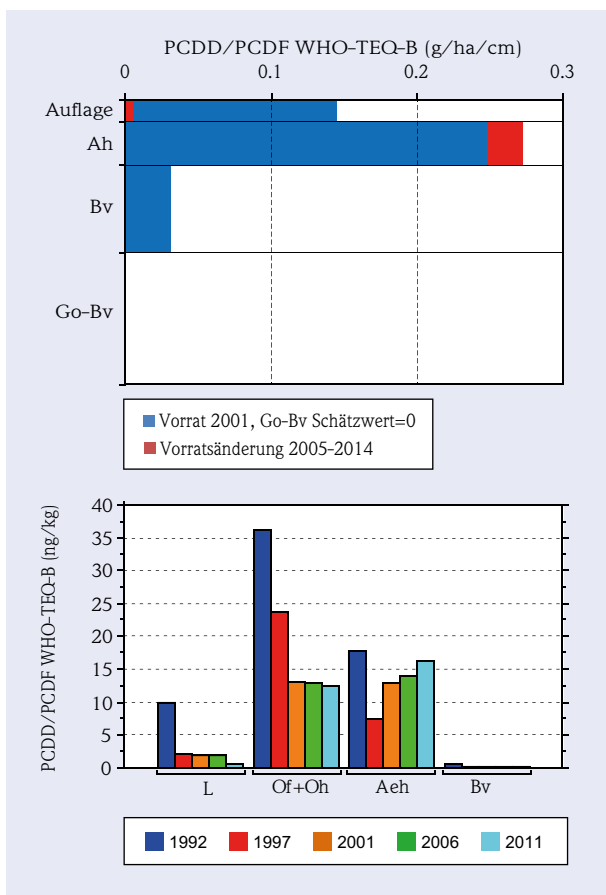


Abb. 5.5-3: Dioxine/Furane-Bilanz der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte 2005-2014 und Vergleich mit den Zeitreihen der Feststoffuntersuchungen. Werte in Klammern = Schätzwerte.

chemie übereinstimmt. Es ergeben sich demnach bei den Dioxinen/Furanen aus den vorliegenden Ergebnissen keine Hinweise auf einen bedeutsamen Abbau im Boden.

Unter weiterhin gleichbleibenden Bedingungen bei den Dioxinen/Furanen wird sich in der Auflage ein neues Gleichgewicht auf niedrigerem Niveau einstellen. Da ein nennenswerter Abbau im Boden bei den Dioxinen/Furanen nicht festzustellen ist, wird sich

5.6 Nährstoffbilanzen

Der Vollständigkeit halber sind im Folgenden noch die Bilanzen der untersuchten Nährstoffe gezeigt. Bei den Nährstoffen ist die dominante Beteiligung der Pflanzen offensichtlich und deshalb der Vorrat im Pflanzenkompartiment nicht mehr vernachlässigbar. Dieser wurde nicht untersucht, da der Schwerpunkt dieser Untersuchung auf den Schadstoffen liegt. Die Bilanzen sind deshalb als unvollständig zu betrachten und dienen hier im Wesentlichen dem Überblick und einer weiteren Plausibilitätskontrolle.

In der vereinfachten N-Bilanz der Tabelle 5.6-1 ist eine mögliche gasförmige Interzeption (maßgeblich durch NH_3), die Deposition organischen Stickstoffs (N_{org} ca. 10 %, FVA 2005) sowie N-Fixierung unberücksichtigt, ebenso wie mögliche gasförmige Verluste durch Nitrifikation oder Denitrifikation. Bei einer Gesamtdeposition von 15 kg/ha/a in den Kronenraum verlassen diesen 56 kg/ha/a in Form von organischem Stickstoff des Streufalls sowie Nitrat- und NH_4 -Austrägen mit dem Bestandsniederschlag. Auch bei Stickstoff ist der Hauptentnahmeort die Auflage, in der schon mindestens 41 kg/ha/a über die Wurzeln entzogen werden. Die Gehaltszeitreihen weisen bei Stickstoff leichte, nicht signifikante Abnahmen in L-, Of+Oh- sowie Aeh-Horizont auf. Im Gesamtsystem verbleiben jährlich ca. 10 kg/ha/a. Der Vegetationsvorrat wäre hier mitgerechnet, nur die Aufteilung dieses Zuwachses zwischen Pflanzenvorrat und Bodenvorrat ist unbekannt. N-Akkumulation in Wäldern ist ein breit beobachtetes Phänomen und in der hier gezeigten Größenordnung trotz aller Vereinfachungen plausibel. Bei gegebenen Ein- und Austragsverhältnissen würden rund 400 Jahre zum Aufbau des N-Vorrats benötigt. Die Prognose ist stark abhängig von der künftigen Bewirtschaftung.

Phosphor wurde bislang nur im Feststoff (2006 und 2011, nicht signifikante Zunahmen) sowie im Streufall untersucht. Bilanzieren lässt sich deshalb nur wenig.

Die Schwefel-Bilanz ist im Gesamtsystem negativ aufgrund hoher Sickerfracht in 60 cm Tiefe. Da der Bestand wächst, sind zu den Werten in-out, die ja nur die Differenzen der jeweiligen Sickerfrachten angeben, noch Abzüge durch Wurzelentnahme anzurechnen, die in Höhe und Ort unbekannt sind. Es scheinen aber vor allem die Ah- und Bv-Vorräte zu sein, die

gegenwärtig mobilisiert werden. Unter gleichbleibenden Flussbedingungen wäre der Systemvorrat (ohne Vegetation) innerhalb von weniger als 200 Jahren aufgebraucht. Ein Hinweis darauf, dass die S-Vorräte, die maßgeblich noch aus Zeiten höherer Sulfateinträge stammen, unbeständig bzw. besser löslich sind. Auch hier ist die Systemprognose abhängig vom Verbleib der Biomasse bei der umtriebsweisen Nutzung.

Tab. 5.6-1: Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelbilanzen (unvollständig, ohne Wurzelaufnahme) für Vegetation (Veg) und Bodenkompimente sowie Gesamtsystem (Sys) der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte während der zurückliegenden 10 Jahre.

Hor	Tiefe	Vorrat	in	out	in-out	dV/ 10a
	cm	kg/ha/Hor	kg/ha/a			%
N						
Veg		n.b.	15	56	-41	-
Aufl.	-5 - 0	817	56	15	41	51
Ah	0-10	1372	15	11	4	3
Bv	10-30	1728	11	5	6	4
Go-Bv	30-60	251	5	5	-1	-2
Sys	Veg-60	4168	15	5	10	2
P						
Veg		n.b.		(1.6)		
Aufl.	-5 - 0	25	(1.6)			
Ah	0-10	112				
Bv	10-30	285				
Go-Bv	30-60	251				
Sys	Veg-60	673				
S						
Veg		n.b.	6.6	7.2	-0.7	-
Aufl.	-5 - 0	57	7.2	5.1	2.1	38
Ah	0-10	129	5.1	8.6	-3.6	-28
Bv	10-30	220	8.6	11.1	-2.4	-11
Go-Bv	30-60	200	11.1	10.0	1.1	5
Sys	Veg-60	606	6.6	10.0	-3.4	-6

Die Ca-Bilanz weist für das Gesamtsystem einen leichten Zuwachs durch Deposition aus, der angesichts von ca. 900 Jahren theoretisch benötigter Aufbauzeit für den Vorrat gegenüber den geogenen Ca-Vorräten für die Standorternährung sicher nur eine untergeordnete Rolle spielt. Analoges gilt für Kalium, dort wären es rund 1.500 Jahre. Bei Magnesium fällt auf, dass schon ohne Berücksichtigung der Wurzel Aufnahme die Auflage-Bilanz stark negativ

Tab. 5.6-2: Stoffbilanzen (unvollständig, ohne Wurzel Aufnahme) der Nährkationen für Vegetation (Veg) und Bodenkompimente sowie Gesamtsystem (Sys) der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte während der zurückliegenden 10 Jahre.

Hor	Tiefe	Vorrat	in	out	in-out	dV/10a
	cm	kg/ha/Hor	kg/ha/a			%
Ca						
Veg		n.b.	5,9	23,9	-18,0	-
Aufl.	-5 - 0	109	23,9	20,4	3,4	32
Ah	0-10	407	20,4	10,6	9,8	24
Bv	10-30	1183	10,6	5,8	4,8	4
Go-Bv	30-60	1002	5,8	3,4	2,4	2
Sys	Veg-60	2701	6	3	2,5	1
Mg						
Veg		n.b.	0,8	3,7	-2,9	-
Aufl.	-5 - 0	36	3,7	4,4	-0,7	-20
Ah	0-10	752	4,4	3,4	1,0	1
Bv	10-30	2600	3,4	2,2	1,1	0
Go-Bv	30-60	4008	2,2	1,5	0,8	0
Sys	Veg-60	7395	0,8	1,5	-0,7	0
K						
Veg		n.b.	6,8	20,5	-13,7	-
Aufl.	-5 - 0	55	20,5	19,4	1,1	20
Ah	0-10	753	19,4	8,0	11,4	15
Bv	10-30	2487	8,0	2,8	5,2	2
Go-Bv	30-60	3507	2,8	2,6	0,2	0
Sys	Veg-60	6803	6,8	2,6	4,2	1
Na						
Veg		n.b.	4,5	4,3	0,2	-
Aufl.	-5 - 0	4	4,3	4,3	0,1	17
Ah	0-10	83	4,3	6,9	-2,7	-32
Bv	10-30	288	6,9	8,0	-1,1	-4
Go-Bv	30-60	601	8,0	6,1	2,0	3
Sys	Veg-60	976	4,5	6,1	-1,5	-2

ist. Für Magnesium gibt es Feststoffanalysen aus 2006 und 2011, die eher gleichbleibende Gehalte zeigen. Bei den Nährstoffen ist die Volatilität (Verhältnis aus Stoffflüssen zu Vorrat) im O- und Aeh-Horizont generell sehr hoch, da hier die mit der Streu gelieferten Nährstoffe zügig umgesetzt werden. Kleine, durch Messunsicherheiten verursachte Abweichungen haben deshalb recht große Folgen bei den ermittelten Änderungsraten. Bei Mg beträgt diese Differenz lediglich 0,7 g/ha/a, durch die die Auflage-Bilanz ins Fließgleichgewicht gebracht werden könnte.

