

**Biomonitoring von Luftschadstoffen  
mit standardisiertem Grünkohl (VDI 3597/3, 2008),  
Stadt Mörfelden-Walldorf**



**Biomonitoring von Luftschadstoffen  
mit standardisiertem Grünkohl (VDI 3597/3, 2008),  
Stadt Mörfelden-Walldorf  
- Abschlussbericht -**

Auftraggeber: STADT MÖRFELDEN-WALLDORF  
Amt für Umwelt, Nachhaltigkeit und Energie  
Flughafenstraße 37  
64546 Mörfelden-Walldorf

Auftragnehmer: Umweltconsulting Prof. Klein und Dr. Quack GbR  
Aachener Straße 19  
54294 Trier  
[umweltconsulting-trier@web.de](mailto:umweltconsulting-trier@web.de)  
Tel.: 01577-329 329 0 oder 0177-48 11 858

Datum: 21. März 2014

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Problemstellung und Zielsetzungen .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>2</b>
2.1	Das Verfahren – Standardisiertes Grünkohl-Biomonitoring gemäß VDI 3597/3, 2008.....	2
2.2	Messpunkte.....	3
2.3	Verwendetes Material .....	7
2.4	Methoden .....	7
2.4.1	Anzucht, Kulturführung und Exposition .....	7
2.4.2	Probenahme .....	8
2.4.3	Analytik.....	8
2.4.4	Bewertungskriterien .....	9
<b>3</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>13</b>
3.1	Halb- und Schwermetalle.....	13
3.1.1	Antimon (Sb).....	13
3.1.2	Arsen (As).....	15
3.1.3	Blei (Pb).....	17
3.1.4	Cadmium (Cd) .....	19
3.1.5	Chrom (Cr) .....	21
3.1.6	Nickel (Ni) .....	23
3.1.7	Zink (Zn) .....	25
3.2	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) .....	27
3.2.1	16 EPA-PAH (Summenparameter).....	27
3.2.2	6 TVO-PAH (Summenparameter) .....	29
3.2.3	Benzo(a)pyren.....	30
3.3	Ursachenanalyse.....	32
3.3.1	Witterungseinflüsse.....	32
3.3.2	Räumliche Verteilung der Halb- und Schwermetalle .....	34
3.3.3	Räumliche Verteilung der Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH)..	36
<b>4</b>	<b>Handlungsempfehlungen.....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>44</b>

## Anhang

## Abbildungen

Abbildung 1: Lage und Verteilung der 14 Messpunkte des Grünkohl-Biomonitorings in Mörfelden-Walldorf 2013 .....	5
Abbildung 2: Grünkohl-Exposition am Messpunkt 08 (Badeseesee Walldorf).....	6
Abbildung 3: Grünkohl-Exposition am Messpunkt 12 (Gewerbegebiet Mörfelden) .....	6
Abbildung 4: Antimonkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 .....	14
Abbildung 5: Box-&Whisker-Plots der Antimonkonzentrationen [mg/kg TG].....	14
Abbildung 6: Arsenkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 .....	16
Abbildung 7: Box-&Whisker-Plots der Arsenkonzentrationen [mg/kg TG].....	16
Abbildung 8: Bleikonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 .....	18
Abbildung 9: Box-&Whisker-Plots der Bleikonzentrationen [mg/kg TG].....	18
Abbildung 10: Cadmiumkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 .....	20
Abbildung 11: Box-&Whisker-Plots der Cadmiumkonzentrationen [mg/kg TG] .....	20
Abbildung 12: Chromkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013.....	22
Abbildung 13: Box-&Whisker-Plots der Chromkonzentrationen [mg/kg TG].....	22
Abbildung 14: Nickelkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013.....	24
Abbildung 15: Box-&Whisker-Plots der Chromkonzentrationen [mg/kg TG].....	24
Abbildung 16: Zinkkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013.....	26
Abbildung 17: Box-&Whisker-Plots der Zinkkonzentrationen [mg/kg TG] .....	26
Abbildung 18: Konzentrationen der 16 EPA-PAHs [µg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 .....	28
Abbildung 19: Box-&Whisker-Plots der Konzentrationen der 16 EPA-PAHs [µg/kg TG].....	28
Abbildung 20: Konzentrationen der TVO-PAHs [µg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013.....	29
Abbildung 21: Box-&Whisker-Plots der Konzentrationen der 6 TVO-PAHs [µg/kg TG] .....	29
Abbildung 22: Benzo(a)pyren-Konzentrationen [µg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013.....	31
Abbildung 23: Box-&Whisker-Plots der Benzo(a)pyren-Konzentrationen [µg/kg TG].....	31
Abbildung 24: Windrichtungsverteilungen an der Station Frankfurt-Flughafen (DWD-Station 2640) .....	33
Abbildung 25: Tagesdurchschnittstemperatur und Tagesniederschlagssumme für den Zeitraum 04.10.2013-30.11.2013.....	33
Abbildung 26: Räumliche Verteilung der Schwermetall-Anreicherung (z-transformierte Werte).....	35
Abbildung 27: Räumliche Verteilung der PAH-Summen (z-transformierte Werte) .....	37
Abbildung 28: Räumliche Verteilung der PAHs aufgeschlüsselt nach Einzelsubstanzen (z-transformierte Werte).....	38

## Tabellen

Tabelle 1: Übersicht über die die Messpunkte umgebenden Nutzungen und die Kriterien für deren Auswahl.....	4
Tabelle 2: Übersicht über das verwendete Material und dessen Bezugsquellen .....	7
Tabelle 3: Bestimmungsgrenzen für die ausgewählten Schwermetalle .....	8
Tabelle 4: Liste der untersuchten 16 US-EPA/WHO-PAHs (Klassifizierung nach TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b).....	9
Tabelle 5: Bewertungskriterien für die Halb- und Schwermetallanreicherung [mg/kg TG] in Grünkohlproben (z.T. gerundet) .....	11
Tabelle 6: Bewertungsmaßstäbe für die Anreicherung der 16 EPA-PAH, der sechs TVO-PAH sowie der Leitkomponente Benzo(a)pyren [µg/kg TG] in Grünkohlproben .....	12
Tabelle 7: Massenkonzentration der 16 EPA-PAHs an einem Triebwerk (Auszug, verändert nach HLFU 1998).....	39

## 1 Problemstellung und Zielsetzungen

Die Stadt Mörfelden-Walldorf (ca. 34.500 Einwohner) liegt im Nordosten des Landkreises Groß-Gerau, zentral zwischen den Großstädten Frankfurt a.M., Darmstadt, Wiesbaden und Mainz. Im sehr dicht besiedelten „Rhein-Main“-Gebiet leben etwa fünf Millionen Einwohner. Die Autobahnen A3, A5 und A67 umgeben Mörfelden-Walldorf, die Bundesstraßen B44 und B486 kreuzen das Stadtgebiet, ebenso wie die unter anderem vom ICE genutzte Schienenverbindung von Frankfurt nach Mannheim. In unmittelbarer Nachbarschaft schließt sich nördlich der Flughafen Frankfurt am Main (FRA) an. Durch den in den 1980er Jahren erfolgten Bau der exakt südlich ausgerichteten Startbahn 18 West ist Mörfelden-Walldorf stärker in den Einflussbereich des Flughafens gerückt als zuvor. Dies bezieht sich sowohl auf Lärmemissionen westlich (Abflug 18-KNG lang) und südlich (Abflug 18-KNG kurz) von Mörfelden als auch auf die dem Flugverkehr zuzuordnenden Luftschadstoff-Emissionen in den Überfluggebieten der Stadt Mörfelden-Walldorf.

Da § 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) fordert „Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“ sieht das Umweltamt der Stadt Mörfelden-Walldorf die **Notwendigkeit der Überwachung des Umweltzustandes im Stadtgebiet**.

Eine routinemäßige Überwachung findet aber nicht statt. Die der Stadt Mörfelden-Walldorf nächstgelegenen Messstellen des Landesmessnetzes für Luft des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) liegen in Raunheim, Frankfurt-Höchst und in Frankfurt-Lerchesberg und damit mehrere Kilometer entfernt und zudem jenseits des Flughafen-Frankfurt. Die Messstellen Raunheim und Lerchesberg sind westlich und östlich der Start- und Landebahnen 07 und 25 positioniert und geben Auskunft über die Luftgüte im unmittelbaren Einflussbereich des alten Zweibahnsystems. Informationen über die Bedeutung der Flugroutenbewegungen über die Startbahn 18 West für die Luftschadstoffbelastung auf dem Gebiet der Stadt Mörfelden-Walldorf liegen somit nicht vor (vgl. HLUG 2011).

Ebenso berücksichtigen die Standorte der fünf Luftmessstationen (*Self Operated Measuring and Monitoring Installation*) der Betreibergesellschaft des Frankfurter Flughafens zwar die Flugroutenbewegungen der im Jahr 2010 neu eröffnete Landebahn Nordwest nicht aber die der Startbahn 18 West (Fraport AG 2011).

Im Rahmen des hier dargelegten Konzeptes wurde deshalb auf Initiative der Stadt Mörfelden-Walldorf ein **Biomonitoring mittels standardisiertem Grünkohl-Verfahren (VDI 3597/3)** durchgeführt. Bei dem verwendeten Verfahren handelt es sich um ein in zahlreichen Untersuchungen eingesetztes und bewährtes System zur Ermittlung der Schadstoffbelastung der Luft (vgl. u.a. Radermacher & Rudolph 1994, Franzaring 1995, Nobel et al. 2005, Müller-BBM GmbH 2008, WÄBER 2008b, 2012, 2013, CVUA 2009, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009a, 2009b). Dies ermöglicht eine eingehendere Bewertung der ermittelten Gehalte durch den Vergleich mit den Ergebnissen identisch konzipierter Untersuchungen.

Dieses Verfahren ist geeignet Anreicherungen von persistenten, organischen und anorganischen Substanzen in Pflanzen „als Immissionswirkung zu erkennen, ihr Ausmaß zu ermitteln und die Ergebnisse als Grundlage zur Bewertung der Gefährdung von Tieren und Menschen zu nutzen“ (VDI

2008). Die im Expositionszeitraum erfolgte Anreicherung von Luftschadstoffen ermöglicht zudem Rückschlüsse auf die Luftbelastungssituation an den ausgewählten Messpunkten und gibt auch „Hinweise auf mögliche gesundheitsrelevante Schadstoffanreicherungen in Gemüsepflanzen für den menschlichen Verzehr“ (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b).

Durch die Anwendung eines standardisierten Verfahrens kann auf Basis eines alle Nutzungstypen (Siedlung, Verkehr, Forst, naturnahe Bereiche etc.) berücksichtigenden *sampling design* eine **detaillierte Beschreibung der Luftbelastungssituation der Stadt Mörfelden-Walldorf** erfolgen. Die Messstellen wurden deshalb auch in Anlehnung an die VDI-Richtlinie zum emittentenbezogenen Monitoring (VDI 3597/10, 2004) ausgewählt, wobei der Flughafen als eine Kombination von „erhöhter Quelle“ und „Flächenquelle“ berücksichtigt wurde (Flugroutenbewegungen).

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3597/3 wurden die exponierten Kulturen auf ausgewählte Halb- und Schwermetalle sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) untersucht. Diese Substanzen stammen vorrangig aus vollständigen und unvollständigen Verbrennungsprozessen, wie zum Beispiel aus Industrie, häuslicher Kleinf Feuerung (Hausbrand), Kfz- und Flugverkehr sowie aus Reifenabrieb und Staubverwehungen, und stellen somit neben Feinstaub (PM10) und Ozon die wichtigsten Komponenten bezüglich der Luftbelastung dar (ATSDR 1995).

Die Stadt Mörfelden-Walldorf beauftragte die Umweltconsulting Prof. Klein & Dr. Quack GbR mit der Durchführung der Immissions-Wirkungsuntersuchungen mit dem Bioindikator Grünkohl. Der vorliegende Bericht beinhaltet die Dokumentation und die Bewertung der ermittelten Untersuchungsergebnisse.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Das Verfahren – Standardisiertes Grünkohl-Biomonitoring gemäß VDI 3597/3, 2008

Das aktive Biomonitoring-Verfahren mit Grünkohl erfolgte gemäß der VDI-Richtlinie 3597, Blatt 3 (2008) „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation) – Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl“. Hierbei handelt es sich um eine erprobtes und etabliertes Verfahren zur Erfassung der Luftschadstoffbelastung (u.a. André 1991, Radermacher & Rudolph 1994, Franzaring 1995, Nobel et al. 2005, VDI 2008, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009a, 2009b, Wäber 2012).

Dabei werden mindestens zwei Grünkohlpflanzen (*Brassica oleracea var. acephala*) pro Messpunkt für einen Zeitraum von acht Wochen in Expositionsgefäßen in etwa 1,5 m Höhe ausgebracht. Sowohl die Anzucht als auch die Exposition erfolgen unter standardisierten Bedingungen (Normerde, Düngelösung, Bewässerung, Expositionsgefäße etc.). Da die Grünkohlkulturen in keinem Kontakt zum natürlichen Boden des Messpunktes stehen und die Wasserversorgung über Glasfaserdochte aus den Vorratsgefäßen erfolgt, sind die nach der chemischen Analyse der Pflanzen ermittelten Stoffgehalte ausschließlich auf die zum Expositionszeitraum gegebene Schadstoffbelastung der Luft zurückzuführen.

Im Gegensatz zu technischen Immissionsmessungen ermöglicht dieses kostengünstige Verfahren präzise Aussagen über die Einwirkungen der Stoffe auf die Vegetation. Wäber (2012) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Immissionswirkungen an Organismen ein detaillierteres Bild abgeben können als reine Emissions- oder Immissionsmessungen der Luft, da „äußere Einflüsse, wie Klima und Messpunktfaktoren, und das Zusammenwirken verschiedener Schadstoffe einbezogen werden.“

Im vorliegenden Fall wurden pro Messpunkt **jeweils drei Grünkohlpflanzen** exponiert. Ein Exponat diente der Analytik der Halb- und Schwermetalle und ein zweites der Analytik der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH). Das dritte wurde als Rückstellprobe und für Doppelanalysen zur Sicherung interner Standards verwendet. Der Expositionszeitraum war **01.10.2013 bis 26.11.2013**.

## 2.2 Messpunkte

Die Grünkohlkulturen wurden in Abhängigkeit von den umgebenden Nutzungen an ausgewählten Standorten exponiert. Wesentliches Kriterium hierbei war, dass alle Nutzungseinheiten (Siedlung, Verkehr, Forst, naturnahe Bereiche etc.) in ausreichendem Maße berücksichtigt sind, jeweils eine ausreichende Anströmbarkeit gegeben ist und weitere Anforderungen der Richtlinie VDI 3957/3 erfüllt sind.

Dabei wurden auch ein Transekt entlang der Flugroutenbewegungen Abflug 18-KNG kurz und Abflug 18-KNG lang eingerichtet, um den Einfluss des dortigen Flugverkehrs auf die Belastung der Luftqualität erfassen zu können.

Die Vorauswahl der **14 Messpunkte** erfolgte im Rahmen einer Ortsbegehung am 03.01.2013 unter Beteiligung der Umweltconsulting Prof. Klein und Dr. Quack GbR und der Stadt Mörfelden-Walldorf, Amt für Umwelt, Nachhaltigkeit und Energie.

Tabelle 1 zeigt die umgebenden Nutzungen und die Kriterien für die Auswahl der Messpunkte auf. Die exakte Lage der ausgewählten Messpunkte ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine exakte Lagebeschreibung der einzelnen Messpunkte findet sich im Anhang 2.



**Tabelle 1: Übersicht über die die Messpunkte umgebenden Nutzungen und die Kriterien für deren Auswahl**

Messpunkt	Bezeichnung, Lage des Messpunktes	Umgebende Nutzungen	Auswahlkriterium
MP01	Gundwald	Forst	Nächstgelegene Lage zum Flughafen Frankfurt, östlich der Startbahn 18 West, in Hauptwindrichtung
MP02	NSG Mönchbruchwiese, östlich der Startbahn 18 West	Extensiv genutzte Wiese	Östlich der Flugroute der Startbahn 18 West, in Hauptwindrichtung
MP03	NSG Mönchbruchwiese, unmittelbar südlich der Startbahn 18 West	Extensiv genutzte Wiese	Direkter Überflug bei Abflug 18-KNG kurz und Abflug 18-KNG lang
MP04	NSG Mönchbruchwiese, westlich der Startbahn 18 West	Extensiv genutzte Wiese	Westlich der Flugroute der Startbahn 18 West, entgegen der Hauptwindrichtung
MP05	Gerätsbach, unmittelbar südlich der Startbahn 18 West	Extensiv genutzte Wiese	Direkter Überflug bei Abflug 18-KNG kurz und Abflug 18-KNG lang
MP06	Hegbach, südlich Mörfelden	Landwirtschaftliche Nutzung, Intensiv genutzte Wiese	Direkter Überflug bei Abflug 18-KNG kurz
MP07	Großer Wiesengrund	Extensiv genutzte Wiese	Direkter Überflug bei Abflug 18-KNG kurz
MP08	Badesee Walldorf	Freizeit und Erholung	Bedeutung für die Bevölkerung, im unmittelbaren Einflussbereich von A5 und Kiesgrube Sehring GmbH
MP09	Gewerbegebiet Walldorf, Nordendstraße	Gewerbepark	Repräsentant für gewerbliche Nutzung, im unmittelbaren Einflussbereich der Cargo City Süd, unabhängig von A5
MP10	Jean-Calvin-Straße	Grünanlage innerhalb Siedlung	Repräsentant für Gartenanlage innerhalb städtischer Siedlung, ohne Straßenverkehr
MP11	Grünschnittsammelstelle	Landwirtschaftliche Nutzung, Streuobstwiesen	Repräsentant für landwirtschaftliche Nutzung, zentrale Lage zwischen Walldorf und Mörfelden
MP12	Gewerbegebiet Mörfelden, Hessenring/Dreieichstraße	Gewerbepark	Repräsentant für gewerbliche Nutzung
MP13	Rathausplatz Mörfelden, Westendstraße	Siedlung	Repräsentant für städtische Siedlung, Repräsentant für Straßenverkehr mit Stop-and-Go
MP14	Autobahn A5, Abfahrt 24 Mörfelden-Walldorf, B486	Forst, Autobahn	Repräsentant für Straßenverkehr-flüssig



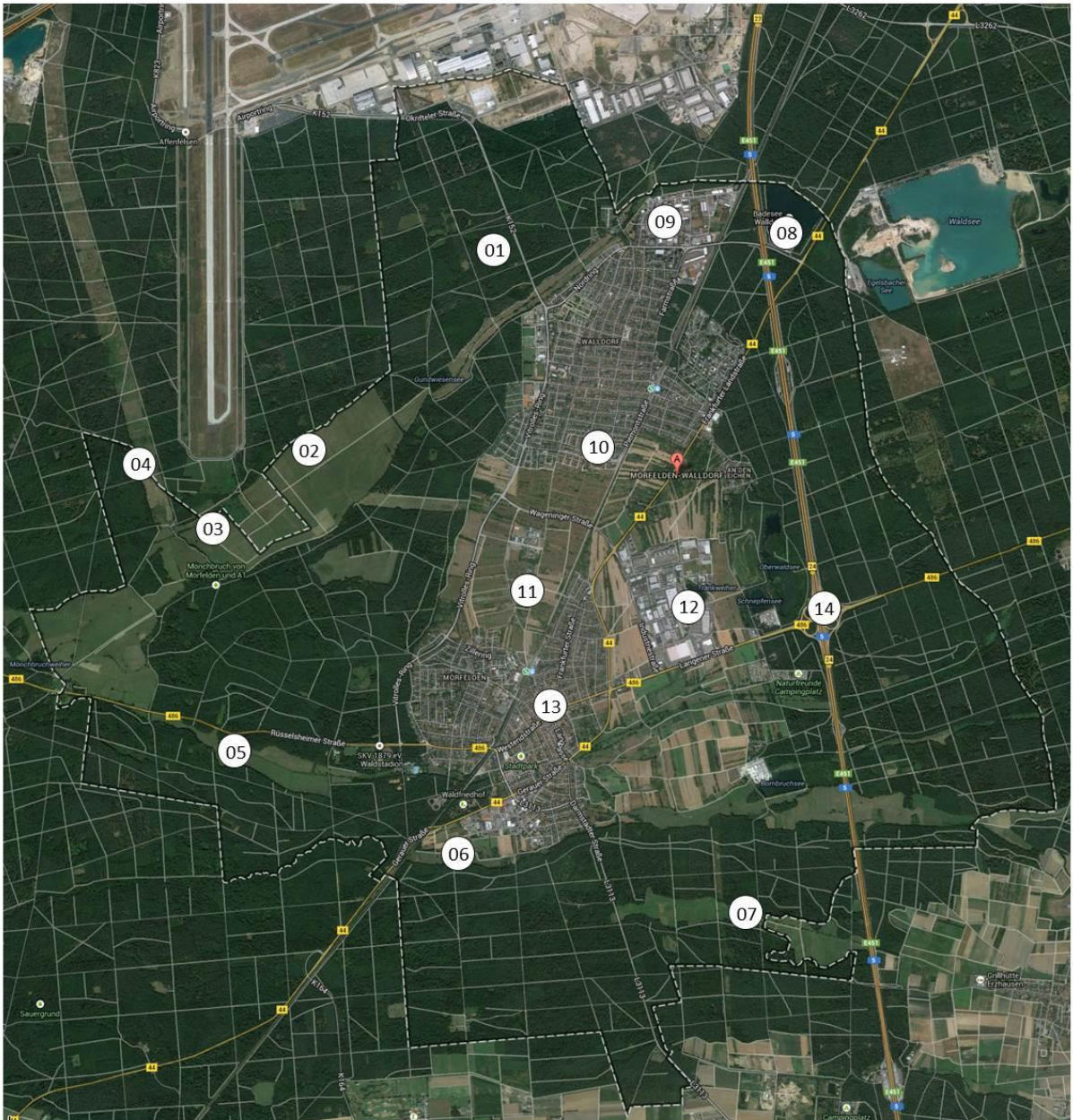


Abbildung 1: Lage und Verteilung der 14 Messpunkte des Grünkohli-Biomonitorings in Mörfelden-Walldorf 2013 (Kartengrundlage: *google earth*)





**Abbildung 2: Grünkohl-Exposition am Messpunkt 08 (Badeseesee Walldorf)**



**Abbildung 3: Grünkohl-Exposition am Messpunkt 12 (Gewerbegebiet Mörfelden)**

## 2.3 Verwendetes Material

Alle verwendeten Materialien entsprechen den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3957, Blatt 3 (2008). Tabelle 2 gibt eine Übersicht über das verwendete Material.