Der Einschätzung zufolge, Natrium verhielte sich wie ein konservativer Tracer, sollte es weitgehend unretardiert durch das System laufen. Im Groben trifft dies auch zu. Im Detail jedoch unterliegt es dem Ionenaustausch und es hat sicher auch eine geogene Kom-

Tab. 5.6-3: Mangan-, Eisen- und Aluminium-Bilanzen für Vegetation (Veg) und Bodenkompimente sowie Gesamtsystem (Sys) ohne Wurzel Aufnahme der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen mit Änderungsraten der Stoffvorräte während der zurückliegenden 10 Jahre.

Hor	Tiefe	Vorrat	in	out	in-out	dV/10a
	cm	kg/ha/Hor	kg/ha/a			%
Mn						
Veg		n.b.	0,4	14,0	-13,6	-
Aufl.	-5 - 0	106	14,0	6,8	7,2	69
Ah	0-10	252	6,8	2,7	4,1	16
Bv	10-30	897	2,7	2,5	0,2	0
Go-Bv	30-60	1503	2,5	3,3	-0,8	-1
Sys	Veg-60	2758	0,4	3,3	-2,9	-1
Fe						
Veg		n.b.	2,66	2,83	-0,17	-
Aufl.	-5 - 0	227	2,83	2,86	-0,02	0
Ah	0-10	6335	2,86	0,69	2,17	0
Bv	10-30	20600	0,69	0,03	0,66	0
Go-Bv	30-60	32565	0,03	0,01	0,02	0
Sys	Veg-60	59727	2,66	0,01	2,65	0
Al						
Veg		n.b.	1,3	(0,7)	0,6	-
Aufl.	-5 - 0	224	(0,7)	5,2	(-4,5)	(-20)
Ah	0-10	7835	5,2	7,7	-2,5	0
Bv	10-30	26992	7,7	3,0	4,7	0
Go-Bv	30-60	41851	3,0	2,5	0,5	0
Sys	Veg-60	76902	1,3	2,5	-1,2	0

ponente. So würde es selbst bei einem Eintrag gleich Null 150 Jahre dauern, den Na-Vorrat abzubauen, eine gleichbleibende Sickerfracht von 6 g/ha/a einmal angenommen.

Mangan ist offenkundig ein essentieller Spurenstoff für Pflanzen, deshalb ist die Kronenraumbilanz mit -13,6 g/ha/a stark negativ. Die bilanzierten Zuwächse in O-, Ah- und Bv-Horizont lassen sich betragsmäßig ziemlich genau durch Wurzel Aufnahme kompensieren, d.h. Mangan nimmt in dieser Größenordnung am Boden-Pflanze-Kreislauf teil. Das System verliert sehr langsam an Mangan, indem der vorrangig geogene Vorrat sich durch Verwitterung auflöst.

Eisen gilt ebenfalls als essentieller Mikronährstoff für Pflanzen. Die vorliegende Eisen-Bilanz lässt aber vermuten, dass der Boden-Pflanze-Kreislauf bei Eisen am Standort nur eine geringe Rolle spielt. Auffallend ist an der Eisen-Bilanz, dass sich kein Verarmungshorizont zeigt, wie es etwa bei der Horizontansprache Aeh („schwach podsolig, durch Humusstoffeinwaschung beeinflusst“) zu vermuten gewesen wäre. Eisen reichert sich gegenwärtig durch atmosphärische Deposition im Gesamtsystem an, was aber vor dem überwältigenden geogenen Hintergrund bedeutungslos erscheint. Gehaltsmessungen 2006 und 2011 zeigen keine signifikanten Trends.

Aluminium zeigt seiner besseren Löslichkeit gemäß einen Verwitterungsverlust des praktisch vollständig geogenen Vorrats. Die Auflagebilanz mit -20 g/ha/a ist fehlerhaft, da Aluminium im Streufall nicht gemessen wurde und hier nur die Einträge über den Bestandesniederschlag verrechnet sind. Gehaltsanalysen 2006 und 2011 zeigen Konstanz. Der Ah-Horizont stellt sich bei Aluminium als Eluvialhorizont dar, der Bv-Horizont als Anreicherungshorizont, mit Änderungsraten, die in Größenordnungen liegen, die für Bodenbildung allgemein angenommen werden. So wäre etwa der Ah-Horizont unter gleichbleibenden Bedingungen in ca. 3.000 Jahren vollständig an Aluminium verarmt.

5.7 Säurebilanz

Die Säurebilanz für den Standort ist in Tabelle 5.7-1 dargestellt. Die Säurebilanz gibt Aufschluss über die Bodenversauerung, einen wichtigen bodenbildenden Prozess, der für sämtliche zuvor untersuchten Stoffe eine maßgeblich regelnde Größe darstellt. Sie dient auch zur weiteren Plausibilisierung der Ergebnisse.

Pufferkapazitäten der verschiedenen Kompartimente wurden wegen fehlender Daten zur Mineralogie nicht berechnet. Es lassen sich aber aus der vorliegenden Teilbilanz, die nur die Stoffflüsse berücksichtigt, durchaus relevante Schlussfolgerungen ableiten.

Die Säurebilanz stellt nichts anderes dar, als die ermittelten mittleren Jahresfrachten der Hauptelemente in wässriger Lösung, d.h. Freiland- und Bestandesdeposition sowie Sickerwasser der Tabellen 3.7-1 und 3.7-2, umgerechnet in Ionenäquivalente. Im Prinzip handelt es sich dabei um eine mittlere Ionenbilanz. Der Anteil der Anionen organischer Säuren an der Ionenbilanz (RCOO) ergibt sich hierbei rechnerisch aus der Differenz der gemessenen bzw. berechenbaren Ionenäquivalente. Auffallend ist hier der recht hohe Wert für den Freilandniederschlag, der mit 0,16 kmol_e/ha/a fast an die Werte des Sulfats heranreicht. Da bei RCOO die Fehler aller anderen Ionen in ihrer Summe zum Ausdruck kommen, ist der absolute Wert nur in seiner Tendenz richtig zu interpretieren. Plausibel ist, dass RCOO im Bestandsniederschlag ansteigt und zwar verstärkt von FFM_B nach FFM_C, aufgrund der dortigen höheren Interzeptionsleistung (bzw. Blattflächenindex). Der Auflageaustrag mit dem Sickerwasser erreicht dann höchste Werte, die schließlich durch Abbau und Bindung im Verlaufe der Bodenpassage faktisch auf Null zurückgehen. Dies deckt sich ausgezeichnet mit den zu beobachtenden Färbungen der entsprechenden Sickerwässer (Abbildung 5.7-1). Diese organischen Säuren stellen einen wichtigen Transportmechanismus speziell für schwer lösliche Metalle in Böden bereit und ermöglichen Sickerfrachten, die weit über denen liegen, die auf Basis der Löslichkeitsprodukte zu erwarten wären. Dies zeigt sich in den hohen Anteilen an der Ionenbilanz bei Mangan, Aluminium, aber auch Eisen.

Die Säurebilanz der Atmosphäre weist nur noch geringe direkte Säureeinträge (über pH-Wert bestimmt) aus. Wesentliche Anteile an Säure, die aus den Säurebildnern SO_2 und NO_2 entstehen, werden schon atmosphärisch durch NH_3 zu NH_4 gepuffert, ein kleinerer Rest wohl durch Ionentausch an Stäuben. Die beiden Bestände wirken unterschiedlich auf die durchgelassene potenzielle Säure, was im Wesentlichen auf Unterschiede bei Ammonium zurückzuführen ist. In der Auflage kommt es schließlich zu einer starken Säurefreisetzung durch Nitrifikation eines Teils des Ammoniums sowie durch biologischen Abbau der organischen Substanz (N_{org} - und S_{org} -Oxidation, Freisetzung organischer Säuren), die in der Auflage selbst zum größten Teil schon wieder, hauptsächlich über Kalzium- und Magnesium-Freisetzung, gepuffert wird. Eine vollständige Pufferung bis 60 cm Tiefe wird am Standort nicht erreicht.

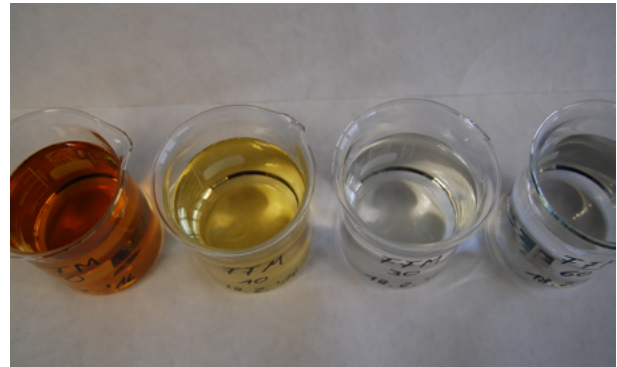


Abb. 5.7-1: Typische Färbungen der Sickerwässer an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Von links nach rechts aus 0 cm, 10 cm, 30 cm und 60 cm Tiefe.

Die Versauerungsbeiträge durch das Pflanzenwachstum sind innerhalb der Umtriebszeiten noch zu berücksichtigen. Als externe Säurebelastung wären $0,68 \text{ mal } 2 \text{ (Interzeptionsfaktor)} = 1,36 \text{ kmol}_c/\text{ha/a}$ anzurechnen, wenn man von vollständiger Nitrifikation des Ammoniums statt direkter Pflanzenaufnahme ausgeht, sonst deutlich weniger.

Insgesamt zeigt sich bei der Säurebilanz ein stimmiges Bild, das die Plausibilität der Ergebnisse noch einmal untermauert.

Tab. 5.7-1: Säure-Teilbilanz (nur Flüsse, ohne Pufferkapazitäten, ohne Wurzelexsudate) für die Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen, Zeitraum 2005-2014, anhand der Ladungsäquivalente (potenzielle Säure = H_3O^+ plus $\text{NH}_4\text{-N}$ mal 2 unter der Annahme einer vollständigen Nitrifikation, HCO_3^- über mittlere pH-Werte und pK_s -Werte abgeschätzt, Mn, Al, Fe in Depositions-Lösung nicht gemessen und aufgrund pH und Löslichkeitsprodukt vernachlässigbar, RCOO^- =Anionen organischer Säuren aus der Differenz der Ionenbilanz, Summe Kationen minus Summe Anionen berechnet).

Messplot	Fracht	pH	HCO_3^-	Cl	SO_4	$\text{NO}_3\text{-N}$	H^+	$\text{NH}_4\text{-N}$	Ca	Mg	Na	K	Mn	Al	Fe	RCOO	pot. Säure
(kmol _c /ha/a)																	
FFM_A	Freiland	5,5	0,016	0,12	0,21	0,24	0,08	0,30	0,15	0,03	0,10	0,09	0	0	0	0,16	0,68
FFM_B	BN	5,4	0,012	0,17	0,21	0,32	0,07	0,24	0,19	0,07	0,12	0,29	0	0	0	0,26	0,55
FFM_C	BN	5,2	0,008	0,28	0,28	0,44	0,10	0,34	0,28	0,12	0,19	0,41	0	0	0	0,43	0,78
FFM_C	0 cm	4,0	0	0,28	0,32	0,96	0,51	0,10	1,02	0,36	0,19	0,50	0,25	0,58	0,15	2,09	0,70
FFM_C	10 cm	4,1	0	0,42	0,54	0,77	0,25	0,00	0,53	0,28	0,30	0,20	0,10	0,85	0,04	0,82	0,25
FFM_C	30 cm	4,2	0	0,35	0,69	0,33	0,14	0,00	0,29	0,18	0,35	0,07	0,09	0,34	0,00	0,11	0,15
FFM_C	60 cm	4,1	0	0,22	0,63	0,37	0,13	0,00	0,17	0,12	0,26	0,07	0,12	0,28	0,00	-0,06	0,13

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stoffdynamik am Standort mit dem gewählten Bilanzansatz, der Stoffflussmessungen mit Bodenfeststoffuntersuchungen kombiniert, sehr detailliert und quantitativ charakterisiert werden kann. Es sind damit Rückblicke in die stoffliche Vergangenheit der Böden sowie Prognosen für die Zukunft möglich. Zeitreihen von Feststoffanalysen sind dagegen für sich allein genommen aufgrund immanenter Unsicherheiten besser zur statistischen Diagnose von Bodenveränderungen an größeren Kollektiven statt an Einzelstandorten geeignet.

Die Eintragungssituation entspricht weiterhin dem Umfeld eines Ballungsraums im eher unteren Wertebereich. Während des Untersuchungszeitraums sind die Einträge bei den meisten Parametern nochmals deutlich gesunken. Der einzig auffallende Parameter bleibt Kupfer. Hier sind die Einträge zwar ebenfalls deutlich zurückgegangen, bleiben aber in Relation zu Vergleichsstandorten hoch. Die mögliche Herkunft aus Kerosin wurde in HLUg (2010) diskutiert.

Die Stoffdynamik wird anhand der ermittelten Bilanzen bewertet. Da Vorsorgewerte bei gleichbleibenden Bedingungen in ca. 70 Jahren erreicht, gleichzeitig aber die zulässigen Zusatzfrachten eingehalten werden, sind die Kupfereinträge nach BBodSchV unproblematisch. Eine Gefährdung des Grundwassers besteht nicht, ebenso wenig für die Biosphäre. So ist Kupfer für Bäume essentiell, Regenwürmer existieren am Standort nur in der Auflage, deren Gehalte aktuell abnehmen. Aus Vorsorgegründen wäre die Fortsetzung der derzeit zu beobachtenden Reduktion der Kupfereinträge dennoch wünschenswert.

Bei den übrigen anorganischen und organischen Spurenstoffen weisen die Bilanzen für die Auflage durchweg sinkende Vorräte aus. D.h. die anthropogene Belastung der Böden hat insgesamt durch Umweltschutzmaßnahmen deutlich abgenommen. Unterschiede bestehen beim Verbleib der Schadstoffe im Boden. Die Stoffe, die eine geringe Löslichkeit und hohe Persistenz besitzen, akkumulieren weiterhin, wenn auch auf geringerem Niveau. Dazu zählen z.B. Blei, Arsen oder Chrom, aber auch PAK und Dioxine/Furane. Bei anderen wurde inzwischen ein Fließ-

gleichgewicht zwischen Ein- und Austrag erreicht, wie z.B. bei Cadmium und Nickel durch Verlagerung in tiefere Bodenschichten oder bei PCB mutmaßlich durch Abbau bzw. Ausgasung. Andere, dominierend geogene Vorräte werden sehr langsam abgebaut bzw. gehen in Lösung, wie etwa die von Kobalt, Aluminium und Mangan. Bei den Nährstoffen inkl. Zink und Mangan sowie der Säurebilanz zeigt sich deutlich die Beteiligung des Boden-Pflanze-Kreislaufs, so dass Prognosen stark vom Verbleib der Erntereste abhängig zu machen sind. Eisen- und Aluminium-Bilanzen zeigen Bodenbildungsprozesse.

Speziell am Beispiel der Dioxine/Furane-Bilanz zeigt sich, dass Bilanzen quantitative Prozessbeschreibungen liefern, die es erlauben, nicht gemessene Bilanzglieder abzuschätzen oder die ersatzweise Verwendung externer Daten zu plausibilisieren. Die Ergebnisse lassen sich auf ähnliche Standorte mit ähnlicher Eintragungssituation übertragen.

Ausblick

Eine Verbesserung der analytischen Bestimmungsgrenzen würde helfen, die Streuallfrachten bei einigen Spurenstoffen besser zu quantifizieren. Da bei etlichen Parametern, darunter auch Kupfer, eine merkliche Beteiligung der Pflanzen an der Stoffdynamik vorliegt, wären Messungen des Vegetationsvorrats hilfreich (Bilanzglied „jährliche Stoffspeicherung im Aufwuchs“). Die Berücksichtigung des präferenziellen Fließens bei der Modellierung der Sickerraten könnte eine weitere Präzisierung bringen und sollte versucht werden. Die Trennschärfe der Feststoffuntersuchungen könnte durch Mitführen von Rückstellproben verbessert werden, zumindest für die Parameter, die sich bei der Probenlagerung als stabil erweisen. Der Mehraufwand könnte durch Streckung des Wiederholintervalls kompensiert werden. Die Bestimmung weiterer organischer Spurenstoffe in der Deposition am Standort wäre zwar hilfreich, aber auch aufwändig, eine Übertragung externer Daten daher zunächst zu prüfen.

Betrieblich besteht nur noch wenig Spielraum für Optimierungen.

7. Literatur

- Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 5). – 5. Aufl., 438 S., 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen; Hannover (In Komm. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)
- 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.
- BROOK90 (2015): in der Version 4.7 vom 10.07.2015 (FEDERER, 2002 und FEDERER ET AL., 2003). <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.html> Dokumentation und Anleitung <http://www.ecoshift.net/brook/b90doc.html>.
- 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): SHYPFIT 0.22 User's Manual. Research Report 95.1, Department of Hydrology, University of Bayreuth, D-95440 Bayreuth.
- 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.
- Gocht, T. (2005): Massenbilanzierung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Kleineinzugsgebieten des ländlichen Raumes. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten. TGA, C79 2005.
- HLUG (2004): Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen (HE). Chronik: Ausstattung & Projekte. U32-MD-HE1104-de, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht.
- HLUG (2005 a): Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen (HE). Ergebnisse: Stand 09/2005. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2005. <http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/boden/bodendauerbeobachtung/U11-MDHE1101-de2.pdf>
- HLUG (2005 b): Umweltatlas Hessen. 2005 Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/luft/ik/qualitaet/dioxin_furan/dioxin.htm
- HLUG (2006): Intensivmessstelle Frankfurt Flughafen (HE). Wasserhaushaltsbilanz 2004. SE 060425, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, unveröffentlicht.
- HLUG (2010): Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Ergebnisbericht 2004 – 2009. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2010. http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/boden/Intensiv-Messstelle_Frankfurt_Flughafen_Ergebnisse_2004-2009__Heft_9_.pdf
- HLUG (2011): Wasserhaushaltsmodellierung 2004 – 2009 mit dem Modell SIMPEL, unveröffentlichte Mitteilung.
- Huwe (1992): WHNSIM. Ein Modell zur Simulation des Wasser-, Wärme- und Stickstoffhaushalts von Standorten mit unterschiedlicher Nutzung. Version 2.0. August 1992.
- Ihle, P. (Hrsg.) (2001): Atmosphärische Deposition in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des Instituts für Energetik und Umwelt, Leipzig. Teubner Verlag 2001.
- Krachler, M., Zheng, J., Zdanowicz, C., Koerner, R., Fisher, D. und Shoty, W. (2005): Increasing enrichments of antimony in the Arctic atmosphere. Journal of Environmental Monitoring, Special Issue „Antimony in the Environment“ DOI: 10.1039/b509373b. Zitiert nach einer Pressemitteilung der Uni Heidelberg (2005), <http://www.uni-heidelberg.de/presse/news05/2511antim.html>
- LfU Bayern (2015): Immissionsökologie – Hintergrundwerte der atmosphärischen Deposition. Jahresmittelwerte 1999 – 2014. Stand 2014. Bayerisches

Landesamt für Umwelt 2015. https://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe_luft/schwermetalle/niederschlagssammler/doc/staubniederschlag_jahresmittel.pdf

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.