**Tabelle 2: Übersicht über das verwendete Material und dessen Bezugsquellen**

	Material	Hersteller/Bezug
Saatgut	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brassica oleracea</i>, Kiepenkerl, Sorte 'Halbhoher grüner Krauser' Standart Saatgut EG-Norm DE05-560</li> </ul>	Gärtnereibedarf
Substrat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einheitserde Typ ED 73 mit Grunddüngung</li> <li>• Flusssand (1:8 untergemischt)</li> </ul>	Einheitserdewerk Patzer GmbH Baustoffhandlung
Düngelösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aus Laborchemikalien (je 100 ml H<sub>2</sub>O<sub>deion.</sub>) 5,8 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 8,5 g KNO<sub>3</sub> 5,3 g NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 10,3 g (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></li> </ul>	VWR, Roth
Anzuchtgefäße	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzuchtschalen</li> <li>• Multitopfplatten</li> <li>• Pflanztöpfe (Ø 8 cm)</li> <li>• Pflanztöpfe (Ø 20 cm)</li> </ul>	Gärtnereibedarf
Expositions- vorrichtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saugdochte aus Glasfaser (Ø 5mm), je zwei pro Exponat, 90 bzw. 120 cm</li> <li>• PP-Eimer (ERZ15+D, 15 l) mit ausgeschnittenem Deckel zur Aufnahme der Pflanztöpfe</li> <li>• Korb aus Bandstahl S235JRG2 nach DIN-EN 10058 (20x3 mm), 2 x 60 cm</li> <li>• Befestigungsstange aus Rundstahl S235JRG2 nach DIN-EN 10058 (Ø 1/2 Zoll), 150 cm</li> </ul>	Thoenes-Dichtungstechnik GmbH (Klipphausen) Auer Packaging GmbH (Amerang) Schlosserei (Konstruktion: Eigenbau) Schlosserei
Expositions- zubehör	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pflanzstäbe (Holz, ca. 5 mm Ø), Länge ca. 50 cm, je drei pro Exponat</li> <li>• Nelkenringe (15 mm Ø)</li> </ul>	Gärtnereibedarf Gärtnereibedarf

## 2.4 Methoden

### 2.4.1 Anzucht, Kulturführung und Exposition

Die Aussaat der Samen erfolgte Anfang August in Anzuchtschalen im Gewächshaus. Etwa zwei Wochen später, nach Entfaltung des ersten Blattes nach den beiden Keimblättern, wurden die Pflanzen in kleine Töpfe (Ø 8 cm) umgesetzt. Weitere drei Wochen später wurden die Pflanzen in die mit Glasfaserdochten versehenen Expositionstöpfe (Ø 20 cm) ausgepflanzt, mit 100 ml Düngelösung (siehe Tabelle 2) gedüngt und zur Akklimatisation für weitere zwei Wochen ins (vor Niederschlag geschützte) Freiland verbracht. Die Gesamtdauer der Anzucht betrug acht Wochen.

Die Exposition von jeweils drei Pflanzen pro Messpunkt erfolgte in der ersten Oktoberwoche. Die Pflanzen besaßen zu diesem Zeitpunkt mindestens 10 Blätter. Das jüngste Blatt mit einer Mindest-

länge von 15 cm wurde markiert und diente als Referenzblatt bei der Probenahme. Jeweils drei Pflanzstäbe schützten die Pflanzen vor Windbruch.

Sowohl zum Zeitpunkt der Exposition als auch nach vier Wochen Expositionsdauer wurde jede Pflanze mit 150 ml Düngelösung (siehe Tabelle 2) versorgt. Diese wurde mit Wasser eingeschwenkt. Zum Zeitpunkt der zweiten Düngung wurden die Pflanzen kontrolliert. Aufsitzende Schädlinge wurden entfernt und Wasser wurde nachgefüllt.

#### 2.4.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am 28./29.11.2013. Vor der Probenahme wurde der Zustand der Indikatorpflanzen mittels des entsprechenden Kontrollblatts der VDI-Richtlinie Anhang B erfasst. Gemäß VDI 3957/3 (2008) wurden mittels Keramikscherer das markierte Blatt, die beiden nächstälteren und die fünf nächstjüngeren Blätter als Probe abgeschnitten. Blätter, die Anzeichen von Vergilbung oder Schädlingsbefall aufweisen, wurden ebenso wie die Blattstiele und Mittelrippen verworfen (VDI 2008).

Nach Bestimmung des Frischgewichtes wurden die Proben in Glasgefäße verpackt und gekühlt zum Labor transportiert.

#### 2.4.3 Analytik

Die ungewaschenen Proben wurden im Labor umgehend einer Frischgewichtsbestimmung unterzogen und homogenisiert. Alle Analysen erfolgten durch ein entsprechend zertifiziertes Labor.

Die Analytik der Halb- und Schwermetalle **Antimon (Sb), Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Zink (Zn)** erfolgte nach Mikrowellen-Druckaufschluss (DIN EN 13805) mittels ICP-MS nach DIN EN ISO 17294-2. Die zugehörigen Bestimmungsgrenzen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

**Tabelle 3: Bestimmungsgrenzen für die ausgewählten Schwermetalle**

	Bestimmungsgrenze [mg/kg TG]
Antimon (Sb)	0,01
Arsen (As)	0,01
Blei (Pb)	0,01
Cadmium (Cd)	0,01
Chrom (Cr)	0,01
Nickel (Ni)	0,1
Zink (Zn)	0,5

Die Bestimmung der ausgewählten **Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH)** erfolgt gemäß VDI 3875 mittels GC-MS sowie unter Verwendung von fünf deuterierten PAHs als interne

Standards (Soxhlet-Extraktion der Proben mit Cyclohexan/Aceton, Flüssig-/Flüssigverteilung, Extrakt-aufreinigung an Kieselgel und anschließender GC-MS-Messung im SIM-Modus).

Es wurden die Konzentrationen der aufgrund ihrer Häufigkeit und Umweltrelevanz von US-EPA/WHO als *priority pollutants* ausgewiesenen 16 EPA-PAH bestimmt (siehe Tabelle 4). Neben dem Summenparameter der 16 Einzelkomponenten ist auch die Angabe des Summenparameters der sechs PAH nach der Trinkwasserverordnung (TVO) sinnvoll (vgl. VDI 2008, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b). Als kanzerogene Leitkomponente der PAH wird gemäß VDI 3957/3 (2008) außerdem Benzo(a)pyren (BaP) gesondert ausgewertet.

**Tabelle 4: Liste der untersuchten 16 US-EPA/WHO-PAHs (Klassifizierung nach TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b)**

	Leichtflüchtige PAH	Mittel- bis schwerflüchtige PAH	PAH nach Trinkwasserverordnung (TVO)
Naphthalin	x		
Acenaphthylen	x		
Acenaphthen	x		
Fluoren	x		
Phenanthren		x	
Anthracen		x	
Dibenz(a,h)anthracen		x	
Pyren		x	
Benz(a)anthracen		x	
Chrysen(+TRI)		x	
Benzo(b)fluoranthen		x	x
Benzo(k)fluoranthen		x	x
Fluoranthen		x	x
Benzo(a)pyren		x	x
Indeno(1,2,3-cd)pyren		x	x
Benzo(g,h,i)perylene		x	x

Eine zusätzliche Qualitätssicherung der Analysenergebnisse erfolgte über die Durchführung von Doppelbestimmungen. Dabei wurden sowohl bei den Metallanalysen als auch bei der Analyse der Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe drei zufällig ausgewählte Proben (MP01, MP04, MP10) einer Doppelbestimmung unterzogen. In allen Fällen waren die Abweichungen im statistisch tolerierbaren Rahmen.

## 2.4.4 Bewertungskriterien

### 2.4.4.1 Halb- und Schwermetalle

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Halb- und Schwermetallkonzentrationen wurden durch den Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien, die ebenfalls auf der VDI-Richtlinie 3957/3 und einer vergleichbaren Fragestellung basierten, bewertet. Hierfür wurden aufgrund des zusätzlichen Fokus auf den Einfluss des Frankfurter Flughafens (Startbahn 18 West) insbesondere Studien berücksichtigt, die im Umfeld von Flughäfen durchgeführt wurden. Es muss



allerdings darauf hingewiesen werden, dass bei allen genannten Studien Flughäfen mit wesentlich geringerem Passagieraufkommen und wesentlich geringerer Anzahl an Flugbewegungen untersucht wurden. Für die Bewertung der ausgewählten Substanzen wurden nur die aktuellsten Studien (>2005) ausgewählt (Tabelle 5):

- Biomonitoring 2011 mit standardisiertem Grünkohl im Umfeld des Flughafens Berlin-Brandenburg – Gutachterliche Bewertung, Auftraggeber Flughafen Berlin-Brandenburg GmbH (Wäber 2012) [in der Folge hier: Berlin 2011]
- Biomonitoring im Umfeld des Flughafens Berlin-Schönefeld – Gutachterliche Bewertung der Untersuchungsjahre 2011 und 2012, Auftraggeber Flughafen Berlin-Brandenburg GmbH (Wäber 2013) [Berlin 2012]
- Biomonitoring von Luftschadstoffen mit dem Grünkohl-Verfahren im Umfeld des Flughafens Leipzig 2008, Auftraggeber Flughafen Leipzig/Halle GmbH (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b [Leipzig 2008]
- Biomonitoring und Depositionsuntersuchungen in der Nachbarschaft des Flughafens München 2006 und 2007, Auftraggeber Flughafen München GmbH (Wäber 2008a) [München 2006 und München 2007]

Als weitere Bewertungsgrundlage wurden mehrjährige Untersuchungen des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen im Umfeld eines Emittenten herangezogen (LANUV 2013) [in der Folge hier kurz: Lünen 2009-2012]. Da der Schwerpunkt dieser Untersuchung die Anbau- und Verzehrempfehlung war, wurden die Proben dort vor der Analyse gewaschen, was bei der Bewertung zu berücksichtigen ist. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass die Proben für 100 Tage exponiert waren. Da die Angabe der Halb- und Schwermetallkonzentrationen mit Frischmassebezug erfolgten, wurden sie entsprechend des in vorliegender Untersuchung ermittelten Trockengewichtsanteils von durchschnittlich etwa 20% mit fünf multipliziert, um so den vergleichbaren Trockengewichtsbezug herzustellen (Tabelle 5).

Für die Bewertung von Blei und Cadmium wurden zusätzlich Grenzwerte für „Höchstgehalte bestimmter Kontaminanten in Lebensmitteln“ herangezogen (EG-Verordnung Nr. 1881/2006 vom 19. Dezember 2006 und EU-Verordnung Nr. 420/2011 der Kommission vom 29. April 2011).

Die vom Chemischen und Veterinäruntersuchungsamt Freiburg durchgeführte Studie, in der Schwermetallgehalte in exponierten Grünkohlproben im Raum Straßburg/Kehl in den Jahren 2005, 2006 und 2007 untersucht wurden (CVUA 2009), wurde im Gegensatz dazu nicht berücksichtigt, da dort die Exposition der Grünkohlpflanzen in einem von der VDI-Richtlinie 3597 abweichenden Zeitraum (Ende November bis Ende Februar) erfolgte.

Da die methodische Vorgehensweise bei der Exposition von Grünkohlkulturen bei einer im Jahr 1992 durchgeführten Studie am Frankfurter Flughafen (Hanewald 1996) nicht vollständig überprüfbar war, wurde diese ebenfalls nicht als Bewertungsmaßstab herangezogen.

Auf Angaben der Zentralen Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien (ZEBS) des ehemaligen Bundesgesundheitsamtes (BGA), sogenannte ZEBS-Werte, wurde bewusst verzichtet, da diese vom BgVV zurückgezogen wurden (Bundesgesundheitsbl. 1997(40)5:182 und 2000(43)12:1010).

**Tabelle 5: Bewertungskriterien für die Halb- und Schwermetallanreicherung [mg/kg TG] in Grünkohlproben (z.T. gerundet)**

	Sb	As	Pb	Cd	Cr	Ni	Zn
EU 420/2011, Werte für Kohl-/Blattgemüse <sup>1</sup>	-	-	0,3	0,2	-	-	-
typisch ländliche Belastung <sup>2</sup>	-	0,05-0,21	0,2-2,1	0,05-0,4	<0,1-0,4	0,9-3,9	83-108
typ. städtisch-industrielle Belastung	-	0,05-0,53	0,08-7,10	0,05-0,62	<0,1-4,4	0,8-4,4	13-209
Nahrungsmittel-Prüfwert (Wäber 2012)	-	0,8	2,0	0,33	9,3	7,5	
Lünen 2009-2012 (LANUV 2013)	-	0,15-0,19	0,15-4,85	0,05-0,15	0,15-1,10	0,4-2,8	11-35
München 2006 (Wäber 2008a)	-	0,02-0,46	0,10-0,40	0,10-0,20	-	2,3-5,3	-
München 2007 (Wäber 2008a)	0,05-0,38	0,01-0,19	0,20-0,04	0,03-0,09	0,18-0,67	3,0-10,7	-
Leipzig 2008 (TÜV Süd 2009b)	0,05-0,26	0,04-0,14	0,36-0,97	0,06-0,12	0,18-0,60	0,9-2,5	21-36
Berlin 2011 (Wäber 2012)	0,09-0,58	0,14-0,36	0,50-1,70	0,05-0,15	0,27-1,28	1,7-2,8	18-43
Berlin 2012 (Wäber 2013)	0,01-0,17	0,08-0,15	0,21-0,73	0,06-0,12	0,09-0,45	2,2-4,5	25-41

#### 2.4.4.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)

Da für die Bewertung der in Grünkohl ermittelten PAH keine Höchstmengenempfehlungen für pflanzliche Lebensmittel vorliegen, muss sich die Bewertung der Gehalte ausschließlich auf den Vergleich mit den Ergebnissen bereits vorliegender Untersuchungen beschränken. Neben den zuvor bereits genannten Untersuchungen (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, Wäber 2008a, 2012, 2013) ist dies der Bericht über „Immissions-Wirkungserhebungen mit dem Grünkohlverfahren in Graz und Leoben“ im Jahr 2004, Auftraggeber Amt der Steiermärkischen Landesregierung (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2005) [Graz 2004]. Die sich daraus ergebenden Bewertungsmaßstäbe sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die in der VDI-Richtlinie 3957/3 angegebenen Beurteilungswerte wurden wegen der mittlerweile veralteten Datenlage ebenso wenig als Bewertungskriterium herangezogen wie das von der Müller-BBM GmbH (2008) durchgeführte standardisierte Grünkohl-Monitoring am Flughafen Dresden, da dort die Exposition in einem gegenüber der VDI-Norm abweichenden Zeitraum erfolgte.

Die Untersuchungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2009) zur Anreicherung von PAHs in Grünkohl im Umfeld eines Stahlwerkes werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da keine Angaben zu den Einzelsubstanzen vorliegen, sondern lediglich Angaben zum Summenparameter der 16 EPA-PAHs

<sup>1</sup> Werte mit Frischmassenbezug [mg/kg FG] angegeben.

<sup>2</sup> Nutzungstypische Belastungen für ländliche bzw. städtisch-industrielle Regionen in Bayern, Daten 2006 bis 2008 (aus: TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b)



gemacht wurden. Außerdem liegt aus dem zweiten Untersuchungsjahr (2007) lediglich von einem Standort ein einziger Wert vor.

**Tabelle 6: Bewertungsmaßstäbe für die Anreicherung der 16 EPA-PAH, der sechs TVO-PAH sowie der Leitkomponente Benzo(a)pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg}$  TG] in Grünkohlproben**

	n	$\Sigma$ 16 EPA-PAH	$\Sigma$ TVO-PAH	B(a)P
Graz 2004 (TÜV Süd 2005)	5	450-1266	106-369	2,3-12,8
München 2006 (Wäber 2008a)	13	279-948	75-190	3,3-14,3
München 2007 (Wäber 2008a)	15	214-582	80-230	2,1-5,6
München 2008 (TÜV Süd 2009a)	30	127-537	40-145	1,0-6,6
Leipzig 2008 (TÜV Süd 2009b)	8	482-667	176-241	4,7-6,9
Berlin 2011 (Wäber 2012)	12	529-966	210-365	10,0-21,0
Berlin 2012 (Wäber 2013)	12	259-557	k.A.	4,0-12,0

Als weiteres Bewertungskriterium der 16 EPA-PAH-Konzentrationen wurde das vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz entwickelte OmH-Verfahren verwendet. Der „Orientierungswert für maximale Hintergrundgehalte“ dient als Beurteilungswert für den Normalgehalt. Aus dem vorhandenen Grünkohlkultur-Datenkollektiv von allen ländlichen, bayerischen Dauerbeobachtungsstationen abseits von Quelleneinflüssen wurden aus dem Auswertzeitraum 2005 bis 2008 der OmH-Wert für 16 EPA-PAH vom BayLfU auf  $360 \mu\text{g}/\text{kg}$  TG festgelegt. „Einzelwerte unterhalb des (...) OmH werden als Hintergrundbelastung betrachtet. Überschreitet ein einzelnes zu bewertendes Analyseergebnis den OmH um weniger als 30%, so wird dies auf Grund der stoff- und konzentrationsbedingt unterschiedlichen Schwankungsbreiten von Einzelanalysen als unwesentlich betrachtet. Überschreiten mehrere Werte den OmH oder werden Einzelüberschreitungen um mehr als 30% der OmH gefunden, ist deren Ursache und Wirkungsrelevanz abzuklären.“ (BayLfU, Stand 03/2011 (abgerufen am 03.02.2014): [http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe\\_luft/orientierungswerte/doc/omh\\_organik.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe_luft/orientierungswerte/doc/omh_organik.pdf)).

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Halb- und Schwermetalle

#### 3.1.1 Antimon (Sb)

Das Halbmetall Antimon dient zur Härtung von Blei- und Zinnlegierungen und ist deswegen in verschiedensten Anwendungen als Legierungsbestandteil zu finden (u.a. auch in Akkumulatoren und Kfz-Bremsbelägen) (Schneider & Kalberlah 2000). Wegen der Freisetzung von Antimon bei Bremsvorgängen gilt es als ein guter Indikator für Kfz-verkehrsbedingte Belastung (Peichl et al. 1994, Dietl et al. 1998, Wäber et al. 1998). Während verschiedene Antimonverbindungen nach EU-Chemikalienverordnung als gesundheitsschädlich und umweltgefährdend eingestuft werden –Antimon(III)-oxid wird als möglicherweise krebserregend eingeschätzt (Dietl et al. 1998) –, gilt dies für Antimon selbst nicht.

Wie aus Abbildung 4 deutlich wird, wurde Antimon an allen Messpunkten nachgewiesen. Die höchsten Anreicherungen waren am Messpunkt 12 (Gewerbegebiet Mörfelden) zu verzeichnen, gefolgt von den Messpunkten 08, 09, 13 und 14 (Badesee Walldorf, Gewerbegebiet Walldorf, Rathausplatz Mörfelden, Autobahnabfahrt A5/B486). Bei diesen Standorten handelt es sich um die Messpunkte mit vermutet höchster Verkehrsbelastung.

Im Vergleich zu anderen Grünkohl-Studien im Umfeld der Flughäfen Berlin-Brandenburg 2011 (Wäber 2012), München 2007 (Wäber 2008a) und Leipzig/Halle 2008 (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b) wurden insgesamt eher niedrige Konzentrationen ermittelt, die demnach dem „Hintergrundbereich“ (Messpunkte 01 bis 07 und MP 10) bzw. dem „Normalbereich“ (Messpunkte 08, 09, 11-14) zuzuordnen sind (Abbildung 5). Selbst der in der am Flughafen Berlin-Brandenburg durchgeführten Studie unmittelbar an einem Autobahn-Messpunkt erzielte Höchstwert (0,58 mg/kg TG), der den in vorliegender Untersuchung an Messpunkt 12 erzielten Höchstwert um mehr als das Fünffache übersteigt, wird von Wäber (2012) in diesem Zusammenhang als „erwartungsgemäß“ bewertet.