LVWO (2005): XV. Kolloquium Internationaler Arbeitskreis Begrünung im Weinbau. Tagungsbericht. Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau, Weinsberg 2005. <https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lvwo/pdf/t/TagungsberichtAKBegrueung2005.pdf?attachment=true>

LWF (2014): Waldernährung in Bayern - Ergebnisse der BZE II. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/waldernaehrung_in_bayern_bf.pdf

Meuli, R. G., Schwab, P., Wächter, D. und Ammann, S. (2014): Nationale Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2004. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Begleitparameter. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1409: 94 S.

Peck, A. K. (2004): Hydrometeorologische und mikroklimatische Kennzeichen von Buchenwäldern. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Nr. 10, 2004, 187 S.

RADOLAN (2015): DWD-Routineverfahren zur Online-Aneicherung von Radarniederschlagsdaten mit Hilfe automatischer Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer), in Kooperation mit verschiedenen Einrichtungen (z.B. LUBW), gefördert von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). <http://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html>

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

SLfL (2007): Betriebliche Spurenelementkreisläufe. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft Heft 5/2007. <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/187/1210773484315-7927.pdf>

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

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

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

UBA (2005 b): Dioxine. Daten aus Deutschland. 5. Bericht des Bundes und der Länder DIOXINE. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3328.pdf>

UBA (2016): Entwicklung der nassen Deposition (normiert auf 1982) an den Messstationen des UBA-Luftmessnetzes. Pdf-Grafik, Quelle Umweltbundesamt, Internet-download vom 29.07.2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/5_abb_entw-nasse-depo_2016-06-22.pdf

UMEG (2002): Bodenwasserhaushalt. Modellierung. Europ. Env. eJournal, Dezember 2002. <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/92078/U23-U61-N02.pdf?command=downloadContent&filename=U23-U61-N02.pdf>

8. Anhang

Tab. A-1: Mit PE2-Sammlern gemessene Jahresniederschläge und Jahresdepositionen der Hauptelemente an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen für die Messplots FFM_A (Freiland), FFM_B und FFM_C (jeweils Bestand) seit Messbeginn 2005-2014.

Parameter	Messplot	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Mittelwert
Niederschlagshöhe	FFM_A	536	601	702	538	575	687	515	608	687	654	610
PE2-Sammler (mm/a)	FFM_B	488	552	609	477	508	612	429	533	593	634	543
	FFM_C	551	599	674	540	563	664	466	567	709	656	599
H ₃ O ⁺ (kmol _c /ha/a)	FFM_A	0,12	0,09	0,17	0,18	0,04	0,05	0,01	0,02	0,03	0,13	0,08
	FFM_B	0,11	0,07	0,20	0,11	0,03	0,04	0,01	0,03	0,03	0,03	0,07
	FFM_C	0,21	0,14	0,26	0,12	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06
Cl (kg/ha/a)	FFM_A	3,82	5,08	5,53	3,88	5,20	4,53	5,04	5,04	3,54	2,61	4,43
	FFM_B	6,02	6,65	7,72	5,83	6,38	7,61	5,18	6,98	4,64	3,73	6,07
	FFM_C	8,40	11,14	12,44	8,33	10,30	12,77	8,29	9,54	9,27	7,98	9,85
SO ₄ (kg/ha/a)	FFM_A	14,64	10,87	13,98	8,96	9,62	10,17	7,57	7,71	8,09	7,16	9,88
	FFM_B	13,88	13,11	14,69	10,31	9,15	11,61	8,16	8,05	7,51	6,37	10,28
	FFM_C	16,94	16,19	15,38	11,41	13,63	16,42	10,41	11,10	12,49	11,34	13,53
NO ₃ -N (kg/ha/a)	FFM_A	3,92	3,83	3,81	3,06	3,54	3,84	2,24	2,92	3,14	2,92	3,32
	FFM_B	5,25	4,13	4,97	4,25	4,35	6,06	3,31	4,47	4,34	3,09	4,42
	FFM_C	6,92	5,75	4,70	3,71	5,74	8,52	4,05	6,98	8,13	7,01	6,15
NH ₄ -N (kg/ha/a)	FFM_A	5,53	3,35	4,49	1,58	4,61	5,15	5,20	5,22	3,18	3,17	4,15
	FFM_B	2,92	3,62	2,32	2,94	4,30	3,26	3,98	4,22	3,34	2,96	3,39
	FFM_C	4,48	3,68	2,25	1,95	5,23	5,47	4,86	6,57	5,73	7,77	4,80
Ca (kg/ha/a)	FFM_A	2,76	2,95	2,84	2,84	2,92	3,15	3,25	3,64	2,58	2,42	2,94
	FFM_B	3,84	4,36	5,07	4,23	3,54	4,12	3,86	4,00	3,30	2,61	3,89
	FFM_C	5,48	5,79	5,64	4,94	5,00	6,16	5,04	6,26	5,96	5,94	5,62
Mg (kg/ha/a)	FFM_A	0,36	0,50	0,47	0,38	0,39	0,41	0,53	0,39	0,34	0,29	0,41
	FFM_B	0,88	1,14	1,15	0,88	0,76	0,89	0,94	0,85	0,70	0,54	0,87
	FFM_C	1,20	1,55	1,44	1,19	1,23	1,66	1,40	1,48	1,52	1,67	1,43
Na (kg/ha/a)	FFM_A	2,29	2,70	2,53	1,77	1,68	3,32	2,63	1,83	2,43	1,48	2,27
	FFM_B	2,67	3,23	3,15	2,40	1,94	4,22	2,37	2,45	2,78	1,52	2,67
	FFM_C	4,14	5,48	4,57	3,37	3,43	6,22	3,34	3,63	5,46	3,78	4,34
K (kg/ha/a)	FFM_A	3,01	3,59	1,65	0,88	3,96	5,28	6,54	3,62	4,03	1,51	3,41
	FFM_B	10,34	12,84	10,75	9,32	11,35	14,28	14,16	10,91	9,96	7,65	11,15
	FFM_C	10,19	12,99	13,44	10,37	15,37	23,96	16,61	16,84	18,16	23,26	16,12

Tab. A-2: Bergerhoff-Jahresdepositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2005-2014.

Parameter	Messplot	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Staub (kg/ha/a)	FFM_A	305	190	151	150	126	273	211	128	160	251
	FFM_B	519	622	673	719	539	537	561	533	604	536
	FFM_C	410	520	554	514	539	576	710	637	669	716
Staub_VarK	FFM_A	0,32	0,31	0,29	0,24	0,24	0,37	0,42	0,22	0,33	0,26
	FFM_B	0,35	0,43	0,51	0,48	0,56	0,55	0,45	0,53	0,60	0,44
	FFM_C	0,34	0,34	0,39	0,46	0,38	0,48	0,55	0,40	0,36	0,33
Pb (g/ha/a)	FFM_A	11,5	10,7	11,1	7,9	7,1	6,5	6,5	4,7	5,8	4,8
	FFM_B	11,8	10,0	14,7	8,2	8,2	6,6	7,1	5,2	4,3	4,4
	FFM_C	12,9	9,2	14,5	6,7	7,6	4,5	6,2	4,3	4,7	4,2
Cd (g/ha/a)	FFM_A	1,36	1,13	0,57	0,51	0,37	0,64	0,76	0,50	0,35	0,55
	FFM_B	1,10	0,94	1,02	0,88	0,59	0,94	0,59	0,43	0,50	0,43
	FFM_C	0,74	0,66	0,82	0,69	0,52	1,25	0,70	0,41	0,45	0,42
Ni (g/ha/a)	FFM_A	18,0	10,7	8,1	6,6	8,5	9,5	6,0	4,8	4,8	5,7
	FFM_B	14,3	14,9	23,1	18,5	14,8	17,3	11,3	10,1	10,5	9,6
	FFM_C	11,0	12,6	13,3	13,3	11,5	15,6	13,0	12,1	10,5	12,9
As (g/ha/a)	FFM_A	1,56	1,31	1,60	1,47	1,01	1,47	1,27	0,97	0,97	1,34
	FFM_B	1,66	1,51	2,17	2,51	1,52	1,66	1,29	1,36	1,22	2,03
	FFM_C	1,60	1,78	1,97	2,04	1,55	1,88	1,32	1,33	1,26	1,62
V (g/ha/a)	FFM_A	6,3	6,5	6,2	5,8	4,1	4,7	5,0	5,0	5,1	4,3
	FFM_B	6,3	6,2	8,4	7,6	4,7	5,1	6,3	5,5	4,8	4,3
	FFM_C	6,5	6,7	8,1	7,1	4,7	5,3	5,9	5,7	5,2	4,6
Cr (g/ha/a)	FFM_A	7,1	9,4	6,8	9,2	6,6	6,6	8,2	6,6	8,6	5,0
	FFM_B	10,4	10,6	12,9	13,9	9,1	9,0	12,5	8,3	8,1	7,2
	FFM_C	10,8	11,8	11,4	12,0	8,1	8,2	10,9	8,7	9,7	7,2
Co (g/ha/a)	FFM_A	1,68	1,26	1,32	1,14	0,94	1,59	1,27	1,11	1,51	1,10
	FFM_B	1,76	1,75	2,41	2,57	1,63	1,83	1,77	1,43	1,45	1,24
	FFM_C	1,53	1,68	2,08	1,85	1,43	1,85	1,77	1,43	1,49	1,40
Cu (g/ha/a)	FFM_A	226,2	187,9	118,6	104,8	101,8	129,5	119,3	91,7	72,4	86,0
	FFM_B	156,1	135,9	88,9	83,3	67,5	99,4	84,7	70,2	54,5	54,9
	FFM_C	137,5	112,2	76,7	76,3	62,8	98,9	75,2	66,1	52,3	57,6
Zn (g/ha/a)	FFM_A	278,5	254,0	141,3	114,5	72,0	149,1	117,4	85,3	73,4	117,0
	FFM_B	223,7	242,9	226,7	170,0	130,3	200,8	115,8	103,2	91,7	82,3
	FFM_C	217,5	300,5	210,4	154,5	129,7	231,8	132,6	116,0	99,2	111,8
Mn (g/ha/a)	FFM_A	267	218	119	676	60	211	165	83	68	199
	FFM_B	4244	5620	6315	10747	3873	5477	3358	5190	4788	6054
	FFM_C	3322	3915	3808	5510	3850	5893	3048	4725	7499	6671
Al (g/ha/a)	FFM_A	446	494	608	229	324	109	461	1720	1380	782
	FFM_B	289	130	126	934	120	397	110	1754	597	1014
	FFM_C	395	331	447	1128	127	539	81	2032	427	1240
Fe (g/ha/a)	FFM_A	1053	1554	1176	1537	1196	1099	1472	1508	1695	1016
	FFM_B	1665	1568	2004	1884	1455	1331	1813	1922	1403	1415
	FFM_C	1869	1789	1915	1901	1335	1222	1810	2038	1679	1425
Sb (g/ha/a)	FFM_A				2,10	1,28	1,22	1,27	1,03	1,34	0,91
	FFM_B				3,27	1,67	1,93	1,94	1,58	1,57	1,64
	FFM_C				3,34	1,73	1,62	1,68	1,49	2,05	1,59

Tab. A-3: EPA-PAK-Jahresdepositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2005-2014.

		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Mittelwert
		mg/ha/a										
Naphthalin	FFM_A	474	185	458	45	67	147	209	113	146	72	192
	FFM_B	172	143	419	0	34	99	109	121	93	56	125
	FFM_C	317	177	388	8	52	66	95	102	72	46	132
Acenaphtylen	FFM_A	57	27	18	15	19	25	16	14	17	11	22
	FFM_B	21	11	12	7	12	16	13	12	11	9	13
	FFM_C	48	11	13	10	12	14	14	11	12	8	15
Acenaphten	FFM_A	32	17	13	10	16	27	18	13	16	9	17
	FFM_B	17	15	12	4	10	16	10	24	15	8	13
	FFM_C	21	15	13	5	12	15	11	17	17	9	13
Fluoren	FFM_A	106	48	32	31	59	98	73	50	91	28	62
	FFM_B	58	38	25	7	34	51	32	109	35	25	41
	FFM_C	78	39	27	15	36	45	30	57	40	25	39
Phenanthren	FFM_A	386	277	218	200	222	360	274	306	319	157	272
	FFM_B	250	242	209	129	135	243	193	666	192	142	240
	FFM_C	324	256	209	163	193	233	203	347	227	133	229
Anthracen	FFM_A	20	16	10	16	14	23	17	17	18	8	16
	FFM_B	11	9	8	10	8	12	9	31	9	7	11
	FFM_C	25	10	5	13	9	14	9	19	17	6	13
Fluoranthren	FFM_A	316	329	235	222	209	338	284	253	304	170	266
	FFM_B	215	221	208	177	118	239	244	200	267	149	204
	FFM_C	251	222	186	160	176	244	263	212	293	139	214
Pyren	FFM_A	218	216	152	148	149	230	203	188	224	139	187
	FFM_B	142	128	128	112	80	155	165	140	193	114	136
	FFM_C	162	130	110	98	118	161	176	147	211	104	142
Benzo(a)-anthracen	FFM_A	79	34	25	22	30	66	63	60	81	39	50
	FFM_B	57	20	18	17	14	42	46	40	70	32	36
	FFM_C	63	18	16	16	22	45	50	45	80	29	38
Chrysen	FFM_A	185	88	65	59	72	157	143	129	159	82	114
	FFM_B	118	51	45	43	31	98	104	80	137	69	78
	FFM_C	132	47	43	38	51	102	109	91	157	62	83

Stoffdynamik Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen

Tab. A-3 Fortsetzung: EPA-PAK-Jahresdepositionen an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2005-2014.

		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Mittelwert
		mg/ha/a										
Benzo(b)-fluoranthen	FFM_A	179	54	34	33	44	143	135	124	159	76	98
	FFM_B	93	40	24	26	20	87	98	76	140	62	67
	FFM_C	124	32	25	26	33	89	101	85	152	56	72
Benzo(k)-fluoranthen	FFM_A	88	19	16	16	21	66	63	59	72	45	47
	FFM_B	57	13	11	11	9	41	46	36	63	30	32
	FFM_C	61	11	12	11	16	42	49	40	70	26	34
Benzo(a)-pyren	FFM_A	86	29	21	15	26	73	83	79	94	51	56
	FFM_B	61	23	16	12	12	48	59	49	82	42	40
	FFM_C	63	19	17	12	20	50	62	56	91	38	43
Indeno(1,2,3-cd)-pyren	FFM_A	84	17	16	15	24	92	98	97	118	61	62
	FFM_B	50	15	12	10	12	58	70	57	101	50	44
	FFM_C	48	9	14	12	20	58	73	63	106	44	45
Dibenzo(ah)-anthracen	FFM_A	17	13	1	2	2	10	14	15	16	8	10
	FFM_B	11	11	1	2	1	6	10	8	14	7	7
	FFM_C	10	10	2	2	2	6	10	9	15	6	7
Benzo(ghi)-perylen	FFM_A	106	29	18	18	28	110	115	111	122	70	73
	FFM_B	66	26	13	13	14	70	84	68	104	57	51
	FFM_C	65	18	16	16	23	71	87	75	111	51	53
		g/ha/a										
16 PAK	FFM_A	2,43	1,39	1,33	0,80	0,95	1,96	1,81	1,63	1,96	1,03	1,53
	FFM_B	1,40	1,00	1,16	0,56	0,53	1,28	1,29	1,72	1,53	0,86	1,13
	FFM_C	1,79	1,02	1,10	0,58	0,77	1,25	1,34	1,38	1,67	0,78	1,17
12 PAK	FFM_A	1,76	1,12	0,81	0,77	0,84	1,67	1,50	1,44	1,69	0,91	1,25
	FFM_B	1,13	0,80	0,69	0,56	0,45	1,10	1,13	1,45	1,37	0,76	0,94
	FFM_C	1,33	0,78	0,66	0,57	0,68	1,12	1,19	1,19	1,53	0,69	0,97
8 PAK	FFM_A	0,82	0,28	0,20	0,18	0,25	0,72	0,72	0,67	0,82	0,43	0,51
	FFM_B	0,51	0,20	0,14	0,14	0,11	0,45	0,52	0,41	0,71	0,35	0,35
	FFM_C	0,57	0,16	0,15	0,13	0,19	0,46	0,54	0,47	0,78	0,31	0,38
4_PAK	FFM_A	0,29	0,09	0,06	0,05	0,08	0,29	0,31	0,30	0,35	0,19	0,20
	FFM_B	0,19	0,08	0,04	0,04	0,04	0,18	0,22	0,18	0,30	0,16	0,14
	FFM_C	0,19	0,06	0,05	0,04	0,06	0,19	0,23	0,20	0,32	0,14	0,15

Tab. A-4: Streufall-Jahresfrachten an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2010-2014.