**Vor dem Hintergrund dieser Vergleichsdaten wird deutlich, dass es keine Hinweise für eine erhöhte Anreicherung von Antimon im Untersuchungsgebiet gibt.**

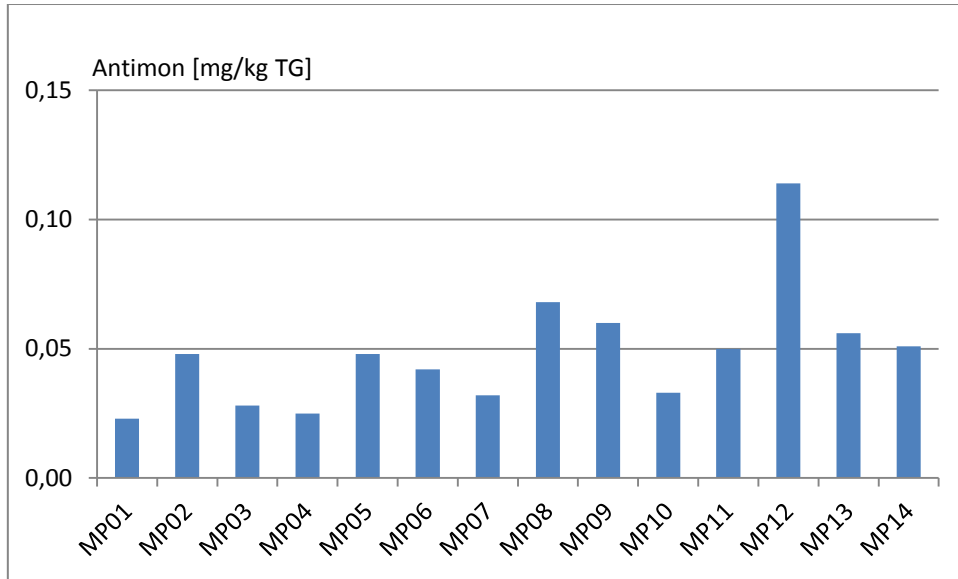


Abbildung 4: Antimonkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

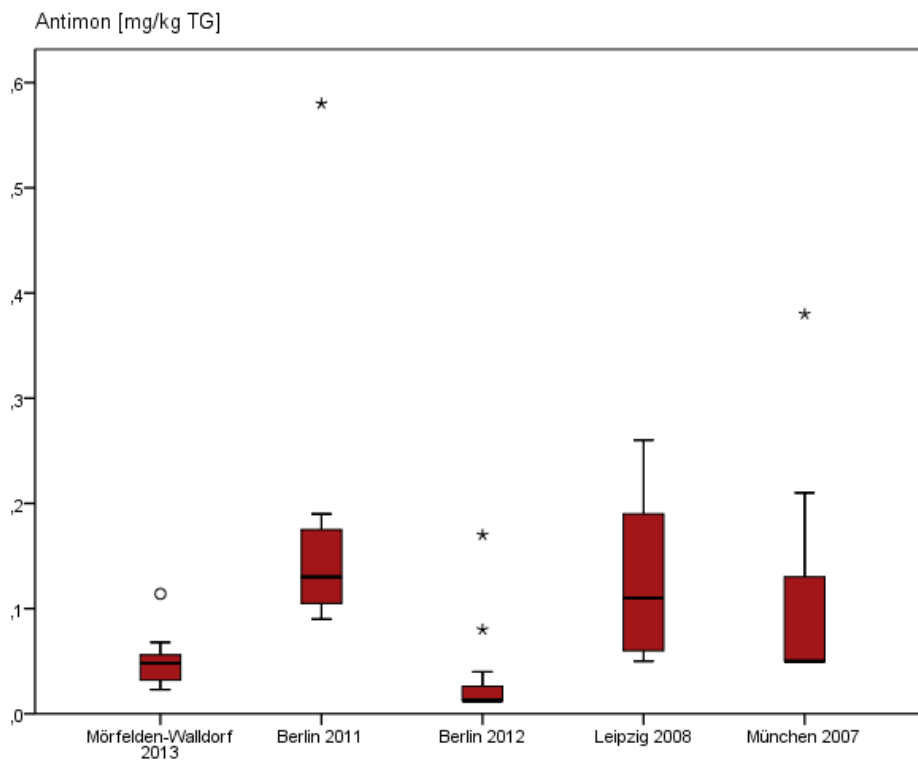


Abbildung 5: Box-&Whisker-Plots der Antimonkonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus Wäber 2008a, 2012, 2013, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b)

### 3.1.2 Arsen (As)

Das Halbmetall Arsen ist in verschiedenen Verbindungen annähernd ubiquitär in den Böden aller Kontinente verbreitet. Durch regional hohe Arsenkonzentrationen in Böden kann bei Freisetzung durch Erdbewegung (z.B. Landwirtschaft, Bautätigkeit) regional eine höhere Belastung der Umgebungsluft die Folge sein. Das Rhein-Main-Gebiet weist diesbezüglich aber keine Besonderheiten auf. Durch Verwitterung, Lösung in Wasser, biologische Prozesse und anthropogene Aktivitäten gelangt Arsen in die Umwelt, wo es nach mehr oder weniger langem Transfer im Sediment von Gewässern festgelegt wird. Der anthropogen verursachte Eintrag von Arsen in die Umwelt erfolgt im Wesentlichen über die Luft, nämlich als Bestandteil der Flugasche bei der Kohleverbrennung. Industrielle Produktionsprozesse (z.B. Elektronikindustrie, Metalllegierungen, Glasherstellung) und die Düngerherstellung sind aber ebenfalls als Quellen bekannt (Hassauer & Kalberlah 1999).

Auf den Menschen können einige Arsen-Verbindungen hochtoxisch wirken und sind als kanzerogen, teratogen und mutagen eingestuft (Schuhmacher-Wolz et al. 2007). Arsen kann auch für Vögel, aquatische und terrestrische Organismen toxisch sein und das Wachstum von Pflanzen beeinträchtigen. Aquatische Tiere reichern Arsen aus dem umgebenden Medium an. Eine Biomagnifikation in der Nahrungskette kann nicht ausgeschlossen werden.

An neun der 14 Messpunkte konnte eine Anreicherung von Arsen in den Grünkohl-Exponaten nachgewiesen werden (Abbildung 6). Während im gesamten nördlichen und westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes keine nennenswerten Arsen-Konzentrationen ermittelt werden konnten, beschränken sich die Anreicherungen auf den südöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (Messpunkte 06-07 und 10-14).

Wie aus dem Vergleich mit anderen Studien allerdings deutlich wird (Abbildung 7), befinden sich alle Konzentrationen auf einem sehr niedrigen Niveau. Im Umfeld des Flughafens Berlin-Brandenburg (Wäber 2012), im Bereich des Flughafens München 2006 und im Jahr 2007 (Wäber 2008a) sowie im Umfeld des Flughafens Leipzig (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b) wurden deutlich höhere Arsen-Konzentrationen in standardisiertem Grünkohl nachgewiesen. Ebenso erbrachten die in Kapitel 2.4.4.1 beschriebenen Untersuchungen in Lünen/NRW in den meisten Fällen höhere Belastungen.

In Anlehnung an Wäber (2012, 2013) können die in vorliegender Untersuchung erzielten Arsen-Konzentrationen demnach als „Hintergrundgehalt“ bewertet werden. Lediglich der Gehalt von 0,082 mg/kg TG an Messpunkt 10 (Jean-Calvin-Straße) wäre als „leicht erhöht“ zu bewerten. Eine von Wäber (2012) durchgeführte Gefährdungsabschätzung ergab aber selbst für den dort erzielten Höchstwert von 0,36 mg/kg TG keine nennenswerte Gefährdung.

**Vor diesem Hintergrund sind die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Arsen-Gehalte als niedrig zu bewerten. Ein Einfluss des Flughafens bzw. des Flugverkehrs auf die Arsen-Konzentrationen der Grünkohl-Proben kann nicht festgestellt werden.**

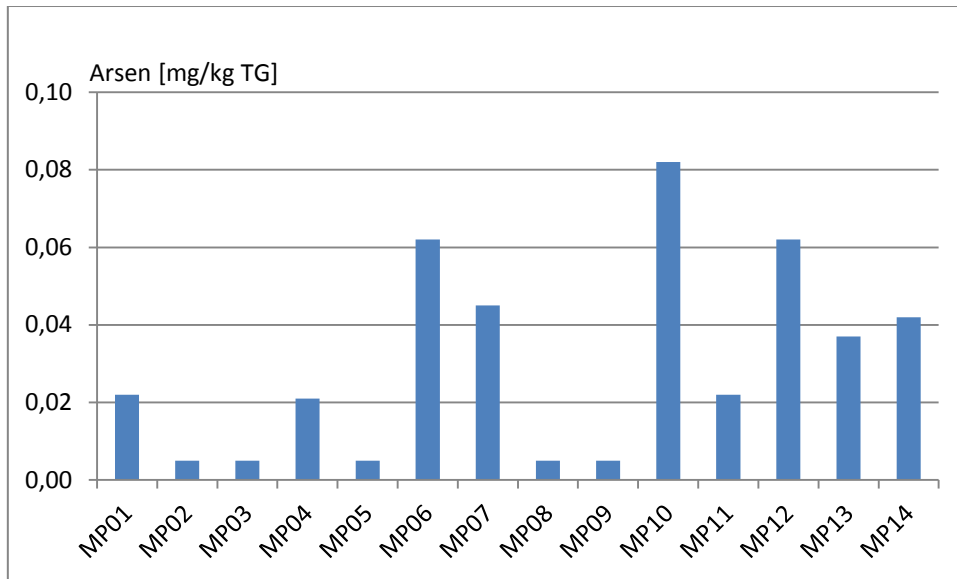


Abbildung 6: Arsenkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)<sup>3</sup>

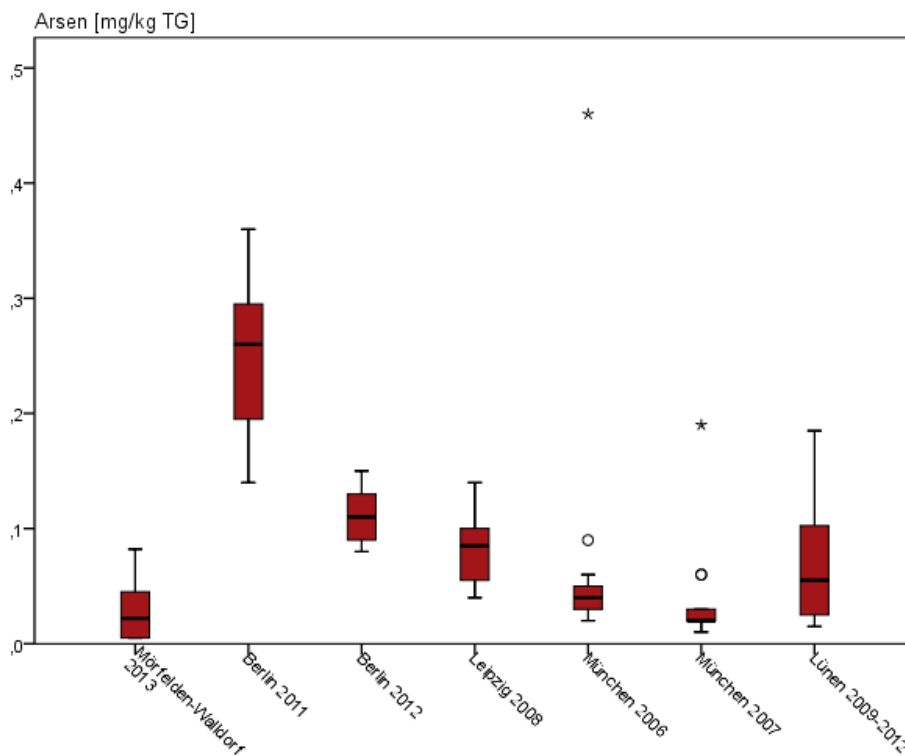


Abbildung 7: Box-&Whisker-Plots der Arsenkonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus Wäber 2008a, 2012, 2013, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, LANUV 2013)

<sup>3</sup> Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind aus statistischen Gründen als halbe Bestimmungsgrenze angegeben.

### 3.1.3 Blei (Pb)

Aufgrund seiner guten Verarbeitbarkeit und seiner hohen Dichte wird das Schwermetall Blei heute in vielfacher Weise verwendet (u.a. Maschinenbau, Legierungen, chemische Industrie). Der wesentlichste Anwendungsbereich ist die Elektrotechnik (z.B. für Autobatterien, Akkumulatoren-Herstellung). Die organische Bleiverbindung Tetraethylblei wurde als Bestandteil von Kraftstoffen von Verbrennungsmotoren (Antiklopfmittel) früher in großem Umfang in die Umwelt eingetragen. Seit Inkrafttreten des Benzinbleigesetzes (BzBlG) im Jahr 1971 ist ein deutlicher Rückgang der Bleikonzentrationen zu verzeichnen, so dass der heutige Eintrag in die Umwelt im Wesentlichen aus Altlasten herrührt.

Blei gelangt hauptsächlich durch anthropogene Aktivitäten in die Umwelt und gilt als klassischer Vertreter der luftgetragenen Schadstoffe. Gewässerbelastungen entstehen hauptsächlich durch Ausschwemmung von Blei aus Böden, durch Lufteintrag und Abwässer. Über Pflanzen, Tiere und Wasser gelangt Blei in die Nahrungskette des Menschen. Aufgrund seiner ökotoxikologischen Bedeutung (toxisch für aquatische und terrestrische Organismen, kanzerogen, teratogen, reproduktionstoxisch, eventuell endokrin wirksam, Bioakkumulationspotenzial) schlägt die EU eine Höchstmenge für Blei in Kohlgemüse vor (siehe auch Abbildung 9).

Wie aus Abbildung 8 hervorgeht, wurde Blei an allen 14 Messpunkten nachgewiesen, wobei die Grünkohl-Pflanzen von Messpunkt 11 (Grünschnittsammelstelle) mit 0,177 mg/kg TG die höchsten Gehalte aufweisen. Insgesamt gibt es lediglich geringe Unterschiede in der Blei-Anreicherung der Pflanzen. Die niedrigsten Gehalte wurden am Messpunkt 01 (Gundwald) nachgewiesen (0,076 mg/kg TG).

Wie aus dem Vergleich mit anderen Grünkohluntersuchungen deutlich wird, handelt es in allen Fällen um äußerst niedrige Blei-Anreicherungen (Abbildung 9). In allen oben bereits genannten Grünkohl-Monitoringstudien wurden höhere Blei-Gehalte ermittelt (Wäber 2008a, 2012, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, Wäber 2012). Auch die Blei-Gehalte der in Lünen/NRW exponierten Grünkohl-Kulturen weisen, trotz der Tatsache, dass die Proben gewaschen wurden, wesentlich höhere Anreicherungen auf (LANUV 2013) (Abbildung 9). Vom TÜV Süd Industrie Service GmbH (2009b) wird in diesem Zusammenhang ein Konzentrationsbereich von 0,2-7,1 mg/kg TG als typisch für ländlich geprägte Gebiete angegeben.

Die Beurteilung der Werte kann zudem auf Basis der EU-Verordnung Nr. 420/2011 der Kommission vom 29. April 2011 erfolgen, in der für Blei Höchstgehalte in Lebensmitteln festgelegt wurden. Der dort festgelegte Blei-Gehalt für Blatt- sowie für Kohlgemüse beträgt 0,3 mg/kg Frischgewicht, was bei einem Trockenmasseanteil von etwa 20% einer Konzentration von 1,5 mg/kg TG gleichzusetzen ist (Abbildung 9).

**Vor diesem Hintergrund sind die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Blei-Gehalte als äußerst niedrig zu bewerten. Selbst in verkehrsbedingt stärker beeinträchtigten Bereichen ist keine nennenswerte Anreicherung zu beobachten.**

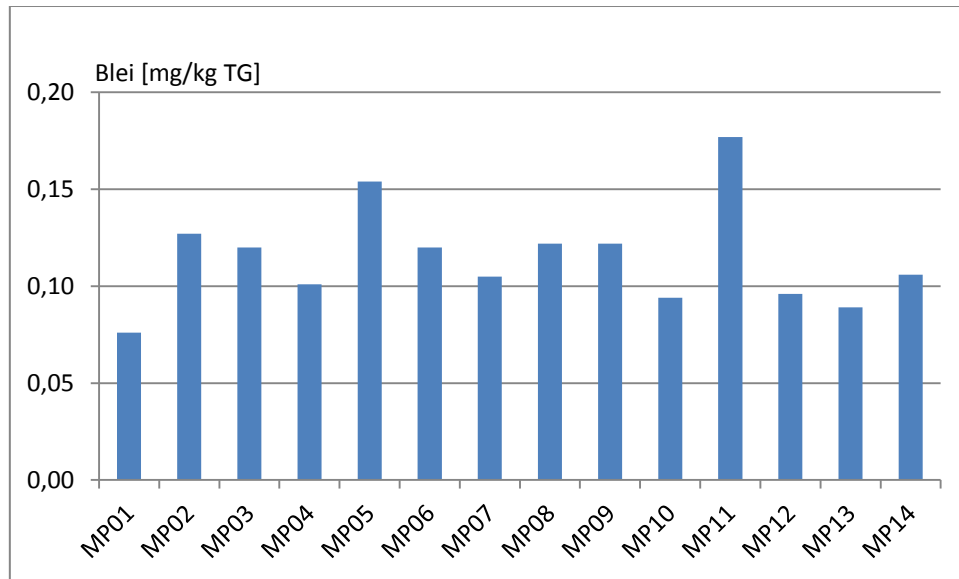


Abbildung 8: Bleikonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

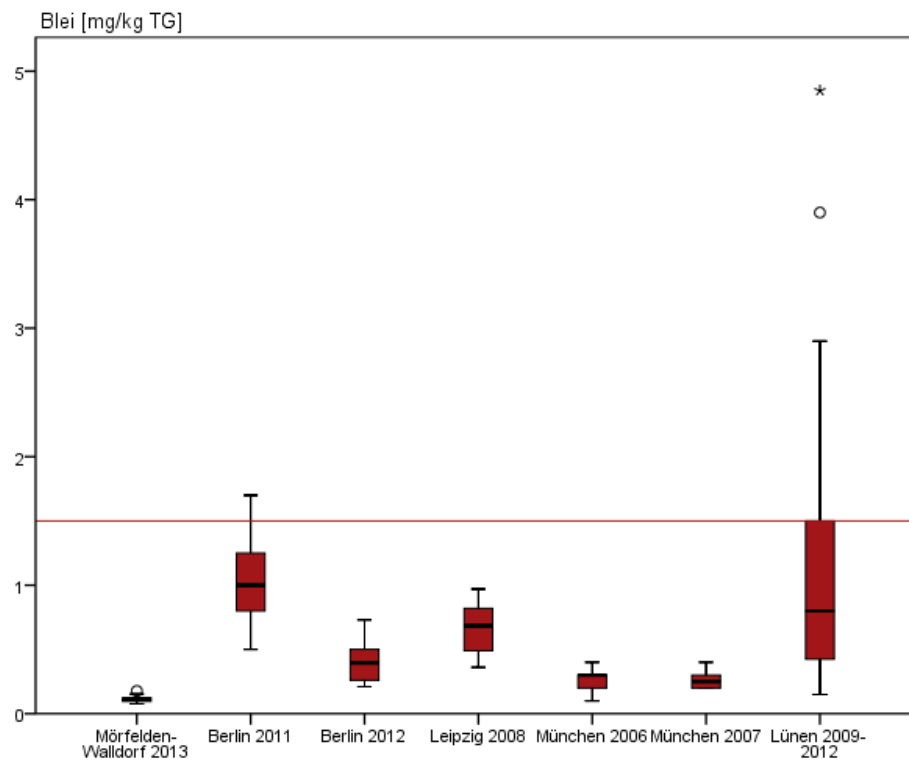


Abbildung 9: Box-&Whisker-Plots der Bleikonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (rote Linie = Höchstgehalt in Kohl- und Blattgemüse gemäß EU-Verordnung Nr. 420/2011, umgerechnet auf die Bezugsgröße Trockengewicht, TG) (Daten aus Wäber 2008a, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, Wäber 2012, 2013, LANUV 2013)



### 3.1.4 Cadmium (Cd)

Das Schwermetall Cadmium wird in der Halbleiterindustrie, bei der Stahlverarbeitung, in Batterien und Photovoltaikzellen und in der metallverarbeitenden und chemischen Industrie als Beschichtungsmaterial, Pigment und Stabilisator eingesetzt. In die Umwelt gelangt Cadmium hauptsächlich durch anthropogene Aktivitäten, wie beispielsweise Kfz-Verkehr (Scheibenbremsen), Zinkverhüttung und Kunstdüngereinsatz. Zu den natürlichen Emissionsquellen zählen Vulkanismus und Verwitterungsprozesse. Neben den meisten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung berücksichtigten Elementen gilt auch Cadmium als Bestandteil von Flugasche aus der Kohleverbrennung.

Wie aus Abbildung 10 hervorgeht, wurden an neun der 14 Messpunkte Cadmiumanreicherungen nachgewiesen. Die höchsten Gehalte treten an den Messpunkten 10, 12 und 14 (Jean-Calvin-Straße, Gewerbegebiet Mörfelden und Autobahnabfahrt A5/B486) auf.

Dass es sich aber um durchschnittlich niedrige Konzentrationen handelt, wird durch den Vergleich mit den zuvor bereits genannten Grünkohl-Studien deutlich: Die in Mörfelden-Walldorf erzielten Höchstwerte liegen im Hintergrundbereich der übrigen Untersuchungen (Abbildung 11). TÜV Süd Industrie Service GmbH (2009b) gibt in diesem Zusammenhang ein Belastungsniveau von 0,05-0,4 mg/kg TG als typisch für ländlich geprägte Gebiete an.

Da Cadmium als umweltrelevant eingestuft wird (toxisch für Menschen und aquatische Organismen, kanzerogen, Bioakkumulations- und -magnifikationspotenzial), liegt auf Vorschlag des Rates der EU eine Höchstmenge in Nahrungsmitteln vor. Der in der EU-Verordnung Nr. 420/2011 festgelegte Cadmium-Gehalt für Blattgemüse und Blattkohl beträgt 0,2 mg/kg FG, was im Rahmen der vorliegenden Untersuchung etwa 1 mg/kg TG entspricht (Abbildung 11).