Buchungsjahr	2010		2011		2012		2013		2014	
Messort	FFM_B	FFM_C	FFM_B	FFM_C	FFM_B	FFM_C	FFM_B	FFM_C	FFM_B	FFM_C
Probennahmedatum	9.2.11		11.1.12		12.12.12		4.12.13		11.2.15	
TS (105°C) kg/m ²	0,339	0,358	0,377	0,333	0,231	0,347	0,321	0,402	0,334	0,451
C (kg/ha/a)	1813	1925	1944	1750	1259	1920	1717	2181	1745	2392
N (kg/ha/a)	36,6	40,1	41,8	39,3	29,2	39,6	33,4	48,7	40,1	58,2
P (kg/ha/a)	1,6	1,8	1,9	1,6	1,1	0,8	1,0	1,7	1,1	1,9
S (kg/ha/a)	3,0	3,4	3,4	3,2	2,2	1,3	2,5	3,4	1,7	2,4
Ca (kg/ha/a)	23,9	22,9	24,2	21,7	15,5	10,2	19,3	21,8	12,8	14,6
K (kg/ha/a)	4,3	4,0	7,6	5,2	3,3	2,3	6,0	7,8	3,0	2,8
Mg (kg/ha/a)	2,1	2,6	2,7	2,5	1,6	1,6	1,8	2,8	1,1	1,7
As (g/ha/a)	< 10,2	< 10,8	< 11,3	< 10,0	< 6,9	< 10,4	< 19,3	< 24,1	< 6,7	< 9,0
Be (g/ha/a)	< 2,0	< 2,2	< 2,3	< 2,0	< 1,4	< 2,1	< 1,9	< 2,4	< 0,7	< 0,9
Cd (g/ha/a)	1,36	1,43	1,13	1,00	0,69	1,04	0,96	1,21	0,67	0,90
Cr (g/ha/a)	18,3	20,8	11,3	11,7	23,6	11,8	11,9	41,0	10,7	4,1
Co (g/ha/a)	1,69	2,15	1,51	1,67	1,39	1,04	1,28	1,61	1,00	1,35
Cu (g/ha/a)	64	72	66	65	43	86	36	50	26	32
Mn (g/ha/a)	12369	11181	12585	11901	7798	906	11745	12876	7474	9005
Fe (g/ha/a)							956	1497	669	771
Hg (g/ha/a)	0,20	0,22	< 0,2	< 0,2	< 0,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,07	< 0,1
Ni (g/ha/a)	12,5	17,6	10,9	10,7	17,8	8,7	10,9	29,8	10,0	9,0
Pb (g/ha/a)	8,1	11,1	8,3	7,3	5,1	11,1	5,1	8,4	4,0	4,1
Sb (g/ha/a)	< 2,0	< 2,2	< 2,3	< 2,0	< 1,4	9,72	< 1,9	< 2,4	< 0,7	< 0,9
Se (g/ha/a)	< 10,2	< 10,8	< 11,3	< 10,0	< 6,9	< 10,4	< 9,6	< 12,1	< 3,3	< 4,5
Tl (g/ha/a)	< 1,0	< 1,1	< 1,1	< 1,0	< 0,7	< 1,0	< 1,0	< 1,2	< 0,3	< 0,5
U (g/ha/a)	< 1,0	< 1,1	< 1,1	< 1,0	< 0,7	< 1,0	< 1,0	< 1,2	< 0,3	< 0,5
Zn (g/ha/a)	184	218	171	175	137	203	138	225	112	175
Benzo(a)pyren (g/ha/a)	0,026	0,050	< 0,038	< 0,033	< 0,010	< 0,016	< 0,016	< 0,020	< 0,004	< 0,005
Biphenyl (g/ha/a)	0,040	0,050	< 0,038	< 0,033	0,021	0,031	0,016	< 0,020	0,0227	0,0221
DDE-p,p' (g/ha/a)	< 0,005	< 0,007	< 0,008	< 0,007	< 0,003	0,006	< 0,004	< 0,005	< 0,001	< 0,001
HCB (g/ha/a)	0,008	0,007	< 0,008	< 0,007	0,006	0,010	< 0,004	0,005	0,002	0,004
HCH-gamma (g/ha/a)	< 0,005	0,007	< 0,008	< 0,007	< 0,003	< 0,004	< 0,004	< 0,005	< 0,001	< 0,001
Trichlorbenzol 1,2,4 (g/ha/a)	0,005	0,007	0,008	0,007	< 0,005	< 0,010	0,004	0,005	< 0,018	< 0,018
16 PAK (g/ha/a) Max	1,51	1,88	0,98	1,07	0,34	0,45	0,63	0,41	1,00	1,17
12 PAK (g/ha/a) Max	1,29	1,63	0,77	0,80	0,14	0,21	0,47	0,33	0,56	0,76
8 PAK (g/ha/a) Max	0,37	0,50	0,34	0,32	0,08	0,12	0,14	0,21	0,06	0,08
4 PAK (g/ha/a) Max	0,11	0,17	0,15	0,13	0,04	0,06	0,06	0,08	0,01	0,02
6 PCB (g/ha/a) Max	0,07	0,08	0,08	0,06	0,07	0,13	0,07	0,09	0,08	0,08
16 PAK (g/ha/a) Min	1,41	1,74	0,60	0,77	0,23	0,28	0,46	0,13	0,96	1,13
12 PAK (g/ha/a) Min	1,23	1,56	0,51	0,60	0,05	0,07	0,34	0,13	0,53	0,72
8 PAK (g/ha/a) Min	0,34	0,47	0,11	0,15	0,00	0,00	0,05	0,07	0,04	0,05
4 PAK (g/ha/a) Min	0,08	0,13	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
6 PCB (g/ha/a) Min	0,06	0,08	0,06	0,05	0,07	0,12	0,06	0,08	0,08	0,07

Tab. A-5: Jährliche Sickerfrachten an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2005–2014.

	Tiefe	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Mittelwert
Sickerrate (mm/a)	0 cm	259	357	421	290	399	457	286	381	470	416	374
	10 cm	200	273	353	217	329	398	204	328	415	354	307
	30 cm	143	161	231	170	222	293	112	222	321	241	212
	60 cm	104	58	118	123	103	192	83	107	230	154	127
MW eL ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0 cm	103	133	109	153	155	131	73	361	99	92	141
	10 cm	157	82	75	132	121	64	44	160	100	63	100
	30 cm	122	97	75	95	114	76	27	132	95	72	91
	60 cm	223	160	117	112	145	111	43	139	119	98	127
MW pH (-)	0 cm	3,86	3,88	3,76	3,58	3,79	3,97	4,07	3,62	4,76	4,28	3,96
	10 cm	3,98	4,15	4,06	3,86	4,14	4,33	4,36	4,06	4,31	4,11	4,14
	30 cm	4,11	4,14	4,18	4,05	4,10	4,34	4,39	4,14	4,44	4,16	4,20
	60 cm	3,94	3,96	3,88	3,79	4,03	4,18	4,20	4,10	4,39	4,19	4,07
H^3O^+ (kmol/ha/a)	0 cm	0,34	0,51	0,84	0,77	0,65	0,55	0,35	0,61	0,21	0,25	0,51
	10 cm	0,17	0,20	0,39	0,29	0,26	0,20	0,12	0,28	0,24	0,32	0,25
	30 cm	0,10	0,11	0,22	0,12	0,16	0,17	0,08	0,14	0,15	0,19	0,14
	60 cm	0,13	0,06	0,19	0,17	0,09	0,16	0,08	0,07	0,13	0,19	0,13
Cl (kg/ha/a)	0 cm	6,0	7,9	10,1	8,1	17,3	16,2	6,6	12,9	7,6	6,8	9,9
	10 cm	15,8	11,6	17,8	11,3	19,3	12,1	10,4	26,2	12,0	10,8	14,7
	30 cm	4,3	4,7	13,0	8,9	18,4	13,7	10,9	27,9	10,1	11,9	12,4
	60 cm	5,4	3,4	4,7	7,4	12,6	11,7	5,0	11,2	13,3	4,8	7,9
SO_4 (kg/ha/a)	0 cm	8,0	11,9	17,3	15,2	26,4	21,4	10,6	19,4	12,9	9,8	15,3
	10 cm	15,9	20,3	28,2	18,2	31,1	34,6	16,3	30,7	31,9	32,3	25,9
	30 cm	12,2	23,9	39,4	29,5	32,1	44,0	19,5	38,4	49,0	43,8	33,2
	60 cm	16,3	13,2	32,6	34,1	22,4	42,7	20,5	25,0	51,9	41,5	30,0
$\text{NO}_3\text{-N}$ (kg/ha/a)	0 cm	6,0	9,9	11,0	13,6	21,2	13,3	8,3	17,4	16,5	16,6	13,4
	10 cm	12,8	5,4	8,4	5,7	19,5	5,8	1,6	25,6	20,5	2,8	10,8
	30 cm	12,3	2,2	1,3	2,4	14,8	2,1	0,0	3,8	6,8	0,1	4,6
	60 cm	24,2	3,1	1,5	0,9	1,5	5,2	2,3	4,0	8,9	-0,2	5,2
$\text{NH}_4\text{-N}$ (kg/ha/a)	0 cm	0,88	0,73	0,39	0,97	1,12	2,70	1,11	2,10	1,58	1,74	1,33
	10 cm	0,04	0,04	0,08	0,01	0,03	0,09	0,03	0,03	0,06	0,12	0,05
	30 cm	0,01	0,01	0,09	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,06	0,02
	60 cm	0,03	0,02	0,05	0,01	0,04	0,03	0,02	0,03	0,01	-0,16	0,01
Ca (kg/ha/a)	0 cm	10,1	16,8	19,4	16,6	29,5	24,2	14,1	23,2	24,8	25,5	20,4
	10 cm	10,0	8,2	10,7	7,2	15,6	10,5	4,3	16,1	15,1	8,3	10,6
	30 cm	6,9	4,3	5,8	4,5	10,3	7,4	2,9	5,5	6,0	4,8	5,8
	60 cm	7,8	1,8	2,9	3,1	3,0	4,3	2,0	2,8	4,3	2,1	3,4
Mg (kg/ha/a)	0 cm	2,0	3,9	4,6	3,7	6,3	5,2	3,0	5,0	4,7	5,3	4,4
	10 cm	2,8	2,0	3,1	2,3	5,2	3,7	1,7	5,7	4,6	2,5	3,4
	30 cm	1,9	1,2	1,7	1,6	3,8	2,8	1,2	2,9	3,4	2,1	2,2
	60 cm	2,7	0,7	1,0	1,1	1,2	1,8	0,9	1,4	2,7	1,2	1,5
Na (kg/ha/a)	0 cm	2,0	3,9	4,6	4,0	6,3	6,4	3,1	6,6	3,3	2,7	4,3
	10 cm	3,2	5,7	7,9	4,5	6,7	9,5	5,2	10,9	7,8	7,9	6,9
	30 cm	3,5	3,2	6,5	6,1	8,9	8,9	5,1	17,5	12,2	8,6	8,0
	60 cm	4,0	2,5	3,9	4,5	6,5	9,1	3,9	7,4	11,9	6,9	6,1

Tab. A-5 Fortsetzung: Jährliche Sickerfrachten an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2005–2014.

	Tiefe	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Mittelwert
K (kg/ha/a)	0 cm	6,8	19,8	15,5	13,6	23,9	26,9	13,0	25,0	20,4	29,2	19,4
	10 cm	5,8	6,8	8,3	3,7	12,0	7,8	4,8	9,7	12,6	8,3	8,0
	30 cm	1,9	2,0	3,8	2,3	4,0	3,0	1,3	4,1	3,9	2,0	2,8
	60 cm	1,8	1,2	2,6	2,8	2,8	4,3	1,7	2,7	4,6	1,7	2,6
Pb (kg/ha/a)	0 cm	65,7	102,2	106,2	76,3	151,2	131,1	69,5	115,2	77,0	49,4	94,4
	10 cm	10,2	11,1	11,6	7,4	10,1	9,8	4,7	15,0	17,8	10,6	10,8
	30 cm	6,2	2,8	4,7	2,5	4,3	3,6	1,5	2,0	2,4	1,3	3,1
	60 cm	0,6	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,2	0,3	0,6	0,2	0,4
Cd (g/ha/a)	0 cm	1,4	1,6	1,8	2,0	3,5	2,4	1,4	2,2	1,9	1,4	2,0
	10 cm	1,6	1,0	1,4	1,2	2,4	1,2	0,6	2,8	2,2	1,0	1,5
	30 cm	1,8	1,0	1,2	1,3	2,7	1,8	0,7	1,8	2,2	1,2	1,6
	60 cm	1,4	0,7	1,0	1,0	1,2	1,7	0,7	1,5	2,5	0,9	1,3
Ni (g/ha/a)	0 cm	16,3	24,1	29,1	25,3	45,0	38,0	20,9	31,0	32,5	22,0	28,4
	10 cm	23,9	20,4	28,4	19,2	36,6	26,6	13,0	41,8	37,4	20,4	26,8
	30 cm	22,6	12,8	18,3	16,7	33,7	27,3	11,8	24,7	31,2	20,8	22,0
	60 cm	16,8	8,5	13,2	15,1	14,7	23,0	9,8	15,4	32,0	14,2	16,3
As (g/ha/a)	0 cm	4,0	5,4	6,1	4,5	9,3	9,3	4,7	7,7	6,2	4,3	6,2
	10 cm	5,5	5,7	5,8	3,1	5,1	6,1	2,8	4,3	5,1	4,2	4,8
	30 cm	1,3	0,9	1,6	1,2	1,7	1,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,2
	60 cm	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4	0,5	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4
Cr (g/ha/a)	0 cm	4,7	6,5	9,4	6,8	14,8	15,0	7,6	12,2	10,1	8,2	9,5
	10 cm	5,9	8,4	9,9	7,1	10,3	14,6	5,7	10,6	12,4	10,0	9,5
	30 cm	0,6	0,6	0,8	0,7	1,0	1,6	0,7	0,8	0,9	1,1	0,9
	60 cm	0,5	0,2	0,2	0,5	0,2	0,6	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4
Cu (g/ha/a)	0 cm	76,0	106,8	146,6	93,9	172,9	192,7	97,7	161,1	130,4	104,7	128,3
	10 cm	27,5	45,6	52,7	27,9	51,2	80,2	36,3	43,4	48,3	46,6	46,0
	30 cm	3,1	3,3	5,5	4,8	6,3	7,4	2,4	3,9	4,7	4,1	4,6
	60 cm	3,1	1,1	1,7	2,7	1,7	3,1	1,4	2,1	3,4	2,0	2,2
Co (g/ha/a)	0 cm	4,1	5,5	6,1	6,2	11,1	8,4	4,6	10,7	8,7	2,6	6,8
	10 cm	9,4	9,0	10,8	7,8	11,0	6,3	4,3	17,6	8,7	4,4	8,9
	30 cm	13,0	7,9	16,4	15,1	23,5	25,5	13,3	38,5	32,3	23,3	20,9
	60 cm	18,8	6,8	8,4	10,6	8,6	17,3	8,2	16,2	22,7	15,6	13,3
Sb (g/ha/a)	0 cm	1,33	1,69	1,97	1,48	2,80	3,11	1,66	2,82	2,33	1,51	2,07
	10 cm	0,58	0,75	0,83	0,48	1,01	1,25	0,65	1,09	1,50	1,24	0,94
	30 cm	0,05	0,04	0,06	0,04	0,09	0,06	0,05	0,07	0,11	0,12	0,07
	60 cm	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,06	0,06	0,03
Zn (g/ha/a)	0 cm	133	184	222	219	394	319	175	286	296	192	242
	10 cm	160	127	171	128	253	164	77	297	227	107	171
	30 cm	147	85	111	102	211	167	71	169	181	128	137
	60 cm	131	47	75	78	82	130	56	90	165	58	91

Tab. A-5 Fortsetzung: Jährliche Sickerfrachten an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen seit Messbeginn 2005–2014, Fortsetzung.

	Tiefe	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Mittelwert
Al (g/ha/a)	0 cm	3074	4417	5395	4523	8480	7421	3963	5875	4729	4302	5218
	10 cm	7048	6218	7814	5235	10356	9250	4358	11028	9928	5470	7670
	30 cm	3764	1893	2591	2201	4964	3349	1559	3838	3929	2115	3020
	60 cm	3665	1544	2318	2471	2736	3557	1482	2255	3951	1366	2534
Mn (g/ha/a)	0 cm	4092	7013	7608	5086	10117	8303	4725	7770	6837	6034	6758
	10 cm	2394	1915	2351	1640	4720	2445	1204	5252	3646	1310	2688
	30 cm	1895	1112	1830	1792	3611	3123	1383	3918	4319	2382	2537
	60 cm	5427	1549	2307	2423	2776	4692	2009	3190	6418	2164	3296
Fe (g/ha/a)	0 cm	1849	2584	3394	2214	3938	4109	2173	3377	2703	2222	2856
	10 cm	380	491	687	505	663	905	414	850	1137	858	689
	30 cm	35	26	36	21	31	42	16	34	30	31	30
	60 cm	18	6	10	18	11	19	8	15	28	7	14

Tab. A-6: Parameterspektrum organischer Schadstoffe im Streufall (außer PAK und PCB) an der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen im Zeitraum 2010 – 2014, meist < BG gemessen (2014 BG = 0,3 µg/kg).

Parameter	Verwandter 1	Verwandter 2	Verwandter 3
Biphenyl			
Aldrin	Dieldrin	Endrin	
Chlordane-cis	Chlordane-trans		
DDE-o,p'	DDE-p,p'		
DDT-o,p'	DDT-p,p'		
DDD-o,p'	DDD-p,p'		
Endosulfan-alpha	Endosulfan-beta		
HCB	Pentachlorbenzol		
Trichlorbenzol 1,2,3	Trichlorbenzol 1,3,5	Trichlorbenzol 1,2,4	
HCH-alpha	HCH-beta	HCH-gamma	HCH-delta
Heptachlor	Heptachlorepoxyd cis	Heptachlorepoxyd trans	
Methoxychlor ECD	Quintocen ECD		
1,2,3,4-Tetrachlorbenzol	1,2,4,5-Tetrachlorbenzol		
Hexachlor-1,3-Butadien			
1,4-Dichlornaphthalin	1-Bromnaphthalin	1-Chlornaphthalin	

Tab. A-7: pH-Werte und Gehalte anorganischer Stoffe im Königswasserextrakt (KW) an der Beprobungsfläche der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in Form der Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (Stabw). n = 3, bei manchen Parametern 1992 und 2001 durch Nachmessung n = 6. 1992 keine Werte für Aeh- und Bv-Horizont angegeben, da abweichende Probennahmetiefen („-“ = kein Messwert vorhanden, nicht nachweisbar oder unplausibel).

Parameter	Horizont	1992		1997		2001		2006		2011	
		MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw
pH(CaCl ₂) (-)	L	3,52	0,14	4,40	0,08	4,74	0,40	4,13	0,11	4,13	0,06
	Of+Oh	2,57	0,04	3,48	0,06	3,19	0,10	3,34	0,08	3,50	0,10
	Aeh	-	-	3,21	0,06	2,92	0,16	2,96	0,00	3,37	0,06
	Bv	-	-	3,78	0,14	3,52	0,22	3,78	0,02	4,03	0,06
N _{ges} (Gew.-%)	L	1,71	0,14	-	-	1,40	0,28	1,37	0,22	1,54	0,02
	Of+Oh	1,25	0,16	-	-	1,42	0,08	1,23	0,11	1,02	0,18
	Aeh	-	-	-	-	0,52	0,06	0,44	0,03	0,39	0,08
	Bv	-	-	-	-	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,02
Al (KW) (mg/kg)	L	1640	199	676	106	1369	552	1427	364	538	93
	Of+Oh	2935	400	4131	379	3486	334	4033	391	4497	257
	Aeh	-	-	5159	277	5394	313	6050	98	5107	254
	Bv	-	-	6369	292	7209	118	8331	198	6713	309
Ca (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	-	-	6733	342
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	-	-	1597	440
	Aeh	-	-	-	-	-	-	-	-	622	190
	Bv	-	-	-	-	-	-	-	-	365	36
Fe (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	1499	339	585	84
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	4085	218	5070	312
	Aeh	-	-	-	-	-	-	6597	400	5623	425
	Bv	-	-	-	-	-	-	6358	525	5830	87
K (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	-	-	1433	127
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	-	-	933	169
	Aeh	-	-	-	-	-	-	-	-	730	65
	Bv	-	-	-	-	-	-	-	-	768	69
Mg (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	955	110	883	29
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	600	36	653	81
	Aeh	-	-	-	-	-	-	569	16	593	50
	Bv	-	-	-	-	-	-	802	21	730	7
Mn (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	4555	269	4247	102
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	1668	152	984	276
	Aeh	-	-	-	-	-	-	152	15	277	119
	Bv	-	-	-	-	-	-	277	12	370	89
Na (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	72	12	-	-
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	63	0	-	-
	Aeh	-	-	-	-	-	-	59	3	-	-
	Bv	-	-	-	-	-	-	89	9	-	-
P (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	406	46	569	31
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	442	21	503	102
	Aeh	-	-	-	-	-	-	224	3	241	40
	Bv	-	-	-	-	-	-	88	4	99	7
As (KW) (mg/kg)	L	1,48	0,27	1,08	0,03	5,53	-	1,71	0,17	0,14	0,03
	Of+Oh	3,91	1,80	5,90	0,61	-	-	4,49	0,24	3,11	0,56
	Aeh	-	-	9,40	0,53	6,97	1,79	11,50	0,46	4,58	1,65
	Bv	-	-	3,33	1,17	-	-	3,28	0,18	1,94	0,09