**Alle im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Cadmium-Gehalte sind als äußerst niedrig einzustufen. Selbst in verkehrsbedingt stärker beeinträchtigten Bereichen ist keine nennenswerte Anreicherung zu beobachten.**

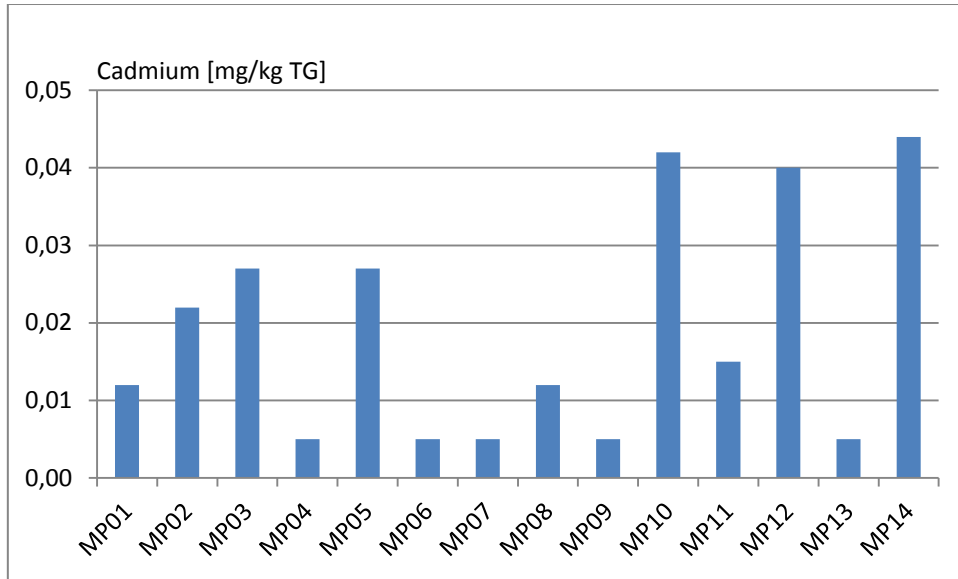


Abbildung 10: Cadmiumkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

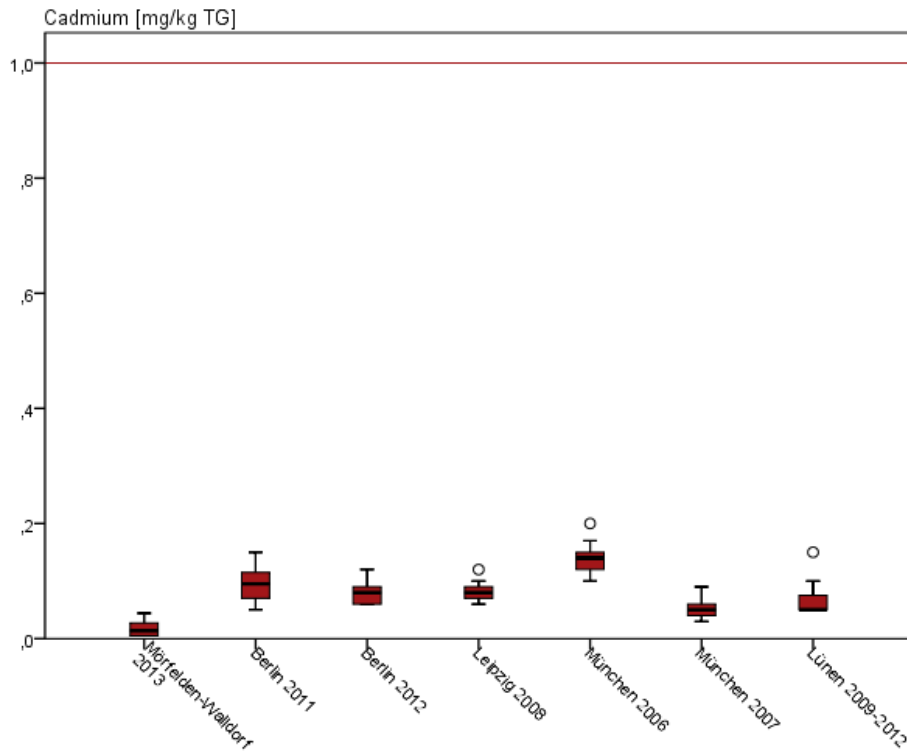


Abbildung 11: Box-&Whisker-Plots der Cadmiumkonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (rote Linie = Höchstgehalt in Kohl- und Blattgemüse gemäß EU-Verordnung 420/2011, umgerechnet auf die Bezugsgröße Trockengewicht, TG) (Daten aus Wäber 2008a, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, Wäber 2012, 2013, LANUV 2013)

### 3.1.5 Chrom (Cr)

Chrom wird in der metallverarbeitenden Industrie in Legierungen und als Korrosionsschutz eingesetzt. Weitere Anwendungen sind beispielsweise Katalysatoren, Pigmente, Oxidationsmittel und als Inhaltsstoff in Holzschutzmitteln. In die Umwelt gelangt Chrom hauptsächlich durch anthropogene Aktivitäten. Natürliche Emissionen gehen auf Vulkanismus, Verwitterung und biologische Prozesse zurück. Der anthropogene Eintrag in die Umwelt erfolgt im Wesentlichen über den Kfz-Verkehr (Abrieb von Bremsbelägen) und durch die Schwerindustrie (z.B. Stahlherstellung, galvanische Beschichtungen, Legierungen und Pigmente) (Peichl et al. 1994, Kalberlah 1999).

Da einige der zahlreichen Chromverbindungen toxisch für aquatische und terrestrische Organismen sind und den sechswertigen Chromverbindungen krebserregende Eigenschaften zugeschrieben werden (Kalberlah 1999, Umweltatlas Hessen 2005), gilt Chrom als ein Schadstoff mit hoher Umweltrelevanz.

Wie aus Abbildung 12 hervorgeht, wurde Chrom an fünf der 14 Messpunkten nachgewiesen. Der Höchstwert wird am Messpunkt 14 (Autobahnabfahrt A5/B486) erreicht. Insgesamt weist Chrom eine räumliche Ungleichverteilung auf. Es wurden aber lediglich Konzentrationen im Hintergrundbereich der anderen Grünkohl-Studien festgestellt (Abbildung 13). Die leicht erhöhten Anreicherungen an den Messpunkten 08, 10 und 14 (Badeseesee Walldorf, Jean-Calvin-Straße und Autobahnabfahrt A5/B486) sind danach dem „Normalbereich“ zuzuordnen, während die übrigen Messpunkte im „Hintergrundbereich“ liegen.

Darüber hinaus entsprechen die in vorliegender Untersuchung nachgewiesenen Konzentrationen den Gehalten, die von TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b als typisch für überwiegend ländlich geprägte Gebiete angegeben werden (<0,1-0,4 mg/kg TG).

**Wenn auch eine räumliche Ungleichverteilung der Chrom-Gehalte deutlich wird, ist dennoch nicht von einer bedenklichen Anreicherung von Chrom im Untersuchungsgebiet auszugehen.**

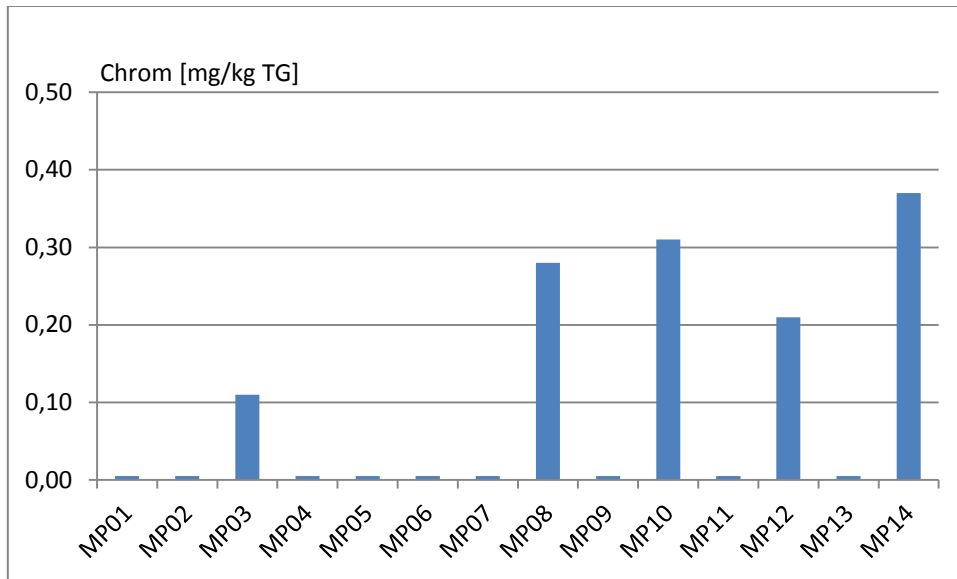


Abbildung 12: Chromkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)<sup>4</sup>

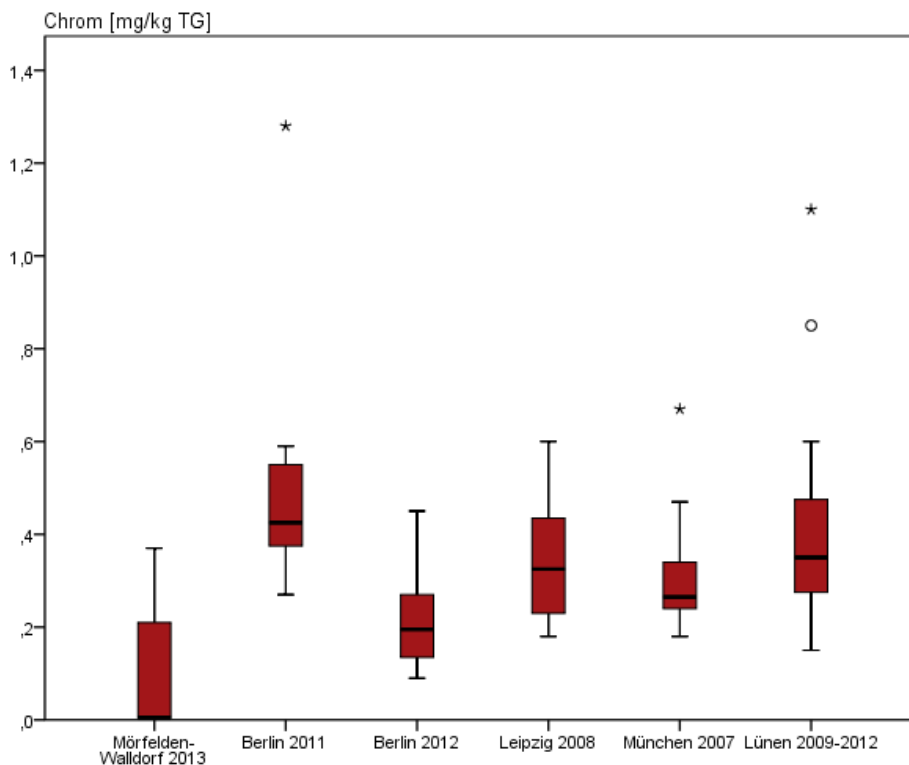


Abbildung 13: Box-&Whisker-Plots der Chromkonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus Wäber 2008a, 2012, 2013, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, LANUV 2013)

<sup>4</sup> Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind aus statistischen Gründen als halbe Bestimmungsgrenze angegeben.

### 3.1.6 Nickel (Ni)

Nickel ist in der Natur weit verbreitet, kommt aber meist nur in geringen Konzentrationen in Mineralien vor. Als Legierungsbestandteil spielt Nickel eine wichtige Rolle für die Stahlindustrie. Nickel wird außerdem unter anderem in der Elektronikindustrie, bei der Glas- und Keramikherstellung und in Batterien und Akkumulatoren eingesetzt (Schneider & Kalberlah 1999, Gerdes et al. 2005).

In die Umwelt gelangt Nickel durch Gesteinsverwitterung und anthropogene Aktivitäten (Kfz-Verkehr, Stahlindustrie, Bergbau). Nickel ist zudem ein Bestandteil von Flugasche aus der Kohleverbrennung. Unter Normalbedingungen ist der überwiegende Teil an Eisen- und Manganpartikel in Boden und Sediment gebunden. Für Pflanzen und Mikroorganismen ist Nickel ein essenzielles Spurenelement. Seine Bedeutung für Tiere und den Menschen ist noch umstritten. Es besitzt nämlich auch toxische Eigenschaften und führt bei Menschen häufig zu Kontaktallergien. Einige Nickelverbindungen sind als kanzerogen eingestuft. Im Tierexperiment wurden außerdem reproduktionstoxische und teratogene Wirkungen nachgewiesen.

Nickel wurde an allen 14 Messpunkten nachgewiesen (Abbildung 14). Die höchste Konzentration wird am Messpunkt 10 (Jean-Calvin-Straße) erreicht, während die Messpunkte 04 und 07 (NSG Mönchbruchwiese, westlich Startbahn 18 West, und Großer Wiesengrund) die niedrigsten Konzentrationen aufweisen.

Im Vergleich mit den anderen Studien wird deutlich, dass Nickel als einziges der bisher behandelten Elemente in einem erhöhten Konzentrationsbereich anzutreffen ist (Abbildung 15). Während die angegebenen Konzentrationsbereiche von Berlin (Wäber 2012), Leipzig (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b) und Lünen (LANUV 2013) niedriger liegen, weisen die Nickel-Anreicherungen der Grünkohlproben von München 2006 (Wäber 2008a) Konzentrationen auf, die im unteren Bereich der in Mörfelden-Walldorf 2013 nachgewiesenen Gehalte liegen. Lediglich die in der Untersuchung München 2007 (Wäber 2008a) angegebenen Konzentrationen sind auf dem Niveau der hier berichteten Werte.

Eine Bewertung dieser Gehalte ist aufgrund fehlender Höchst- oder Richtwerte für Nickel nicht unproblematisch. Vom LANUV (2013) wird für Nickel ein nicht näher spezifizierter „tolerierbarer Zusatzgehalt“ von 0,4 mg/kg FG (entspricht etwa 2 mg/kg TG) angegeben, der in vorliegender Untersuchung allerdings an allen Messpunkten überschritten wird.

TÜV Süd Industrie Service GmbH (2009b) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass „in überwiegend ländlich geprägten Gebiete exponierte Grünkohlkulturen in der Regel Nickelgehalte von 0,9-3,9 mg/kg TG aufweisen“. Für „städtisch-industriell geprägte Regionen“ werden allerdings Werte in einem sehr ähnlichen Konzentrationsbereich (0,8-4,4 mg/kg TG) genannt.

Wäber (2012) gibt für Nickel einen aus dem TRD-Wert errechneten „Nahrungsmittel-Prüfwert“ von 1,12 mg/kg FG an, was in vorliegender Untersuchung mit 5,6 mg/kg TG gleichzusetzen wäre. Dieser wird an den Messpunkten 02 und 10 (NSG Mönchbruch östlich der Startbahn 18 West und Jean-Calvin-Straße) überschritten.

**Im Gegensatz zu den anderen Metallen sind in Mörfelden-Walldorf eine deutliche Nickel-Anreicherung am Messpunkt 10 (Jean-Calvin-Straße) und zudem nennenswerte Anreicherungen an**

den Messpunkten 02, 03, 12 und 13 festzustellen. Da sich die Messpunkte hinsichtlich ihrer Nutzung stark unterscheiden, kann keine gesicherte Aussage zur Emissionsquelle getroffen werden.

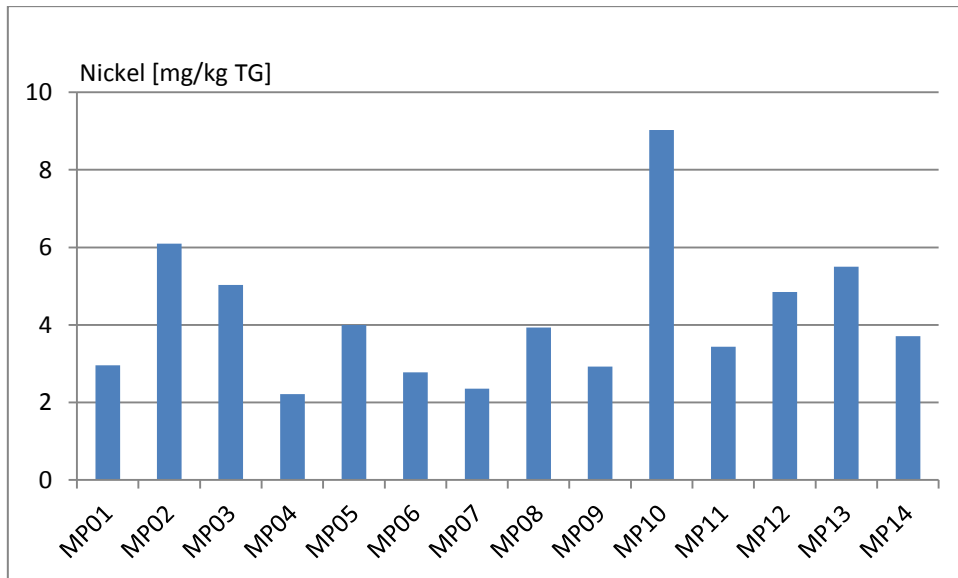


Abbildung 14: Nickelkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

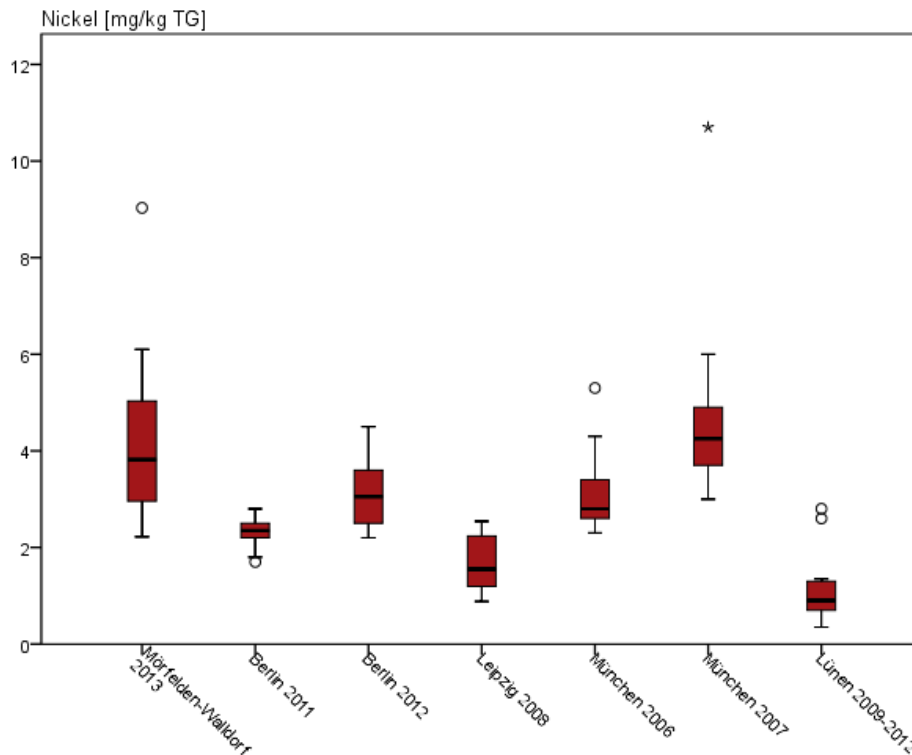


Abbildung 15: Box-&Whisker-Plots der Nickelkonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus Wäber 2008a, 2012, 2013, TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009b, LANUV 2013)

### 3.1.7 Zink (Zn)

Das „Übergangsmetall“ Zink ist ein häufiges, in der Natur fast ausschließlich in Erzen gebundenes Element. Über Gesteinsverwitterung und Auswaschungsprozesse gelangt Zink in Böden und in die Gewässer. Zink ist für alle Organismen essenziell, hat jedoch auch toxische Eigenschaften.

Verwendung findet Zink insbesondere in der metallverarbeitenden Industrie (z.B. Korrosionsschutz), aber auch in der Elektroindustrie (Herstellung nicht-aufladbarer Batterien), der Bauwirtschaft (Regenrinnen), der chemischen und der pharmazeutischen Industrie. Der Eintrag in die Umwelt erfolgt im Wesentlichen über Lösung aus Korrosionsschutzbeschichtungen und durch den Kfz-Verkehr. Weitere Quellen sind Auswaschungen aus dem Straßenbelag und Düngemittel. Darüber hinaus ist Zink auch häufig Bestandteil von Flugasche aus der Kohleverbrennung. Aufgrund der weiten Verbreitung von Zinkerzen und aufgrund der Vielzahl anthropogener Quellen gilt Zink in der Umweltüberwachung als Indikator für geogenen und anthropogenen Staubeintrag (Hüffmeyer 2007).

Zink wurde, ebenso wie das ebenfalls essenzielle Nickel, an allen Messpunkten nachgewiesen (Abbildung 16). Die niedrigsten Konzentrationen treten an den Messpunkten 06, 07 und 08 (Hegbach, Großer Wiesengrund, Badeseer Walldorf) auf und die höchsten an den Messpunkten 11 und 12 (Grünschnittsammelstelle und Gewerbegebiet Mörfelden).

Im Vergleich mit anderen Untersuchungen wird deutlich, dass es sich bei allen Zink-Anreicherungen um durchschnittliche Konzentrationen handelt (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009, Wäber 2012 und LANUV 2013) (Abbildung 17). Diese Einschätzung, wird dadurch gestützt, dass die TÜV Süd Industrie Service GmbH (2009) einen Konzentrationsbereich von 83-108 mg/kg TG als typisch für überwiegend ländlich geprägte Gebiete angibt.

Da der Eintrag im Wesentlichen über Staub erfolgt, im Untersuchungszeitraum aber überdurchschnittlich hohe Niederschläge zu verzeichnen waren und zudem keine offenen landwirtschaftlichen Nutzflächen (Äcker) in unmittelbarer Nachbarschaft der Messpunkte liegen, sind die nachgewiesenen Gehalte als „typisch“ für die angetroffenen Nutzungsformen zu bewerten.

**Vor dem Hintergrund der Vergleichsdaten wird deutlich, dass es keine Hinweise für eine erhöhte Anreicherung von Zink im Untersuchungsgebiet gibt.**



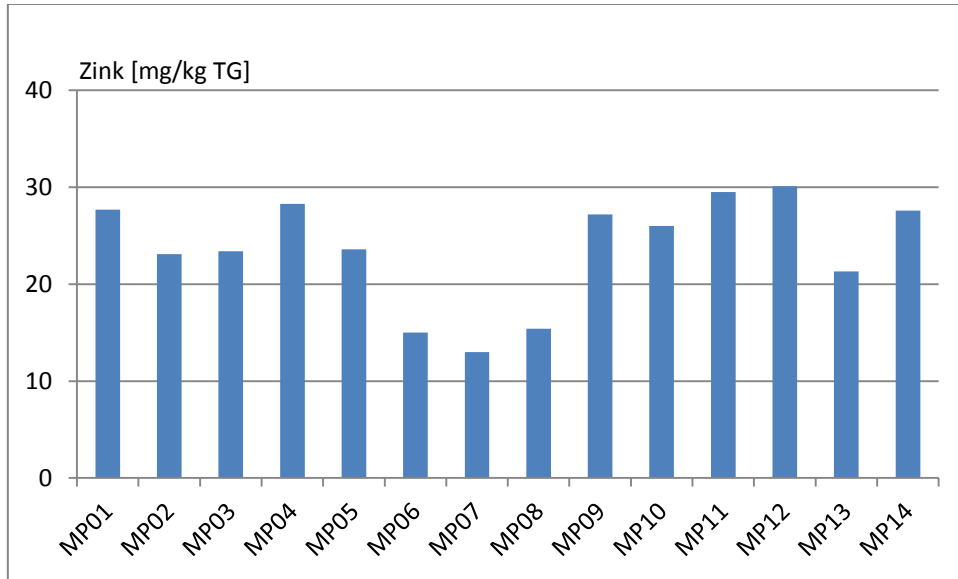


Abbildung 16: Zinkkonzentrationen [mg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

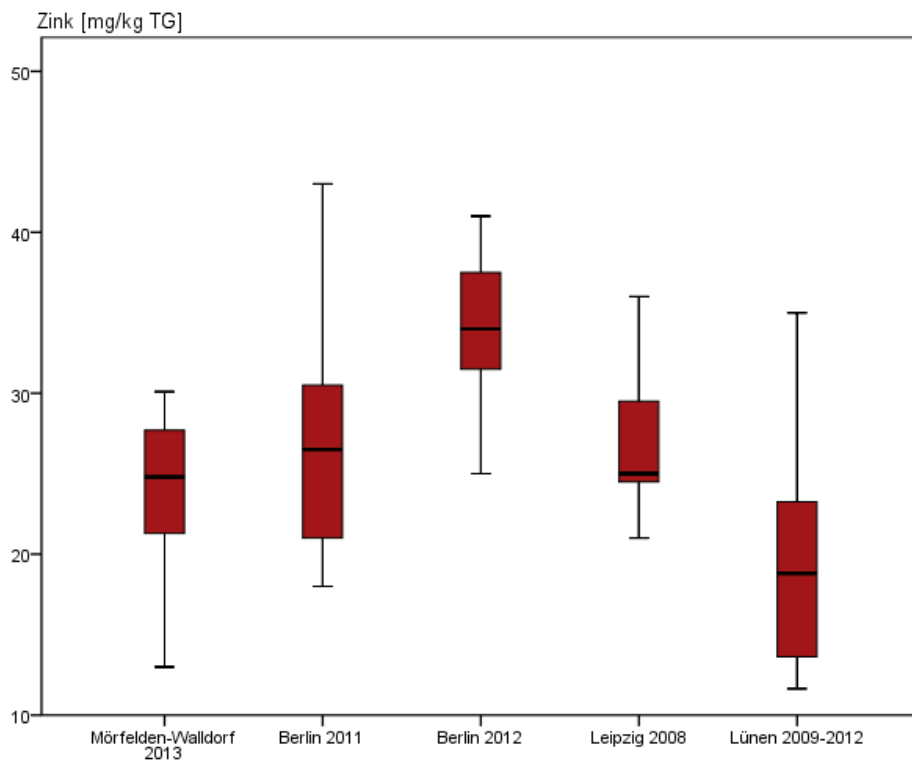


Abbildung 17: Box-&Whisker-Plots der Zinkkonzentrationen [mg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009, Wäber 2012, 2013, LANUV 2013)

## 3.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH)

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, *polycyclic aromatic hydrocarbons*, PAH) sind eine Stoffgruppe mit insgesamt mehr als 100 organischen Verbindungen, die sich durch aromatische Ringverbindungen auszeichnen. Die Anzahl der annellierten Benzolringe beeinflusst maßgeblich die physikalisch-chemischen Eigenschaften der jeweiligen Substanz. Mit zunehmender Ringzahl nehmen Flüchtigkeit und Löslichkeit ab, wohingegen die Toxizität meist zunimmt. PAH liegen fast immer als Mischungen der Einzelsubstanzen vor, wobei die Zusammensetzung dieser Mischungen von dem Entstehungsprozess abhängt. Sie entstehen bei der Pyrolyse (unvollständigen Verbrennung) von organischem Material (z.B. Kohle, Heizöl, Kraftstoff, Holz, Torf). Sie finden sich auch in gebratenen oder gegrillten Fleischprodukten, in Tabakrauch, in teer- und pechhaltigen Klebstoffen und Beschichtungen sowie in Bitumenverbindungen und Asphalt.

In der Umwelt sind PAH deswegen ubiquitär verbreitet. PAH mit bis zu drei Ringen verbreiten sich in der Atmosphäre hauptsächlich als Gase, solche mit vier und mehr Ringen sind meist an Staubpartikel gebunden. Aufgrund ihrer Persistenz und ihres Bioakkumulationspotenzials gelten sie als Umweltschadstoffe. Viele PAH sind darüber hinaus toxisch, kanzerogen, mutagen, reproduktionstoxisch und teratogen.

### 3.2.1 16 EPA-PAH (Summenparameter)

Die amerikanische Bundesumweltbehörde (US EPA) hat eine Gruppe von 16 PAHs in die sogenannte EPA-Liste der prioritären Schadstoffe (*priority pollutants*) aufgenommen. Häufig werden diese 16 „EPA-PAH“ stellvertretend für die ganze Stoffgruppe untersucht. Gemäß VDI-Richtlinie 3597/3 wird diese Stoffgruppe hier als Summenparameter angegeben.

Wie aus Abbildung 18 hervorgeht, wurden an den untersuchten Messpunkten PAH-Summengehalte im Konzentrationsbereich von 498-868 µg/kg TG nachgewiesen. Die höchsten Anreicherungen wurden an den Messpunkten 10 und 13 (Jean-Calvin-Straße und Rathaus Mörfelden) festgestellt. In Kapitel 3.3.3 findet sich eine detaillierte Ursachenanalyse für die Differenzierung der Messpunkte hinsichtlich der ermittelten PAH-Gehalte.

Da für die Bewertung der in Grünkohl ermittelten PAH keine Höchstmengenempfehlungen für pflanzliche Lebensmittel vorliegen, beschränkt sich die Bewertung der Gehalte ausschließlich auf den Vergleich mit den Ergebnissen bereits vorliegender Untersuchungen (Abbildung 19). Demnach liegen die in vorliegender Untersuchung erzielten PAH-Gehalte im Bereich der im Jahr 2011 in Berlin durchgeführten Studie (Wäber 2012) sowie im Rahmen der in Leipzig 2008 und Graz 2005 gemessenen Konzentrationen (TÜV Süd Industrie Service GmbH 2005). Im Gegensatz dazu wurden in den übrigen Untersuchungen geringere Anreicherungen nachgewiesen.

Wie in Kapitel 2.4.4.2 detailliert erläutert, gibt Wäber (2013) für den 16 EPA-PAH-Summenparameter einen für Bayern (2005-2008) erhobenen „Orientierungswert für maximale Hintergrundgehalte“ (OmH) von 468 µg/kg TG an. **Da dieser an allen Messpunkten überschritten wird, müssen bezüglich des Summenparameters 16 EPA-PAH alle Messpunkte – insbesondere auch vor dem Hintergrund der hohen Niederschläge (vgl. Kapitel 3.3.1) – als erhöht gelten.**

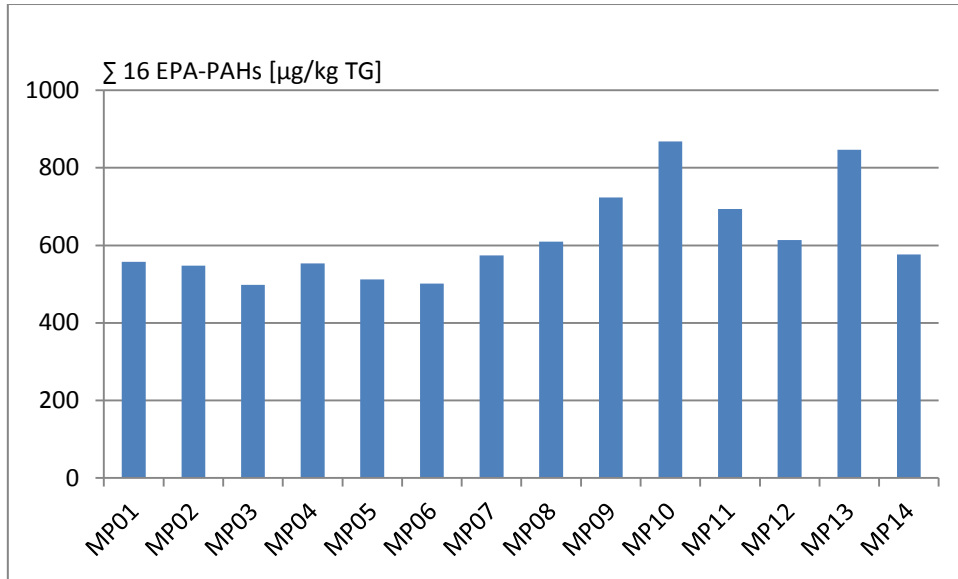


Abbildung 18: Konzentrationen der 16 EPA-PAHs [µg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

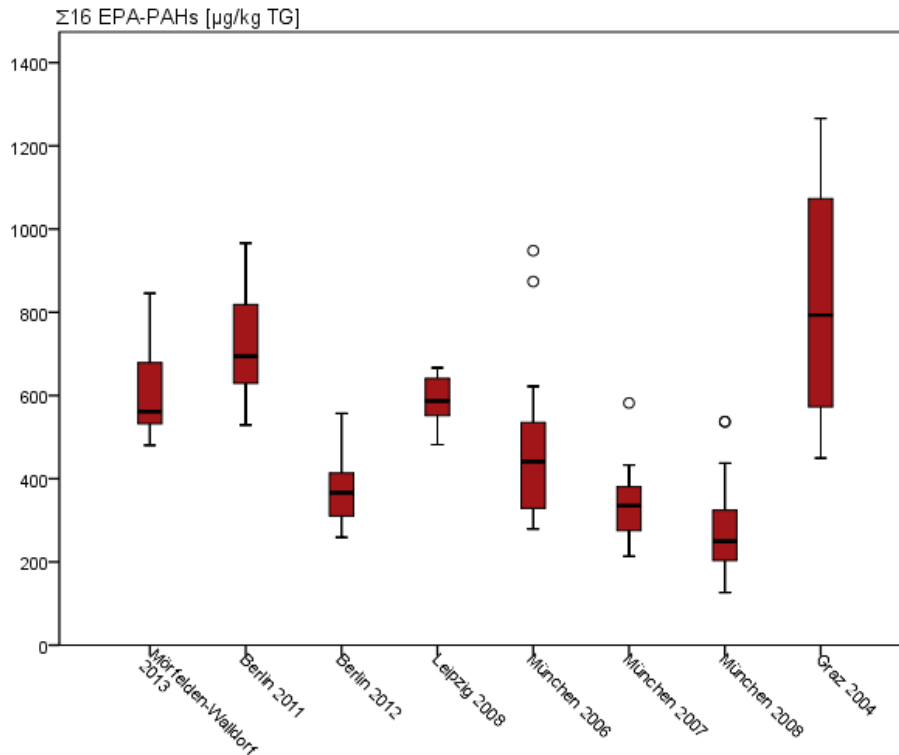


Abbildung 19: Box-&Whisker-Plots der Konzentrationen der 16 EPA-PAHs [µg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus TÜV Süd Industrie Service GmbH 2009, Wäber 2012, 2013, LANUV 2013)

### 3.2.2 6 TVO-PAH (Summenparameter)

In der VDI-Richtlinie 3597/3 werden als weiteres Bewertungskriterium der Summenparameter der sechs nach der Trinkwasserverordnung (TVO) besonders hervorzuhebenden PAH gefordert (vgl. Tabelle 4, S. 9). Die TVO-PAH-Summe liegt im Konzentrationsbereich von 148-297  $\mu\text{g}/\text{kg TG}$ , womit die für die 16 EPA-PAHs getroffene Aussage bestätigt wird (Abbildung 20/Abbildung 21).

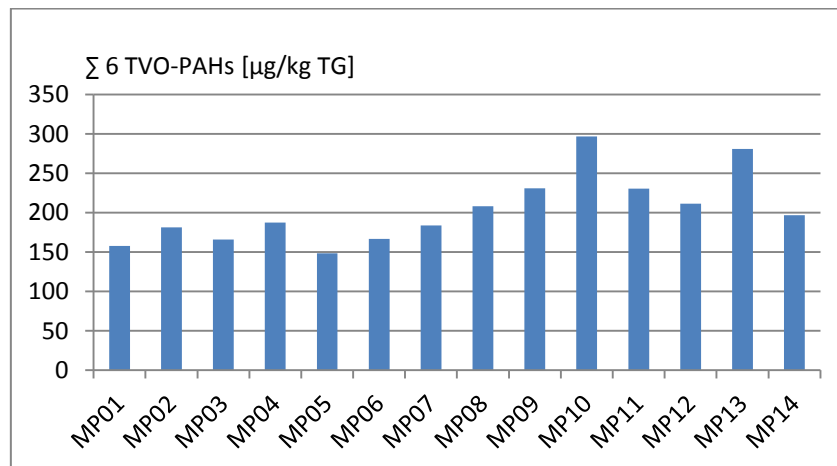


Abbildung 20: Konzentrationen der TVO-PAHs [ $\mu\text{g}/\text{kg TG}$ ] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

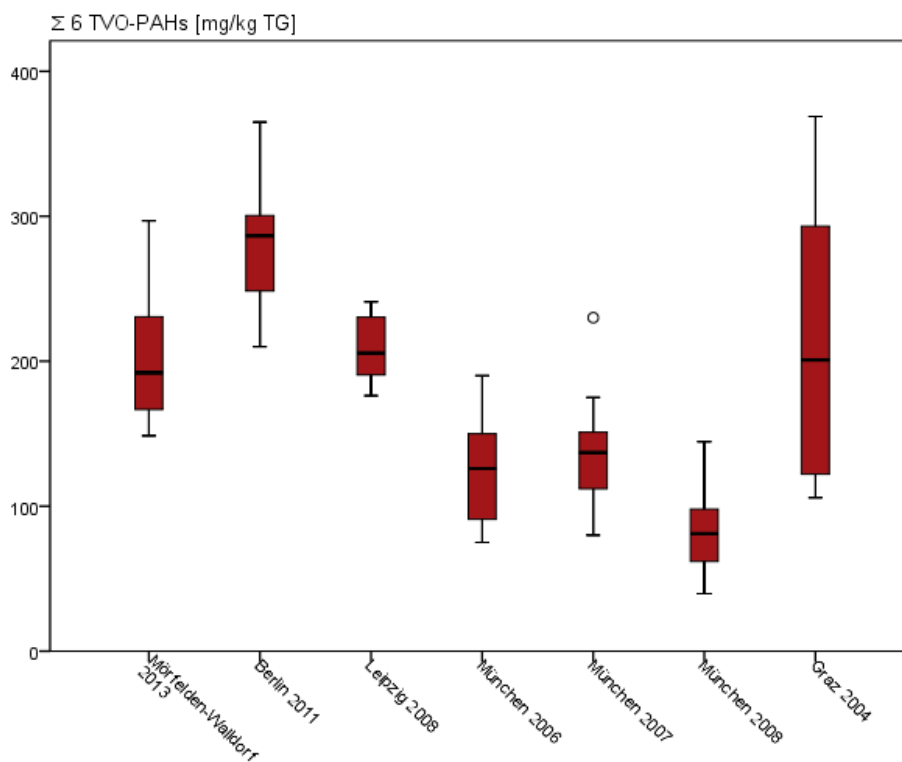


Abbildung 21: Box-&Whisker-Plots der Konzentrationen der 6 TVO-PAHs [ $\mu\text{g}/\text{kg TG}$ ] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus TÜV Süd Industrie Service GmbH 2005, 2009a, 2009b, Wäber 2008a, 2012)

### 3.2.3 Benzo(a)pyren

Gemäß VDI-Richtlinie 3597/3 wird Benzo(a)pyren als kanzerogene Leitsubstanz gesondert ausgewertet. Benzo(a)pyren konnte an allen Messpunkten nachgewiesen werden (Abbildung 22). Insgesamt wird mit den Messwerten ein Konzentrationsbereich von 12,7-22,4 µg/kg TG abgedeckt. Im Vergleich zu den Metallen und auch im Vergleich zum Summenparameter der 16 EPA-PAHs und der 6 TVO-PAHs zeigt Benzo(a)pyren allerdings ein etwas abweichendes Verteilungsprofil. Neben der im Siedlungsbereich lokalisierten höchsten Anreicherung (MP10, Jean-Calvin-Straße) gibt es ein zweites Konzentrationsmaximum im Naturschutzgebiet Mönchsbruchwiese (MP04, westlich der Startbahn 18 West).

Wie auch für die PAH-Summenwerte liegen auch für die Leitsubstanz Benzo(a)pyren keine Höchstmengen in Lebensmitteln vor. Als einziges Kriterium für pflanzenbasierte Lebensmittel schlägt der Rat der EU (Verordnung 1881/2006) mit 1 µg/kg FG ein Höchstgehalt für Säuglingsnahrung, Folgenahrung und Beikost für Säuglinge und Kleinkinder vor. Da dieser Wert aber nicht spezifisch für Kohl- oder Blattgemüse ist, wird er in der weiteren Bewertung nicht berücksichtigt.

Aus dem Vergleich mit anderen Studien geht hervor, dass im Untersuchungsgebiet erhöhte Gehalte nachgewiesen wurden (Abbildung 23). Lediglich bei der Untersuchung von Wäber (2012) am Flughafen Berlin-Schönefeld 2011 wurden ähnlich hohe Werte beschrieben. Legt man den von Wäber (2012) als spezifisch für diese Untersuchung definierten „Hintergrundgehalt“ von 15 µg/kg TG zugrunde, wurden in vorliegender Studie an zehn der 14 Messpunkte erhöhte Gehalte nachgewiesen. Lediglich an den Messpunkten 01, 02, 07 und 12 (Gundwald, NSG Mönchbruchwiese westlich Startbahn 18 West, Großer Wiesengrund und Gewerbegebiet Mörfelden) wurde dieser Wert nicht überschritten. Berücksichtigt man dabei, dass in der Untersuchung von Wäber (2012) Niederschläge in der zweiten Expositionshälfte ausgeblieben sind und sie im Folgejahr bei einer Wiederholungsuntersuchung unter normalen Niederschlagsverhältnissen deutlich niedrigere Werte (4-12 µg/kg TG) fand (Wäber 2013), sind die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Benzo(a)pyren-Gehalte vor dem Hintergrund der zum Teil hohen Niederschläge in vorliegender Untersuchung (vgl. Kap. 3.3.1) als deutlich erhöht einzustufen.

Der von Wäber (2013) im Folgejahr neu definierte „Hintergrundgehalt“ von 5 µg/kg TG wurde in vorliegender Untersuchung an allen Messpunkten deutlich überschritten. Da die Werte der übrigen Vergleichsstudien zudem deutlich unter dem in der vorliegenden Studie ermittelten Konzentrationsbereich liegen, **müssen alle Messpunkte bezüglich Benzo(a)pyren als erhöht eingestuft werden**. Die geringen Unterschiede zwischen den Messpunkten zeigen eine **relativ gleichmäßig verteilte, hohe Belastung** an. Eine lokale Quelle kann – eventuell auch bedingt durch die hohen Niederschläge (vgl. Kapitel 3.3.1) – nicht definiert werden. Vielmehr ist zu vermuten, dass die vorgefundenen Konzentrationen auf Emissionen des gesamten Ballungsraumes „Rhein-Main“ inklusive des Flughafens Frankfurt zurückzuführen sind (vgl. auch Kapitel 3.3.3).