Tab. A-8: Gehalte anorganischer Spurenstoffe im Königswasserextrakt (KW) an der Beprobungsfläche der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen in Form der Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (Stabw). Werte < BG = BG/2 gesetzt (vereinzelt bei Cadmium, Chrom und Thallium), n = 3, bei manchen Parametern 1992 und 2001 durch Nachmessung n = 6 („-“ = kein Messwert vorhanden, nicht nachweisbar oder unplausibel).

Parameter	Horizont	1992		1997		2001		2006		2011	
		MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw	MW	Stabw
Cd (KW) (mg/kg)	L	0,91	0,23	0,34	0,08	0,41	0,10	0,23	0,05	0,23	0,01
	Of+Oh	0,42	0,05	0,40	0,13	0,41	0,07	0,27	0,02	0,31	0,06
	Aeh	-	-	0,05	0,01	0,11	0,02	0,09	0,01	0,10	0,02
	Bv	-	-	0,04	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,03	0,00
Co (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aeh	-	-	-	-	-	-	1,91	0,17	-	-
	Bv	-	-	-	-	-	-	2,56	0,30	-	-
Cr (KW) (mg/kg)	L	6,40	1,58	2,07	0,43	4,09	1,62	-	-	10,81	6,14
	Of+Oh	10,89	4,16	10,14	0,58	8,13	0,89	-	-	10,83	1,32
	Aeh	-	-	7,37	0,47	10,13	0,96	10,59	0,26	10,01	0,94
	Bv	-	-	6,01	0,39	6,96	0,73	4,93	0,42	8,89	0,26
Cu (KW) (mg/kg)	L	81,00	3,28	42,99	3,86	28,11	9,20	25,52	1,20	16,83	0,61
	Of+Oh	62,42	6,44	70,44	7,53	58,75	2,61	47,47	5,64	39,60	9,00
	Aeh	-	-	9,15	1,21	20,01	1,90	19,08	1,00	22,30	6,28
	Bv	-	-	3,06	0,30	3,57	0,16	2,66	0,15	3,32	1,08
Hg (KW) (mg/kg)	L	0,24	0,02	0,12	0,02	0,13	0,02	0,10	0,01	0,07	0,00
	Of+Oh	0,30	0,03	0,38	0,03	0,28	0,04	0,14	0,02	0,23	0,04
	Aeh	-	-	0,12	0,02	0,31	0,05	0,20	0,02	0,14	0,02
	Bv	-	-	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01
Ni (KW) (mg/kg)	L	12,4	1,1	6,7	0,7	5,6	0,7	5,9	0,4	8,3	3,0
	Of+Oh	14,0	2,7	13,7	1,3	9,5	1,4	8,0	0,6	9,7	1,3
	Aeh	-	-	6,9	1,4	7,5	1,8	6,0	0,1	6,8	0,8
	Bv	-	-	3,6	1,7	5,3	0,2	4,0	0,4	5,3	0,3
Pb (KW) (mg/kg)	L	41,6	5,1	9,0	2,3	12,2	3,3	7,8	0,9	3,7	0,5
	Of+Oh	103,7	40,7	87,8	19,3	66,0	7,1	43,9	12,9	58,0	11,8
	Aeh	-	-	36,8	2,5	65,7	6,0	56,8	3,1	43,5	11,6
	Bv	-	-	9,3	2,1	11,0	3,1	7,3	0,3	9,5	0,3
Sb (KW) (mg/kg)	L	1,7	0,4	0,5	0,1	-	-	1,2	0,3	-	-
	Of+Oh	2,2	0,3	0,9	0,1	-	-	2,1	0,4	-	-
	Aeh	-	-	0,8	0,1	-	-	1,5	0,0	-	-
	Bv	-	-	0,3	0,0	-	-	0,2	0,0	-	-
Tl (KW) (mg/kg)	L	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,00
	Of+Oh	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,05
	Aeh	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	0,04
	Bv	-	-	-	-	-	-	-	-	0,09	0,03
V (KW) (mg/kg)	L	10,3	7,1	2,8	1,6	-	-	35,1	3,6	-	-
	Of+Oh	27,3	4,5	18,3	2,3	9,3	0,8	36,3	3,2	-	-
	Aeh	-	-	18,7	0,8	15,0	0,3	16,0	1,6	-	-
	Bv	-	-	16,0	0,2	9,3	0,4	16,8	2,1	-	-
Zn (KW) (mg/kg)	L	111,4	33,2	67,2	2,2	56,6	12,3	63,7	13,7	39,5	4,4
	Of+Oh	57,2	6,3	54,2	9,3	47,2	3,4	42,0	0,8	42,0	6,5
	Aeh	-	-	22,6	5,1	28,6	4,4	23,9	1,8	24,0	3,1
	Bv	-	-	19,3	5,0	12,9	2,0	13,0	1,0	15,3	0,2

Tab. A-9: Gehalte der wichtigsten organischen Spurenstoffe an der Beprobungsfläche der Intensiv-Messstelle Frankfurt Flughafen. Werte < BG wurden entfernt, Bodenbeprobung 2001 n = 3, sonst Einzelwerte.

		1992	1996	2001		2006	2011
		Einzelwert	Einzelwert	MW	Stabw	Einzelwert	Einzelwert
Benzo(a)pyren (mg/kg)	L	0,020	0,016	0,029	0,003	0,026	0,010
	Of+Oh	0,158	0,148	0,145	0,023	0,094	0,080
	Aeh	0,177	0,073	0,191	0,018	0,195	0,070
	Bv	-	-	-	-	-	-
16 PAK (EPA) (mg/kg)	L	0,419	0,716	0,943	0,357	0,369	0,220
	Of+Oh	2,134	2,494	2,391	0,366	1,753	1,220
	Aeh	1,124	1,080	3,138	0,247	3,558	1,140
	Bv	-	-	0,012	0,006	-	0,020
12 PAK (Min) (mg/kg)	L	0,419	0,663	0,922	0,336	0,369	0,240
	Of+Oh	2,134	2,474	2,371	0,363	1,753	1,250
	Aeh	1,124	1,080	3,111	0,244	3,558	1,150
	Bv	-	-	0,012	0,006	-	0,010
8 PAK (Min) (mg/kg)	L	0,082	0,139	0,371	0,015	0,188	0,130
	Of+Oh	0,820	1,173	1,512	0,243	1,072	0,790
	Aeh	0,569	0,569	2,056	0,167	2,335	0,770
	Bv	-	-	0,008	0,003	-	0,010
6 PCB (mg/kg)	L	1,570	0,011	0,023	0,007	0,010	0,011
	Of+Oh	0,075	0,069	0,060	0,011	0,042	0,020
	Aeh	0,041	0,017	0,045	0,002	0,045	0,022
	Bv	-	-	-	-	-	-
Summe DDT (mg/kg)	L	0,069	0,008	0,013	0,006	0,009	0,003
	Of+Oh	0,098	0,083	0,096	0,028	0,055	0,021
	Aeh	0,075	0,026	0,074	0,012	0,085	0,019
	Bv	-	-	-	-	-	-
HCB (mg/kg)	L	0,056	0,001	0,013	-	-	-
	Of+Oh	0,033	0,010	0,009	0,003	0,007	-
	Aeh	0,007	0,003	0,007	0,001	0,009	0,003
	Bv	-	-	-	-	-	-
gamma-HCH (mg/kg)	L	0,056	0,067	0,009	0,000	0,002	-
	Of+Oh	0,019	0,012	0,008	0,003	0,002	0,001
	Aeh	-	-	0,001	0,001	-	-
	Bv	-	-	-	-	-	-
PCDD/PCDF TEQ-A (WHO2005) (ng/kg)	L	9,957	2,028	1,913	-	1,845	0,738
	Of+Oh	36,272	23,792	13,208	-	12,902	12,591
	Aeh	17,871	7,338	12,949	-	13,863	16,265
	Bv	1,351	0,341	0,262	-	0,326	0,250
PCDD/PCDF TEQ-B (WHO2005) (ng/kg)	L	9,957	2,018	1,913	-	1,845	0,706
	Of+Oh	36,272	23,792	13,208	-	12,902	12,591
	Aeh	17,871	7,338	12,949	-	13,863	16,265
	Bv	0,717	0,150	0,192	-	0,231	0,163



Hessisches Landesamt für
Naturschutz, Umwelt und Geologie
Für eine lebenswerte Zukunft

www.hlnug.de