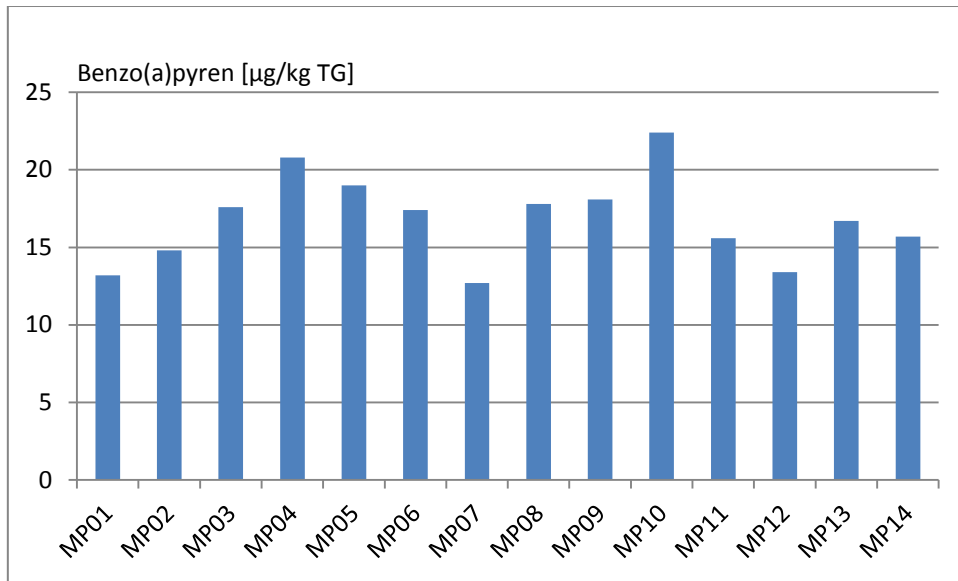


Abbildung 22: Benzo(a)pyren-Konzentrationen [µg/kg TG] in standardisiertem Grünkohl 2013 (Messpunkte-Vergleich)

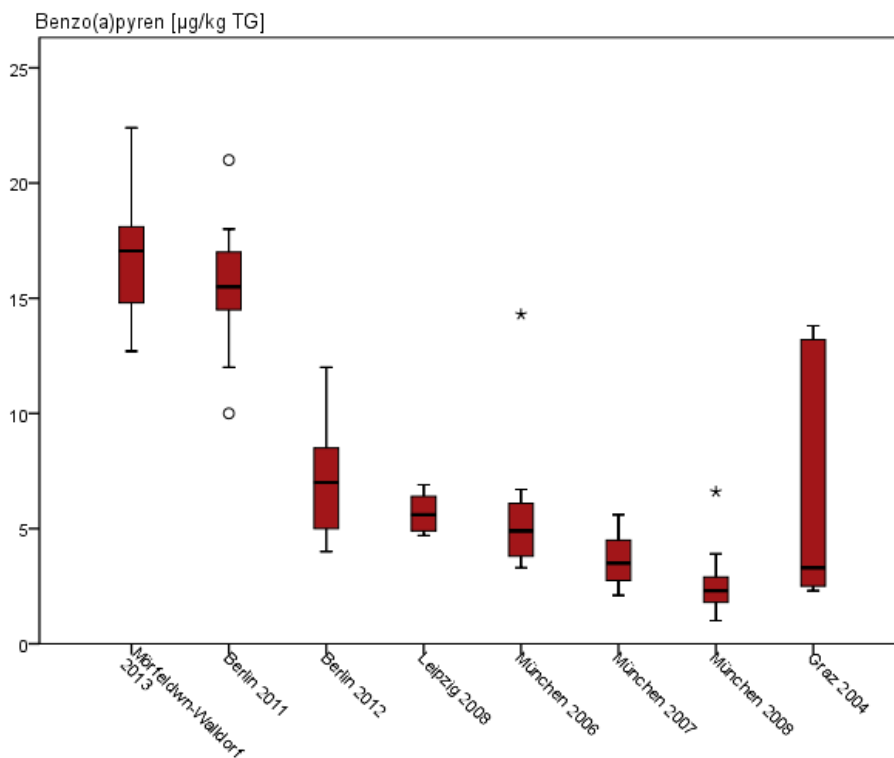


Abbildung 23: Box-&Whisker-Plots der Benzp(a)pyren-Konzentrationen [µg/kg TG] im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit standardisiertem Grünkohl (Daten aus TÜV Süd Industrie Service GmbH 2005, 2009a, 2009b, Wäber 2008a, 2012, 2013)

### 3.3 Ursachenanalyse

#### 3.3.1 Witterungseinflüsse

Durch die Anwendung eines standardisierten Verfahrens wird ein Großteil möglicher verfahrensbeeinflussender Faktoren minimiert, weswegen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen anderen Studien gewährleistet werden kann. Äußere Einflüsse, wie beispielsweise Witterungseinflüsse, sind allerdings nicht standardisierbar. Um die erzielten Ergebnisse richtig interpretieren zu können, ist die Kenntnis der klimatischen Einflüsse im Untersuchungszeitraum wichtig („temperaturabhängige Sorptionsphänomene“, Franzaring 1995). So sind beispielsweise auch die vergleichsweise hohen Stoffgehalte in den Grünkohlproben von Wäber (2012) auf fehlende Abwaschungseffekte in Folge von geringen Niederschlägen im zweiten Expositionsmonat zurückzuführen und nicht auf erhöhte Immissionen.

Als wichtigste Faktoren wurden in vorliegender Untersuchung Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Temperatur zum Zeitpunkt der Exposition ausgewählt.

Aus der in Abbildung 24 dargestellten vergleichenden Gegenüberstellung der Windverhältnisse während der Exposition gegenüber dem langjährigen Mittel geht hervor, dass im Untersuchungszeitraum keine Besonderheiten zu verzeichnen sind. Der Wind kam während der Exposition überwiegend aus SSW (ca. 27%), womit diese Windrichtung im Vergleich zum langjährigen Mittel (ca. 21%) leicht überrepräsentiert war. Weitere Hauptwindrichtungen waren NNO, S und NOO, was dem langjährigen Mittel entspricht (Abbildung 24). Insgesamt ist aus der Windrichtungsverteilung abzulesen, dass **Emissionen überwiegend auf einer Linie SSW-NNO verdriftet** wurden.

Hinsichtlich Niederschlag und Temperatur konnte auf öffentlich zugängliche Daten des Deutschen Wetterdienstes für die Station Frankfurt-Flughafen zurückgegriffen werden (DWD-ZITAT). Wie aus Abbildung 25 ersichtlich wird, kam es erst Mitte November zu einem Temperatureinbruch (<5°C) und erst gegen Ende des Expositionszeitraums wurde ein einzelner Frosttag verzeichnet. Im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010) waren beide Expositionsmonate mit durchschnittlich 12,0°C und 5,8°C deutlich bzw. etwas wärmer (1981-2010: 10,4°C bzw. 5,6°C), was sicherlich das Wachstum der Pflanzen positiv beeinflusste. Das gute Wachstum der Pflanzen (durch Protokollblatt dokumentiert) kann in einer verstärkten Aufnahme der essenziellen Metalle Nickel und Zink resultieren und für alle nicht essenziellen Stoffe eine Verdünnung bedeuten.

Die langjährigen Mittelwerte des Niederschlags an der DWD-Station Frankfurt-Flughafen betragen im Oktober 55 mm und im November 49 mm. Im Vergleich dazu waren im Untersuchungszeitraum mit 93,7 mm bzw. 64,6 mm **deutlich höhere Niederschläge** zu verzeichnen. Insbesondere die beiden Starkregen am 05.10.2013 und 26.10.2013 können Abwaschungseffekte von Staub und den darin enthaltenen chemischen Substanzen nach sich ziehen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass **gehäuft auftretende Regenereignisse die Ausbreitung lokaler Emissionen einschränken** können. Möglicherweise war die Erfassung lokaler Emissionen in dieser Studie durch die insgesamt hohen Niederschläge und häufigen Regenereignisse beeinträchtigt.

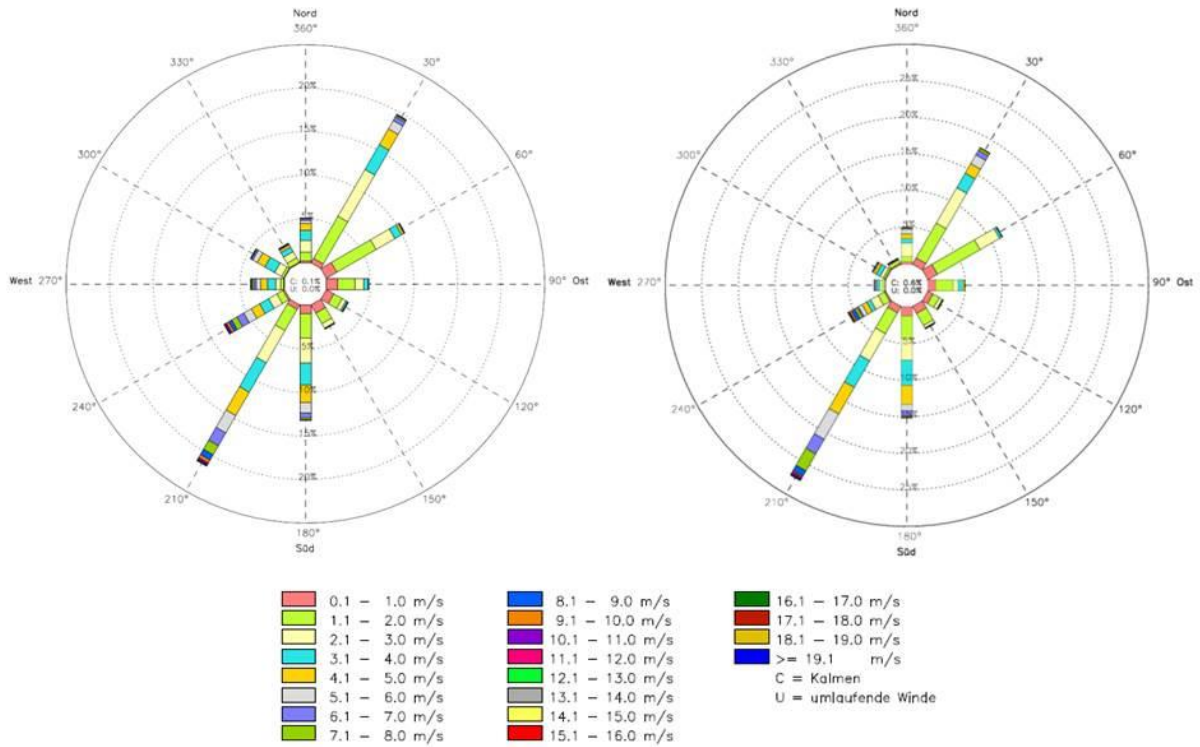


Abbildung 24: Windrichtungsverteilungen (Stärkewindrose, Angaben in Prozent der Jahresstunden) an der Station Frankfurt-Flughafen (DWD-Station 2640) für den Zeitraum 01.01.2001-31.12.2010 (links) sowie für den Expositionszeitraum 04.10.2013-30.11.2013 (Datenquelle: DWD, Herstellung: DWD Essen)

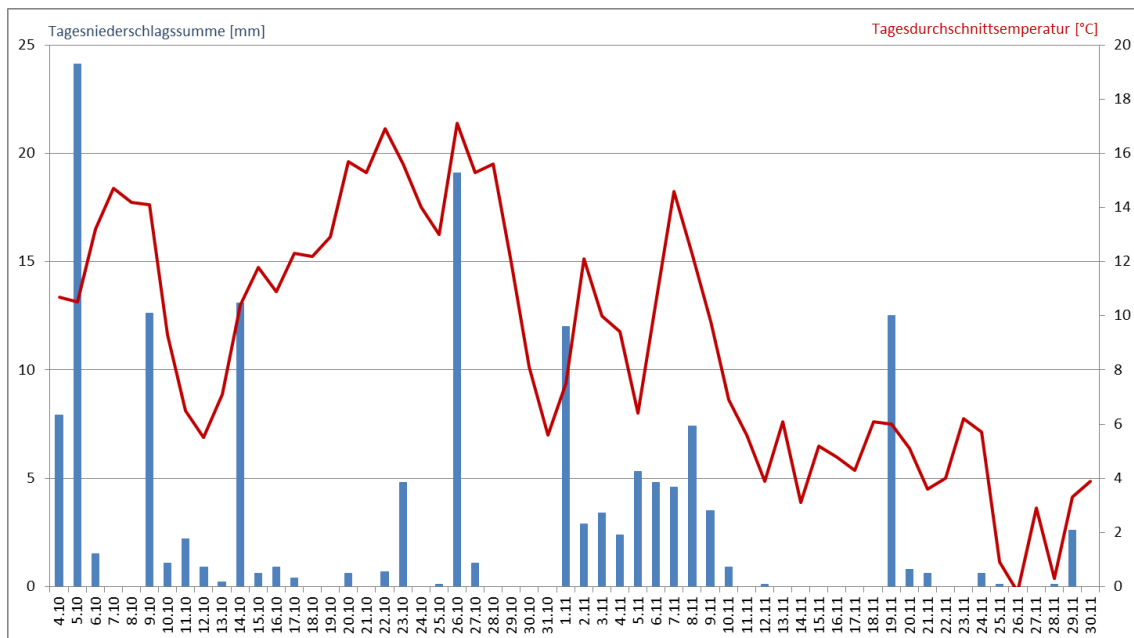


Abbildung 25: Tagesdurchschnittstemperatur (in 2 m Höhe) (rot) und Tagesniederschlagssumme (blau) für den Zeitraum 04.10.2013-30.11.2013 (Datenquelle: DWD, Station Frankfurt-Flughafen)



### 3.3.2 Räumliche Verteilung der Halb- und Schwermetalle

Um den Einfluss möglicher Emittenten auf die in den Grünkohl-Exponaten vorgefundenen Metallkonzentrationen abbilden zu können, soll eine räumliche Analyse der Stoffgehalte durchgeführt werden. Im Fokus stehen dabei die potenziellen Emittenten Flughafen Frankfurt/Main (inkl. Cargo City Süd und Flugroutenbewegungen über die Startbahn 18 West), der Siedlungsbereich Mörfelden-Walldorf (inkl. der Gewerbegebiete) sowie die Autobahn A5.

Abbildung 26 weist die an den 14 Messpunkten festgestellten Belastungsunterschiede stoffbezogen anhand von sog. z-Transformationen der Analysenwerte (= Differenz eines Messwertes zum Mittelwert aller Messpunkte bezogen auf die Standardabweichung) aus. Dabei ist die Länge eines Balkens (positiv wie negativ) als die relative Abweichung des Messwertes vom Mittelwert aller Messpunkte in vorliegender Untersuchung zu interpretieren. Große Werte verdeutlichen hier eine große Abweichung vom Mittelwert und sind nicht als hohe Belastungswerte zu interpretieren.

Demnach wird deutlich, dass hinsichtlich der ausgewählten Metalle „Belastungsschwerpunkte“ an den Messpunkten 10, 12 und 14 (Jean-Calvin-Straße, Rathausplatz Mörfelden und Autobahnabfahrt A5/B486) bestehen. Es sind allerdings unterschiedliche Metalle dafür verantwortlich. An Messpunkt 10 sind insbesondere Nickel und Arsen charakteristisch, während an Messpunkt 12 neben Cadmium und Chrom insbesondere Antimon dominiert. Das Profil an Messpunkt 14 wird im Wesentlichen von Cadmium und Chrom geprägt. Aufgrund der unterschiedlichen Metallprofile ist an diesen Messpunkten auch von unterschiedlichen Quellen auszugehen.

Da Antimon, Cadmium und Chrom typische Vertreter der Metalle sind, die durch Abrieb von Kfz-Bremsanlagen in die Umwelt eingetragen werden, kann der Kfz-Verkehr am Messpunkt 14 (**Autobahnabfahrt A5/B486**) als Hauptemittent vermutet werden. Dies gilt auch für den Messpunkt 12 (**Gewerbegebiet Mörfelden**), an dem diese drei Halb- und Schwermetalle in annähernd gleicher Häufigkeit auftreten. Dass Antimon in dieser Darstellung so dominant ist, liegt lediglich daran, dass sich die anderen Messpunkte hinsichtlich ihrer Antimon-Anreicherung nur geringfügig unterscheiden (vgl. Abbildung 4, S. 14). Hinsichtlich der Antimon-Quelle an diesem Messpunkt kann vermutet werden, dass das höhere Aufkommen von Schwerlastverkehr die Antimon-Anreicherung im Gewerbegebiet verursachte. Unter Umständen ist das Verkehrsaufkommen im **Gewerbegebiet Walldorf** (MP09) geringer, denn hier führt Antimon zwar auch zu einer leicht positiven Abweichung (Abbildung 26), insgesamt wurden hier aber deutlich geringere Metall-Anreicherungen ermittelt. Ebenfalls deutlich geringere Metall-Anreicherungen wurden an dem zweiten Autobahn-nahen Standort (**Badeseer Walldorf**, MP08) nachgewiesen. Dies lässt vermuten, dass das Erholungsgebiet außerhalb des Einflussbereichs der Autobahn A5 liegt.

Das Metallprofil an Messpunkt 10 (**Jean-Calvin-Straße**) weist, wie bereits erwähnt, ebenfalls überdurchschnittliche Anreicherungen an Cadmium und Chrom auf, wenngleich in der näheren Umgebung dieses Messpunktes nicht von nennenswertem Kfz-Verkehr ausgegangen werden kann. Da neben diesen beiden Substanzen aber insbesondere Arsen und Nickel dominieren, muss hier von mehreren Quellen ausgegangen werden. Die plausibelste Erklärung wäre, dass im Wesentlichen der Hausbrand für dieses Profil verantwortlich ist. Gegebenenfalls wäre interessant zu wissen, ob in der Umgebung des Messpunktes eine überdurchschnittliche Häufung von Kaminfeuerung vorhanden ist.

Überraschend ist, dass der Messpunkt 13 (**Rathausplatz Mörfelden**), für den ursprünglich ebenfalls eine höhere Kfz-Beeinflussung angenommen wurde („*stop-and-go-Verkehr*“), hinsichtlich der Metalle unterdurchschnittlich belastet ist. Eine Erklärung hierfür kann nicht geliefert werden.

Aufgrund der überdurchschnittlichen Blei-Anreicherung an Messpunkt 11 (**Grünschnittsammelstelle**) wird dieser Standort in Abbildung 26 ebenfalls als leicht erhöht klassifiziert. Dies darf aber nicht überinterpretiert werden, da gerade im Falle von Blei in den Grünkohl-Kulturen lediglich sehr niedrige Konzentrationen nachgewiesen wurden (vgl. Abbildung 9, S. 18).

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Schwermetall-Anreicherung an den außerstädtischen Messpunkten (Messpunkte 01 bis 07), fällt auf, dass sie größtenteils unterdurchschnittlich belastet sind. Hinsichtlich der Metalle ist weder ein nennenswerter Einfluss des Betriebs am Flughafen Frankfurt (inkl. Cargo City Süd) auf die Exponate feststellbar (**Gundwald**, MP01) noch weisen die **Messpunkte mit direktem Überflug** (NSG Mönchbruchwiese, Geräthsbach, Hegbach, Großer Wiesengrund; Messpunkte 02 bis 07) Besonderheiten auf. Damit können die Ergebnisse eines in den Jahren 2006 bis 2008 durchgeführten Biomonitorings bestätigt werden, in dem im Bereich der Cargo City Süd im Vergleich zu zwei Referenzstandorten keine erhöhten Metallbelastungen in Moosen, Bienenhonig und Pollen nachgewiesen werden konnten (Fraport AG 2009).

Im Vergleich mit der in Kapitel 2.4.4.1 bereits erwähnten, länger zurückliegenden Untersuchung mit Grünkohl-Exponaten am Flughafen Frankfurt (Hanewald 1996) scheinen trotz zunehmender Flugbewegungen offensichtlich keine nennenswerten zusätzlichen Anreicherungen seit 1996 stattgefunden zu haben.

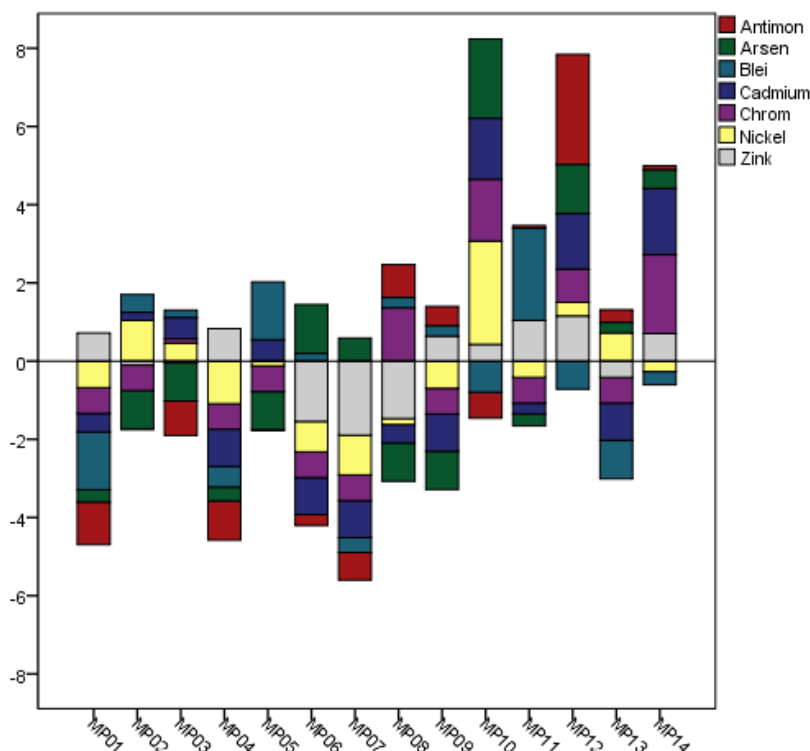


Abbildung 26: Räumliche Verteilung der Schwermetall-Anreicherung (z-transformierte Werte)

Insgesamt wird bezüglich der Metallanreicherungen (unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nur sehr niedrige bis niedrige Anreicherungen ermittelt wurden) eine Zweiteilung in besiedelte Gebiete und in einen außerstädtischen Bereich (z.B. Naturschutzgebiete) deutlich. Ob dies letztlich alleine durch die Nutzungsform erklärt werden kann oder aber auch von den vorherrschenden Windrichtungen (vgl. Kapitel 3.3.1) beeinflusst ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht abschließend geklärt werden.

### 3.3.3 Räumliche Verteilung der Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH)

Um ein umfassendes Bild der Luftgüte der Stadt Mörfelden-Walldorf zeichnen zu können, soll im Folgenden die räumliche Verteilung der PAH-Anreicherungen unter Berücksichtigung potenzieller Emittenten analysiert werden. Im Fokus stehen dabei folgende Fragen:

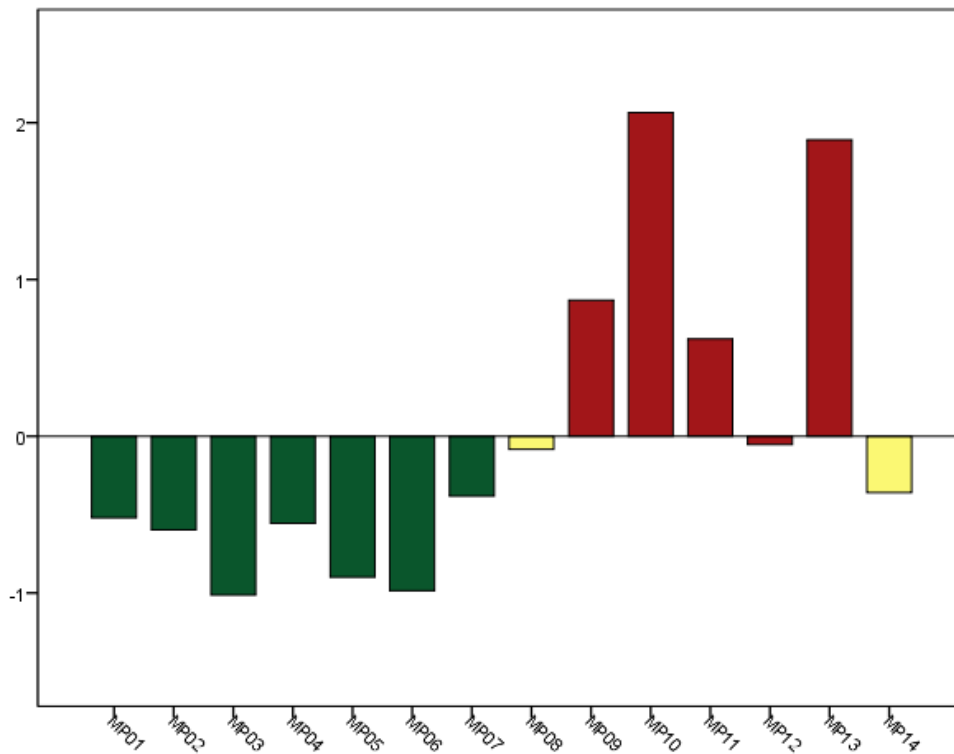
- Gibt es einen nachweisbaren Einfluss des Flughafens Frankfurt/Main (inkl. Cargo City Süd) und der Flugroutenbewegungen über die Startbahn 18 West auf die PAH-Verteilung im Stadtgebiet Mörfelden-Walldorf?
- Gibt es Unterschiede in der PAH-Belastung im Siedlungsbereich (inkl. Gewerbegebiete) gegenüber den außerstädtischen Messpunkten?
- Hat die Autobahn einen Einfluss auf die PAH-Belastung von Mörfelden und Walldorf?

Wie bei den Metallen werden diese Fragen anhand von Graphiken aus den z-transformierten Werten der Stoffkonzentrationen beantwortet, welche die zwischen den Messpunkten ausgebildeten Unterschiede verdeutlichen.

Wie aus Abbildung 27 hervorgeht, lassen sich die ausgewählten Hauptnutzungstypen („außerhalb von Siedlungen“, „Siedlung und Gewerbe“ und „Autobahn“) hinsichtlich ihrer PAH-Anreicherung deutlich differenzieren. Zum einen ist mit Ausnahme des Messpunkts 12 (Gewerbegebiet Mörfelden) eine überdurchschnittliche PAH-Anreicherung im Siedlungsbereich (MP09 bis MP13) festzustellen. Im Gegensatz dazu weisen sowohl die außerhalb der Siedlungen befindlichen Messpunkte (MP02 bis MP07) als auch die beiden Messpunkte an der Autobahn (MP08 und MP14) eine unterdurchschnittliche PAH-Belastung auf. Daraus kann abgeleitet werden:

- Neben der ubiquitär auftretenden PAH-Belastung ist im Siedlungsbereich eine lokale Emission (z.B. Hausbrand) hinzuzurechnen. Diese ist an den Messpunkten 09, 10, 11 und 13 (**Gewerbegebiet Walldorf, Jean-Calvin-Straße, Grünschnittsammelstelle, Rathausplatz Mörfelden**) besonders ausgeprägt. Diese Verteilung korrespondiert mit den in Kapitel 3.3.1 erläuterten vorherrschenden Windrichtungen, denn aufgrund der Hauptausrichtung auf die SSW-NNO-Achse findet kaum Verdriftung in die westlich oder östlich der Siedlungsbereiche gelegenen Gebiete statt. Da die Längsachse der Stadt Mörfelden-Walldorf ebenfalls dieser Himmelsrichtung entspricht, verbleiben lokale Emissionen im Siedlungsbereich bzw. werden parallel dazu verdriftet.
- Die deutlich unterdurchschnittliche Belastung in den Messpunkten westlich des Siedlungsbereichs (**Gundwald, Naturschutzgebiet Mönchsbruch, Geräthsbach**) und südlich von Mörfelden (**Hegbach, Großer Wiesengrund**) weist darauf hin, dass die hier ermittelten PAH-Anreicherungen hauptsächlich aus dem Ferntransport resultieren.

- Hinsichtlich der beiden nah an der Autobahn A5 gelegenen Messpunkten (**Badeseer Walldorf, Autobahnabfahrt A5/B486**) bleibt festzuhalten, dass es sich in beiden Fällen um unterdurchschnittliche PAH-Anreicherungen handelt. Unabhängig von der Entfernung des Messpunktes von der Autobahn (MP08: Luftlinie etwa 200 m, MP14: etwa 15 m) stellt somit der fließende Kfz-Verkehr eine im Vergleich zum Hausbrand nachgeordnete PAH-Quelle dar.



**Abbildung 27: Räumliche Verteilung der PAH-Summen (z-transformierte Werte), Hauptnutzungstypen farblich zusammengefasst: grün = außerhalb von Siedlungen, rot = Siedlung und Gewerbe, gelb = Autobahn**

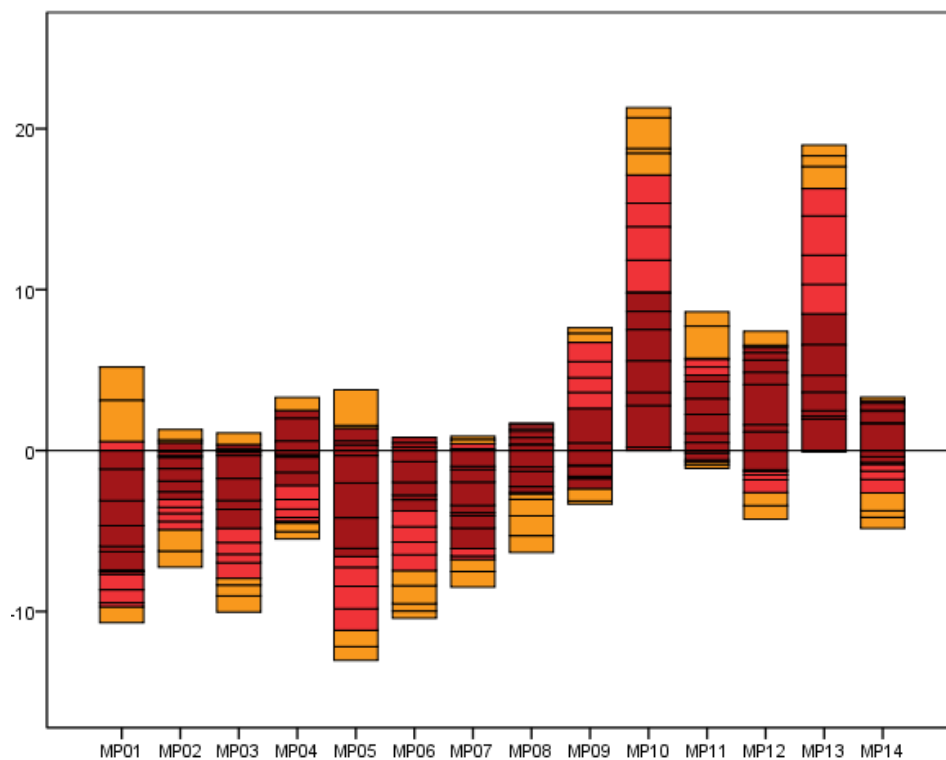
Die Darstellung der räumlichen Verteilung der Einzelsubstanzen erlaubt zusätzlich noch eine etwas tiefergehende Bewertung (Abbildung 28). Bei Betrachtung der oben genannten Hauptnutzungstypen, fällt auf, dass sich die Messpunkte des Nutzungstyps „**Siedlung und Gewerbe**“ (Messpunkte 09-13) in zwei Gruppen untergliedern lassen:

- Die bereits in Abbildung 27 dargestellte Abweichung der PAH-Belastung an den Messpunkten 10 und 13 (Jean-Calvin-Straße, Rathausplatz Mörfelden) ist auch in der Einzelbetrachtung der Substanzen positiv. Dies bedeutet, dass bezüglich aller 16 PAHs an diesen beiden Standorten überdurchschnittliche Anreicherungen ermittelt wurden. Auffällig dabei ist, dass die mittel- und schwerflüchtigen PAHs dabei zu annähernd gleichen Anteilen beitragen, wogegen die leichtflüchtigen PAHs einen etwas geringeren Einfluss haben.
- Die übrigen Messpunkte, die diesem Nutzungstyp zugeordnet werden (Messpunkte 09, 11 und 12), weisen geringere Abweichungen von der durchschnittlichen Belastung auf und unterscheiden sich auf diesem Niveau auch hinsichtlich ihres PAH-Profiles. Bezüglich der Substanzen mit mittlerer Flüchtigkeit ähnelt das Profil am Messpunkt 09 (Gewerbegebiet Walldorf) noch am ehesten den

beiden mit deutlich stärkerer Positivabweichung, während an Messpunkt 11 (Grünschnittsammelstelle) die leichtflüchtigen PAHs und an Messpunkt 12 (Gewerbegebiet Mörfelden) die schwerflüchtigen PAHs dominieren.

Damit kann die PAH-Belastung des Messpunkts 09 (Gewerbegebiet Walldorf) entsprechend den Messpunkten 10 und 13 (Gruppe 1) als „ubiquitäre Belastung zuzüglich lokaler Emission (z.B. Hausbrand)“ bezeichnet werden, wenn auch auf geringerem Niveau. Für die Messpunkte 11 und 12 ist dagegen anzunehmen, dass der Hausbrand eine untergeordnete Rolle spielt.

Die beiden in Nähe der **Autobahn A5** gelegenen Messpunkte (Messpunkte 08 und 14) unterscheiden sich hinsichtlich ihres PAH-Profiles nur unwesentlich (Abbildung 27). Lediglich Benzo(g,h,i)perylen trägt zu einer nennenswerten positiv ausgerichteten Abweichung am Messpunkt 14 bei.



**Abbildung 28: Räumliche Verteilung der PAHs aufgeschlüsselt nach Einzelsubstanzen (z-transformierte Werte), Einzelsubstanzen farblich zusammengefasst nach Flüchtigkeit: orange = leichtflüchtig [Naphthalin bis Fluoren], rot = mittelflüchtig [Phenanthren bis Pyren], dunkelrot = schwerflüchtig [Benz(a)anthracen bis Benzo(g,h,i)perylen]**

Die **außerhalb von Siedlungen** liegenden Messpunkte 01-07 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Positivabweichung ebenfalls höchstens in Bezug auf ein Merkmal: Der Messpunkt 01 (Gundwald) weist eine, wenn auch auf geringem Niveau ausgeprägte, überproportionale Anreicherung von leichtflüchtigen PAHs (Acenaphthen und Fluoren) auf (Abbildung 27). Hierfür kann in Kombination mit den oben bereits beschriebenen vorherrschenden Windrichtungen die Cargo City Süd und die dort stattfindenden Triebwerktests als potenzielle Quelle vermutet werden (HLFU 1998). Das dort emittierte Kerosin ist ein Gemisch von Kohlenwasserstoffen, Cycloalkanen und aromatischen

Verbindungen und kann bis zu 500 Einzelsubstanzen enthalten (Eugster & Fleuti 2004). Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung analysierten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe machen dabei etwa 1% aus, wobei fast ausschließlich zweiringige, also vergleichsweise leichtflüchtige PAHs eine Rolle spielen (vgl. Wieben & Kruse 2008). In Tabelle 7 sind die an einem Flugzeugtriebwerk gemessenen PAHs entsprechend ihrer Antreffwahrscheinlichkeit zusammengefasst. Wenn die Vermutung somit nahe liegt, dass die leichtflüchtigen PAHs am Messpunkt 01 zu einem gewissen Anteil auf die Triebwerke zurückzuführen sind, so wird demgegenüber auch deutlich, dass dies für die Messpunkte mit direktem Überflug nicht gilt (vgl. auch Eugster & Fleuti 2004).

**Tabelle 7: Massenkonzentration der 16 EPA-PAHs an einem Triebwerk (Auszug, verändert nach HLFU 1998)**

Rang	PAH-Einzelsubstanz	molare Masse [g/mol]	Anzahl der Benzolringe	Konzentration [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
1	Naphthalin	128	2	24,60-37,50
2	Acenaphthylen	152	3	1,58-1,98
3	Fluoren	166	3	0,87-0,96
4	Phenanthren	178	3	0,70-0,78
5	Acenapthen	154	3	0,46-0,49
6	Pyren	202	4	0,28-0,30
7	Fluoranthen	202	4	0,20-0,23
8	Anthracen	178	3	0,11-0,13
9	Benzo(a)pyren	252	4	0,03
(...)	(...)			

Da eine Unterscheidung von PAHs, die aus der Kohleverbrennung stammen, und denen, die aus Mineralöl und dessen Produkten herrühren, nicht möglich ist (Schröter-Kermani et al. 2006, Achten & Hofmann 2010), können auch mögliche PAH-Quellen nicht sicher identifiziert werden (Lima et al. 2005, Ravindra et al. 2008). Es wurde zwar trotzdem der Ansatz überprüft, die "pyrogenic" PAHs und "petrogenic" PAHs zu differenzieren (vgl. Sporstöl et al. 1983, Fernandes et al. 1997, Pies et al. 2007), dieser lieferte aber keine zusätzlichen Hinweise auf mögliche Quellen.

## 4 Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen leitet sich als wichtige Handlungsempfehlung eine **großräumigere Erfassung der PAH- und insbesondere der Benzo(a)Pyren-Belastung** ab, um die Quellen der in Mörfelden-Walldorf festgestellten Stoffkonzentrationen identifizieren zu können. Dabei sollten insbesondere Messpunkte in den **Hauptwindrichtungen** NNO und SSW berücksichtigt werden sowie Gebiete, die sich durch eine hohe **Bevölkerungsdichte** und einen hohen Anteil an **Gewerbe und Industrie** auszeichnen.

Aus diesem Grund wird ein zweistufiger Messplan empfohlen: In den Städten und Gemeinden **Neu-Isenburg, Frankfurt am Main, Kelsterbach, Raunheim, Rüsselsheim, Nauheim** und **Groß-Gerau** sollten an jeweils zwei bis drei Standorten Messpunkte für Grünkohl-Exponate eingerichtet werden. Um einen möglichen lokalen Einfluss des **Flughafens Frankfurt** berücksichtigen zu können, sollten insbesondere in den Städten und Gemeinden, die in den Betriebsrichtungen 07 und 25 liegen (Neu-Isenburg, Frankfurt/Main, Kelsterbach und Raunheim), mindestens drei Messpunkte geplant werden. Parallel hierzu und zur Anbindung an die Ergebnisse der vorliegenden Studie (Überprüfung der Variabilität der PAH-Belastung in verschiedenen Untersuchungsjahren) sollten an zwei bis drei Messpunkten in Mörfelden-Walldorf Wiederholungsuntersuchungen durchgeführt werden.

Mit dieser ersten Stufe ist zum einen eine Überprüfung der PAH- und insbesondere der Benzo(a)-pyren-Belastung und -Verteilung im Großraum möglich. Da sowohl mögliche Emittenten als auch wesentliche exogene Faktoren berücksichtigt werden, können zum anderen auch wichtige Hinweise auf lokale oder regionale PAH-Quellen gewonnen werden. Für die umliegenden Städte und Gemeinden bedeutet diese Untersuchung zugleich eine erste Charakterisierung der jeweiligen PAH-Belastung und ermöglicht Rückschlüsse auf die Notwendigkeit einer detaillierteren Monitoringstudie.

In Abhängigkeit der Ergebnisse dieses Ansatzes könnten in einer zweiten Stufe die Städte und Gemeinden östlich und südlich von Mörfelden-Walldorf berücksichtigt werden (Langen, Weiterstadt, Büttelborn), wenn auch zum jetzigen Zeitpunkt kein Anlass für eine dringende Überprüfung gegeben scheint.



## 5 Zusammenfassung

Im Auftrag der Stadt Mörfelden-Walldorf wurde im Herbst 2013 ein Biomonitoring mittels standardisiertem Grünkohl-Verfahren (VDI 3597/3) mit dem Ziel durchgeführt die Luftbelastungssituation der Stadt Mörfelden-Walldorf detailliert zu erfassen. Dabei wurde auch ein Transekt entlang der Flugroutenbewegungen Abflug 18-KNG kurz und Abflug 18-KNG lang eingerichtet, um den Einfluss des dortigen Flugverkehrs auf die Belastung der Luftqualität erfassen zu können. Die durchgeführte Untersuchung stellt eine erstmalige Charakterisierung der Schadstoffbelastung der Luft der Stadt Mörfelden-Walldorf dar.

Es wurde ein Messnetz mit 14 Messpunkten entworfen, das neben den Überfluggebieten die wichtigsten Nutzungstypen des Stadtgebiets sowie potenzielle Emittenten (z.B. Siedlung, Verkehr, Gewerbe) berücksichtigt. Alle Grünkohl-Pflanzen wurden nach der nach VDI 3597/3 standardisierten Vorgehensweise kultiviert und am 01./02. Oktober 2013 für acht Wochen ausgebracht. Die Exposition von jeweils drei Pflanzen pro Messpunkt erfolgte bis am 28./29.11.2013. Ein Exponat diente dabei der Analytik der Halb- und Schwermetalle, ein weiteres der Analytik Polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAH) und das dritte wurde als Rückstellprobe und für Doppelanalysen zur Sicherung interner Standards verwendet.

Die Analytik der Halb- und Schwermetalle Antimon (Sb), Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Zink (Zn) erfolgte nach Druckaufschluss (DIN EN 13805) mittels ICP-MS nach DIN EN ISO 17294-2. Die Bestimmung der ausgewählten PAH erfolgte gemäß VDI 3875 mittels GC-MS sowie unter Verwendung von fünf deuterierten PAHs als interne Standards.

Die im Rahmen der Untersuchung ermittelten Halb- und Schwermetall- sowie PAH-Konzentrationen in den Grünkohlproben wurden vor allem durch den Vergleich mit den Ergebnissen aus anderen Studien bewertet, die ebenfalls auf der VDI-Richtlinie 3957/3 und einer vergleichbaren Fragestellung basieren. Hierfür wurden aufgrund des zusätzlichen Fokus auf den Einfluss des Frankfurter Flughafens mit wenigen Ausnahmen aktuelle Studien berücksichtigt, die im Umfeld von Flughäfen durchgeführt wurden. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass dabei Flughäfen mit wesentlich geringerem Passagieraufkommen und wesentlich geringerer Anzahl an Flugbewegungen untersucht wurden. Für die Bewertung von Blei und Cadmium wurden zusätzlich Grenzwerte für Höchstgehalte in Lebensmittel herangezogen (EU-Verordnung Nr. 420/2011 der Kommission vom 29. April 2011). Für die analysierten PAH wurde zudem der Orientierungswert für maximale Hintergrundgehalte (OmH-Wert) des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz verwendet.

Mit Ausnahme von Nickel liegen für alle im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Metall-Gehalte keine bedenklichen Anreicherungen vor. Ein Einfluss des Flughafens (Punktquelle) bzw. des Flugverkehrs entlang der Überfluggebiete kann nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse waren im Einzelnen:

- Die gemessenen **Antimon**-Konzentrationen sind entweder dem „Hintergrundbereich“ (Messpunkte 01 bis 07 und MP 10) oder dem „Normalbereich“ (Messpunkte 08, 09, 11-14) zuzuordnen.
- Die ermittelten **Arsen**-Gehalte sind als niedrig einzustufen und können als „Hintergrundgehalte“ bewertet werden. Lediglich der Gehalt von 0,082 mg/kg TG an Messpunkt 10 (Jean-Calvin-Straße) ist als „leicht erhöht“ einzuordnen.

- Alle im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten **Cadmium**- und **Blei**-Gehalte sind als äußerst niedrig einzustufen. Selbst in verkehrsbedingt stärker beeinträchtigten Bereichen ist das Anreicherungs-niveau als niedrig zu bewerten.
- Dies trifft in ähnlicher Weise auch auf **Chrom** zu. Die etwas höheren Konzentrationen an den Messpunkten 08, 10 und 14 (Badesee Walldorf, Jean-Calvin-Straße und Autobahnabfahrt A5/B486) sind dem „Normalbereich“ zuzuordnen, während die übrigen Messpunkte im „Hintergrundbereich“ liegen.
- Für **Nickel** finden sich deutliche Anreicherungen am Messpunkt 10 (Jean-Calvin-Straße) und zudem nennenswerte Anreicherungen an den Messpunkten 02 (NSG Mönchbruchwiese, östlich der Startbahn 18 West), 03 (NSG Mönchbruchwiese, unmittelbar südlich der Startbahn 18 West), 12 (Gewerbegebiet Mörfelden) und 13 (Rathausplatz Mörfelden). Da sich die Messpunkte hinsichtlich ihrer Nutzung stark unterscheiden, kann keine gesicherte Aussage zur Emissionsquelle getroffen werden. Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den Nickel-Anreicherungen um eine großräumige Belastung handelt.
- Im Vergleich mit anderen Untersuchungen wird deutlich, dass es sich bei allen gefundenen **Zink**-Anreicherungen um durchschnittliche Konzentrationen handelt.

Gemessen an dem für Bayern erhobenen „Orientierungswert für maximale Hintergrundgehalte“ (OmH) von 468 µg/kg TG für die 16 EPA-PAH-Summenparameter und im Vergleich mit den Messergebnissen vergleichbarer Studien müssen die nachgewiesenen **PAH-Gehalte** (498-868 µg/kg TG) an allen Messpunkten als **erhöht** interpretiert werden. Dies gilt auch für die in einem zusätzlichen Summenparameter separat dargestellten Trinkwasserverordnungs-PAH (TVO-PAH) (148-297 µg/kg TG). Dabei können die ermittelten PAH-Gehalte aber immer noch als „**ballungsraumtypisch**“ klassifiziert werden.

Besonders auffallend sind die **Benzo(a)pyren**-Konzentrationen (12,7-22,4 µg/kg TG), die im Vergleich mit anderen Studien zu den höchsten zählen. Sie sind an allen Messpunkten als „erhöht“ einzustufen. Die geringen Unterschiede zwischen den Messpunkten zeigen eine **relativ gleichmäßig verteilte, hohe Belastung** an. Eine lokale Quelle kann nicht definiert werden. Vielmehr ist zu vermuten, dass die vorgefundenen Konzentrationen auf Emissionen des gesamten Ballungsraumes „Rhein-Main“ inklusive des Flughafens Frankfurt zurückzuführen sind, wenn auch der Anteil des Flughafens bzw. der Flugroutenbewegungen daran nicht quantifiziert werden kann.

Bei der **räumlichen Analyse** ist zu beachten, dass die Erfassung lokaler Emittenten möglicherweise durch die insgesamt hohen und häufigen Niederschlagsereignisse beeinträchtigt war. Insgesamt wird bezüglich der Metallanreicherungen (unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nur sehr niedrige bis niedrige Anreicherungen ermittelt wurden) eine **Zweiteilung in besiedelte Gebiete und in einen außerstädtischen Bereich** (z.B. Naturschutzgebiete) deutlich. Ob dies letztlich alleine von der Nutzungsform erklärt werden kann oder aber auch von den vorherrschenden Windrichtungen beeinflusst ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht abschließend geklärt werden.

Diese Zweiteilung ist bei den PAHs weniger stark ausgeprägt. Neben der ubiquitär auftretenden PAH-Belastung ist aber im Siedlungsbereich (Messpunkte 09, 10, 11 und 13; Gewerbegebiet Walldorf, Jean-Calvin-Straße, Grünschnittsammelstelle, Rathausplatz Mörfelden) eine lokale Emission, wie zum Beispiel Hausbrand, hinzuzurechnen. Die deutlich geringere Belastung in den Messpunkten westlich des Siedlungsbereichs (Gundwald, Naturschutzgebiet Mönchsbruch, Gerätsbach) und südlich von

Mörfelden (Hegbach, Großer Wiesengrund) weist darauf hin, dass die hier ermittelten PAH-Anreicherungen hauptsächlich aus dem Ferntransport resultieren. Hinsichtlich der beiden nah an der Autobahn A5 gelegenen Messpunkten (Badeseewald, Autobahnabfahrt A5/B486) bleibt festzuhalten, dass es sich in beiden Fällen bei den Metall-Anreicherungen um unauffällige und bei um PAH-Anreicherungen um unterdurchschnittliche Werte handelt. Somit stellt der fließende Kfz-Verkehr eine im Vergleich zum Hausbrand nachgeordnete Quelle dar.

**Die erstmalige Charakterisierung der Schadstoffbelastung der Luft der Stadt Mörfelden-Walldorf führt zu der Erkenntnis, dass bezüglich der ausgewählten Metalle – mit Ausnahme von Nickel – eine nach Nutzungstypen differenzierte, aber vergleichsweise geringe Luftbelastung zu diagnostizieren ist. Die Summenparameter der 16 EPA-PAH weisen erhöhte, aber ballungsraumtypische Werte auf. Im gesamten Messnetz wurden für die Leitsubstanz Benzo(a)pyren deutlich erhöhte Werte ermittelt. Ein direkter Zusammenhang mit dem Flughafen Frankfurt oder auch mit den Flugroutenbewegungen über die Startbahn 18 West kann allerdings nicht hergestellt werden.**

Aus den Ergebnissen leitet sich als wichtige Handlungsempfehlung eine großräumigere Erfassung der PAH- und insbesondere der Benzo(a)Pyren-Belastung ab.

## 6 Literatur

- Achten, C. & Hofmann, T. (2010): Umweltrelevanz von natürlichen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen aus Steinkohlen – eine Übersicht. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 15: 5-18.
- André, W. (1991): Biologische Messverfahren mit Kulturpflanzen zur Bewertung von regionalen und anlagenbezogenen Immissionswirkungen – Beispiele angewandter Bioindikation. *VDI-Berichte* 901: 495-511.
- ATSDR [Agency for Toxic Substances and Disease Registry] (1995): Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. US Department of Health and Human Services, Atlanta. 487 Seiten.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009): Biomonitoring Lech-Stahlwerke 2007-2008 – Abschlussbericht. *UmweltSpezial*. Augsburg. 92 Seiten.
- BImSchG: (2009): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz) vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert am 11. August 2009 (BGBl. I S. 2723).
- CVUA [Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Freiburg] (2009): Grünkohlmonitoring im Raum Kehl/Straßburg – Untersuchungen von Grünkohlproben auf Schwermetalle, Dioxine, dioxinähnliche PCB und Indikator-PCB – Abschlussbericht. Freiburg. 213 Seiten.
- DFS [Deutsche Flugsicherung] 2012: Luftverkehr in Deutschland - Mobilitätsbericht 2012. 16 Seiten.
- Dietl, C.; Faus-Kessler, M.; Wegenke, M. & Peichl, L. (1998): Verkehrsbezogene Immissionen und Immissionswirkungen von Antimon und anderen Metallen. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (BayLfU), Band 153. Augsburg. 87 Seiten.
- DIN EN 15763 (2010): Lebensmittel - Bestimmung von Elementspuren - Bestimmung von Arsen, Cadmium, Quecksilber und Blei in Lebensmitteln mit induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) nach Druckaufschluss; Deutsche Fassung EN 15763:2009. Beuth, Berlin.
- Eugster, R. & Fleuti, E. (2004): Flugzeuge über Zürich – Was kommt von oben runter? Mögliche Auswirkungen der Flugzeugabgase auf Mensch und Umwelt. *Umweltpraxis* 37: 21-26.
- Fernandes, M.B.; Sicre, M.A.; Boireau, A. & Tronczynski, J. (1997): Polyaromatoc hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and ist estuary. *Mar Poll Bull* 34(11): 857-867.
- Fraport AG (2009): Bienenmonitoring am Flughafen Frankfurt. *Spektrum Umwelt* 8. Frankfurt am Main. 12 Seiten.
- Fraport AG (2011): Lufthygienischer Jahresbericht 2011 - Bericht über die Ergebnisse der lufthygienischen Überwachung am Flughafen Frankfurt. Frankfurt Airport Services Worldwide, Flug- und Terminalbetrieb, Ausbau, Sicherheit (FBA). Airport Print Center, Frankfurt am Main. 12 Seiten.

- Franzaring, J. (1995): Einflussgrößen beim Biomonitoring luftgetragener Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe mit dem Akkumulationsindikator Grünkohl. Dissertation, Universität Trier. 112 Seiten.
- Gedes, H.; Schneider, K.; Schuhmacher-Wolz, U. (2005): Addendum Nickel und Verbindungen. In: Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen - Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Kennziffer D 714. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Hanewald, K. (1996): Ergebnisse und Bewertung der im Bereich des Flughafens Rhein-Main durchgeführten Untersuchungen. In: Hessische Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.): Ökosystemares Biomonitoring-Programm in der Region Biebesheim 1992-1994. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 193. Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden. S. 127-133.
- Hassauer, M. & Kalberlah, F. (1999) Arsen und Verbindungen. Mit Addendum 2008 (Schuhmacher-Wolz, U., Schneider, K.). In: Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen. Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung, Kennziffer D 095. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- HLFU [Hessische Landesanstalt für Umweltschutz] (1998): Emissionen organisch-chemischer Verbindungen aus zivilen Flugzeugtriebwerken. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz 252. Wiesbaden 166 Seiten.
- HLUG [Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie] (2011): Lufthygienischer Jahresbericht 2011 - Teil I: Kontinuierliche Messungen. Wiesbaden. 20 Seiten.
- Hüffmeyer, N. (2007): Modellierung von Zink in der Ruhr – Emissionspfade und Belastungsanalyse. Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück Nr. 42. Osnabrück. 80 Seiten.
- Kalberlah, F. (1999): ChromVI. In: Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen. Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung, Kennziffer D 220. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- LANUV [Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen ] (2013): Messprogramm zur Abschätzung der Schwermetallbelastung in Nahrungspflanzen im Umfeld der Firma Aurubis in Lünen – Nahrungspflanzenuntersuchungsergebnisse aus dem Jahre 2012. Düsseldorf. 24 Seiten.
- Lima, A.L.C.; Farrington, J.W. & Reddy, C.M. (2005): Combustion-derived polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment – a review. *Environmental Forensics* 6:109-131.
- Müller-BBM GmbH (2008): Biomonitoring Flughafen Dresden. Bericht Nr M75 180/3. (unveröffentlicht, mit freundlicher Genehmigung der Flughafen Dresden GmbH).
- Müller-BBM GmbH (2013): Immissionsschutzbericht 2012 BER – Berlin Brandenburg Airport, Bericht Nr. M108469/01. Im Auftrag der Flughafen Berlin Brandenburg GmbH. Berlin. 87 Seiten.

- Napier, F.; D'Arcy, B. & Jefferies, C. (2008): A review of vehicle related metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the UK environment. *Desalination* 226: 143-150.
- Nobel, W.; Beismann, H.; Franzaring, J.; Kostka-Rick, R.; Wagner, G. & Erhardt, W. (2005): Standardisierte biologische Messverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation) in Deutschland – Stand und Perspektiven. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 65(11-12): 478-484.
- Öko-Institut e.V. (2010): Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs. UBA Texte 32/2010 Berlin. 34 Seiten.
- Peichl, L.; Wäber, M. & Reifenhäuser, W. (1994): Schwermetallmonitoring mit der standardisierten Graskultur im Untersuchungsgebiet München – Kfz-Verkehr als Antimonquelle? *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* 6: 63-69.
- Pies, C.; Yang, Y. & Hofmann, T. (2007): Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in floodplain soils of the Mosel and Saar river. *J Soils Sediments* 7(4) 216-222.
- Radermacher, L. & Rudolph, H. (1994): Grünkohl als Bioindikator – Ein Verfahren zum Nachweis von organischen Substanzen in Nahrungsmitteln. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* 6: 384-386.
- Ravindra, K.; Sokhi, R. & van Grieken, R. (2008): Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric Environment* 42: 2895-2921.
- Schneider, K. & Kalberlah, F. (2000) Antimon und Verbindungen. In: Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen. Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung, Kennziffer D 092. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Schneider, K. & Kalberlah, F. (1999): Nickel und Nickelverbindungen. In: Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen. Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung, Kennziffer D 714. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Schröter-Kermani, C.; Kreft, D.; Schilling, B.; Herrchen, M. & Wagner, G. (2006): Polycyclic aromatic hydrocarbons in pine and spruce shoots – temporal trends and spatial distribution. *J Environ Monitoring* 8: 806-811.
- Schuhmacher-Wolz, U.; Schneider, K. & Klein, D. (2007): Bewertungsmaßstäbe für Arsen in Böden, Grund- und Trinkwasser – Teil A: Bericht zur toxikologischen Bewertung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN-Förderkennzeichen 206 61 201. Freiburg. 173 Seiten.
- Sporstøl, S.; Gjøs, N.; Lichtenthaler, R.G.; Gustavsen, K.O.; Urdal, K.; Orelid, F. & Skel, J. (1983): Source identification of aromatic hydrocarbons in sediments using GC/MS. *Environ Sci Technol* 17(5): 282-286.
- Srogi, K. (2007): Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons – a review. *Environ Chem Lett* 5: 169-195.

- TÜV Süd Industrie Service GmbH (2005): Bericht über Immissions-Wirkungserhebungen mit dem Grünkohlverfahren in Graz und Leoben im Jahr 2004. Im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung. 66 Seiten.
- TÜV Süd Industrie Service GmbH (2009a): Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2008. Abschlussbericht. Im Auftrag der Flughafen München GmbH. 155 Seiten.
- TÜV Süd Industrie Service GmbH (2009b): Biomonitoring von Luftschadstoffen mit dem Grünkohl-Verfahren im Umfeld des Flughafens Leipzig 2008. Abschlussbericht. Im Auftrag der Flughafen Leipzig/Halle GmbH. 27 Seiten.
- VDI [Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL] (2004): Richtlinie 3957, Blatt 10 „Empfehlung zum emittentenbezogenen Einsatz von pflanzlichen Bioindikatoren“. Beuth, Berlin.
- VDI [Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL] (2008): Richtlinie 3957, Blatt 3 “Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation) – Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl. Beuth, Berlin.
- Verordnung (EU) Nr. 420/2011 der Kommission vom 29. April 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln.
- Wäber, M.; Dietl, C.; Köhler, J. & Peichl, L. (1998): Bioakkumulation und Deposition von Antimon, Blei und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff-Immissionen. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox* 10: 276-280.
- Wäber, M. (2008a): Biomonitoring und Depositionsuntersuchungen in der Nachbarschaft des Flughafens München 2006 und 2007. Im Auftrag der Flughafen München GmbH. München. 136 Seiten.
- Wäber, M. (2008b): Erfolgsgeschichte Biomonitoring – Zuverlässige Wirkungsmessungen plus überzeugende Öffentlichkeitsarbeit. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 68(6): 223-226.
- Wäber, M. (2012): Biomonitoring 2011 mit standardisiertem Grünkohl im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg - Gutachterliche Bewertung. Im Auftrag der Flughafen Berlin Brandenburg GmbH. München. 96 Seiten.
- Wäber (2013): Biomonitoring im Umfeld des Flughafens Berlin Schönefeld -- Gutachterliche Bewertung der Untersuchungsjahre 2001 und 2012. Im Auftrag der Flughafen Berlin Brandenburg GmbH. München. 111 Seiten.
- Wieben, M. & Kruse, H (1999): Toxikologische Bewertung von organisch-chemischen Triebwerksemissionen (zivile Luftfahrt). Christian-Albrechts-Universität, Kiel. 96 Seiten.



## Anhang

Anhang 1: Übersicht der Analysenergebnisse zur Schwermetall- [mg/kg TG] und PAH-Anreicherung [ $\mu\text{g}/\text{kg}$  TG] in Grünkohl an den 14 Messpunkten<sup>5</sup>

	MP01	MP02	MP03	MP04	MP05	MP06	MP07	MP08	MP09	MP10	MP11	MP12	MP13	MP14
Trockenmasse [%]	20,7	21,0	20,2	18,9	19,6	22,4	20,3	20,3	20,4	20,2	19,5	18,2	19,2	20,4
Antimon	0,023	0,048	0,028	0,025	0,048	0,042	0,032	0,068	0,06	0,033	0,05	0,114	0,056	0,051
Arsen	0,022	<0,01	<0,01	0,021	<0,01	0,062	0,045	<0,01	<0,01	0,082	0,022	0,062	0,037	0,042
Blei	0,076	0,127	0,12	0,101	0,154	0,12	0,105	0,122	0,122	0,094	0,177	0,096	0,089	0,106
Cadmium	0,012	0,022	0,027	<0,01	0,027	<0,01	<0,01	0,012	<0,01	0,042	0,015	0,040	<0,01	0,044
Chrom	0,005	<0,01	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,28	<0,01	0,31	<0,01	0,21	<0,01	0,37
Nickel	2,96	6,10	5,03	2,22	4,00	2,78	2,36	3,93	2,93	9,03	3,44	4,85	5,50	3,71
Zink	27,7	23,1	23,4	28,3	23,6	15,0	13,0	15,4	27,2	26,0	29,5	30,1	21,3	27,6
Naphthalin	6,3	6,1	6,1	14,4	54,6	14,6	6,7	5,5	26,5	30,9	34,5	34,4	31,2	24,7
Acenaphylen	11,9	5,4	8,6	9,2	12,7	9,6	12,9	5,9	10,9	21,1	21,5	12,5	15,1	8,5
Acenaphthen	10,5	8,9	9,0	9,1	7,2	6,9	7,3	7,0	7,3	8,5	7,9	7,2	9,7	7,7
Fluoren	37,1	28,2	25,9	27,1	23,7	24,0	28,5	26,2	29,6	32,5	26,9	24,5	27,4	23,4
Phenanthren	191,2	156,8	141,6	165,7	129,2	140,8	182,9	176,8	212,7	231,0	175,8	147,2	229,5	145,7
Anthracen	23,5	22,7	22,6	22,7	19,9	21,8	24,6	24,0	27,4	28,9	23,8	23,3	31,9	22,6
Fluoranthren	87,1	101,3	89,8	93,8	74,2	82,1	107,2	122,7	145,9	185,0	130,2	107,1	176,4	100,2
Pyren	57,9	70,6	59,9	60,3	65,7	57,4	71,5	88,2	110,3	137,9	97,1	81,1	133,1	80,8
Benzo(a)anthracen	17,7	16,7	14,4	15,6	16,6	19,4	14,1	17,1	25,3	18,4	19,6	19,3	24,5	17,1
Chrysen	24,3	28,7	20,7	17,5	9,9	19,4	18,9	28,2	20,1	34,1	33,6	28,7	40,2	26,2
Benzo(b)fluoranthren	13,5	15,4	12,5	20,0	9,4	19,1	17,3	19,8	17,9	22,6	21,9	21,1	22,3	19,9
Benzo(k)fluoranthren	14,1	12,0	8,9	15,6	7,5	14,4	13,5	15,7	15,2	25,0	21,4	19,4	21,2	15,9
Benzo(a)pyren	13,2	14,8	17,6	20,8	19,0	17,4	12,7	17,8	18,1	22,4	15,6	13,4	16,7	15,7
Indeno(1,2,3-c,d)pyren	15,1	20,5	20,1	20,4	21,8	17,9	18,0	17,3	18,4	23,9	23,0	30,1	22,1	23,7
Dibenzo(a,h)anthracen	19,6	22,7	23,3	24,3	23,8	20,8	22,8	22,7	23,1	27,9	22,9	24,0	23,5	23,2
Benzo(g,h,i)perylen	14,7	17,3	17,2	16,9	16,7	15,8	15,1	15,0	15,3	18,0	18,6	20,2	22,1	21,4
$\Sigma$ 16 EPA-PAHs	557,5	548,1	498,2	553,2	511,9	501,4	574,0	609,9	724,0	867,9	694,3	613,5	846,9	576,7
$\Sigma$ 6 TVO-PAHs	157,6	181,3	166,1	187,4	148,6	166,7	183,8	208,3	230,8	296,9	230,7	211,3	280,8	196,8

<sup>5</sup> Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze sind aus statistischen Gründen als halbe Bestimmungsgrenze angegeben.

## Anhang 2: Positionsbestimmung der Messpunkte

Messpunkt	Bezeichnung, Lage des Messpunktes	Koordinaten
MP01	Gundwald	50°00'39.9"N 8°33'27.4"E
MP02	NSG Mönchbruchwiese, östlich der Startbahn 18 West	49°59'52.0"N 8°32'20.8"E
MP03	NSG Mönchbruchwiese, unmittelbar südlich der Startbahn 18 West	49°59'29.8"N 8°31'33.4"E
MP04	NSG Mönchbruchwiese, westlich der Startbahn 18 West	49°59'38.4"N 8°31'05.1"E
MP05	Geräthsbach, unmittelbar südlich der Startbahn 18 West	49°58'21.8"N 8°31'38.5"E
MP06	Hegbach, südlich Mörfelden	49°57'51.4"N 8°33'26.1"E
MP07	Großer Wiesengrund	49°57'34.2"N 8°35'34.8"E
MP08	Badensee Walldorf	50°00'49.9"N 8°35'49.7"E
MP09	Gewerbegebiet Walldorf, Nordendstraße,	50°00'39.9"N 8°33'27.4"E
MP10	Jean-Calvin-Straße	49°59'50.8"N 8°34'23.2"E
MP11	Grünschnittsammelstelle	49°59'03.9"N 8°33'47.2"E
MP12	Hessenring/Dreieichstraße, Gewerbegebiet Mörfelden	49°59'02.6"N 8°35'04.9"E
MP13	Rathausplatz Mörfelden, Westendstraße	49°58'31.9"N 8°34'04.4"E
MP14	Autobahn A5, Abfahrt 24 Mörfelden-Walldorf, B486	49°59'04.5"N 8°36'05.6"E