



# Neue Bioindikationsverfahren zum anlagenbezogenen Monitoring

LANUV-Fachbericht 114



---

# **Neue Bioindikationsverfahren zum anlagenbezogenen Monitoring**

**LANUV-Fachbericht 114**

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen  
Recklinghausen 2021

---

## IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: <a href="mailto:poststelle@lanuv.nrw.de">poststelle@lanuv.nrw.de</a>
Bearbeitung	Dr. Katja Hombrecher (LANUV)
Mitwirkende	Dr. Ralf Both, Alexandra Müller-Uebachs, Mario Rendina, Marcel Buss, Udo van Hauten
Titelbild	© Dr. Katja Hombrecher/LANUV Grünkohl im Tau
Stand	September 2021
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachbericht
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • <a href="http://www.lanuv.nrw.de">www.lanuv.nrw.de</a> Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

## Inhalt

1	Einleitung.....	5
2	Einsatz pflanzlicher Bioindikationsverfahren in NRW .....	7
3	Ermittlung der Verfahrenskenngrößen .....	10
3.1	Messstationen .....	10
3.2	Ermittlung des OmH.....	11
3.3	Ermittlung der Standardunsicherheit .....	12
4	Graskultur.....	13
4.1	Durchführung des Verfahrens .....	13
4.2	OmH der Graskultur .....	14
4.3	Standardunsicherheit der Graskultur .....	15
4.4	Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten.....	16
4.5	Anwendung .....	21
5	Grünkohlexposition (90–100 Tage).....	22
5.1	Durchführung des Verfahrens .....	22
5.2	OmH der Grünkohlexposition (90–100 Tage).....	23
5.3	Standardunsicherheit der Grünkohlexposition (90–100 Tage).....	24
5.4	Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten.....	25
5.5	Anwendung .....	26
6	Grünkohlexposition (28 Tage).....	27
6.1	Entwicklung des Verfahrens .....	27
6.2	Durchführung des Verfahrens .....	29
6.3	OmH der Grünkohlexposition (28 Tage).....	29
6.4	Standardunsicherheit der Grünkohlexposition (28 Tage).....	30
6.5	Anwendung .....	31
7	Mangoldexposition (28 Tage) .....	32
7.1	Entwicklung des Verfahrens .....	32
7.2	Durchführung des Verfahrens .....	33
7.3	OmH der Mangoldexposition (28 Tage).....	34
7.4	Standardunsicherheit der Mangoldexposition (28 Tage).....	35
7.5	Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten.....	36
7.6	Anwendung .....	36
8	Löwenzahnexposition und Löwenzahnscreening .....	37
8.1	Entwicklung der Verfahren .....	37
8.2	Durchführung der Verfahren.....	41
8.3	OmH der Löwenzahnexposition und des -screenings.....	41
8.4	Standardunsicherheit der Löwenzahnexposition und des -screenings.....	43
8.5	Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten.....	44
8.6	Anwendung der Löwenzahnexposition und des -screenings .....	44
9	Zusammenfassung und Fazit.....	45
10	Literatur .....	47



# 1 Einleitung

Das LANUV und seine Vorgängerinstitutionen in NRW setzen bereits seit mehr als 30 Jahren Bioindikationsverfahren zur Ermittlung von Belastungen durch Luftschadstoffe und immissionsbedingten Wirkungen ein. Dabei unterscheidet man aktive von passiven Verfahren.

Bei den **aktiven** Verfahren werden pflanzliche Bioindikatoren im Gewächshaus vorgezogen und in der Vegetationsperiode an zuvor ausgewählten Messpunkten exponiert. Am LANUV wurden dazu bisher die Verfahren der standardisierten Graskultur (VDI 3957 Blatt 2) und der Grünkohlexposition (VDI 3957 Blatt 4, in Vorb.) eingesetzt. Diese Bioindikationsverfahren ermöglichen durch die Standardisierung der Anzucht, Exposition und Auswertung eine sehr gute Beurteilung der Belastungssituation bei anlagenbezogenen Untersuchungen. Da die Verfahren zudem über viele Jahre im sogenannten Wirkungsdauermessprogramm (WDMP) an elf Hintergrundstandorten durchgeführt wurden, konnten für beide Verfahren Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) entsprechend VDI 3857 Blatt 2 ermittelt werden.

Bei der Untersuchung auf organische Schadstoffe wurde bisher in der Regel das Grünkohlexpositionsverfahren angewendet. Dabei werden Grünkohlpflanzen von August bis November an einem Standort exponiert. Pro Vegetationsperiode erfolgt in der Regel nur eine Exposition pro Messpunkt, so dass auch nur ein Wert pro Jahr ermittelt wird.

Bei dem Verfahren der standardisierten Graskultur werden pro Vegetationsperiode (Mai–September) fünf Expositionen über jeweils vier Wochen durchgeführt, so dass man mehrere Messwerte pro Jahr erhält. Die Ergebnisse der standardisierten Graskultur werden nicht gesundheitlich bewertet.

Bislang gab es kein standardisiertes Bioindikationsverfahren, welches die gesamte Vegetationsperiode abbildet, mehrere Messwerte pro Jahr liefert und zudem auch noch die Möglichkeit einer gesundheitlichen Bewertung bietet.

Auch weisen die bisher in NRW eingesetzten Bioindikationsverfahren aufgrund von Planung, Anzucht und Expositionszeit einen sehr langen Durchführungszeitraum auf, so dass erste Ergebnisse oft erst nach mehreren Monaten vorliegen.

Es gibt aber häufig den Bedarf, dass mit Hilfe eines Screenings kurzfristig die aktuelle Immissionsituation an einem Standort abgebildet werden soll. Das kann beispielsweise nach einem Schadensereignis oder aber am Anfang eines neuen Untersuchungsprogramms der Fall sein.

Zu diesem Zweck werden in der Regel **passive** Bioindikationsverfahren eingesetzt. In der Vergangenheit wurden dazu bei anlagenbezogenen Monitoringprogrammen oft Fichtennadeln beprobt (VDI 3957 Blatt 11, KLEES et al. 2017). Allerdings ließen die in Fichtennadeln ermittelten Gehalte keine Rückschlüsse auf Nahrungspflanzen zu.

Deshalb wurden z. B. nach Schadensereignissen, wenn es hauptsächlich um die gesundheitliche Bewertung von Nahrungspflanzen ging, Blattgemüse, wie z. B. Kopfsalat, Mangold oder Spinat, in den zu untersuchenden Bereichen beprobt (VDI 3957 Blatt 15, LANUV-Arbeitsblatt 31 2015). Meist konnten dabei nicht an allen Messpunkten die gleichen Nahrungspflanzen gefunden werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Schadstoffgehalte in den verschiedenen Blattgemüsen je nach Spezies sehr stark unterscheiden. Deshalb eignet sich diese Methode nicht für ein anlagenbezogenes Monitoring, bei dem

die Vergleichbarkeit der untersuchten Nahrungspflanzen gewährleistet sein muss. Außerdem sind die Hintergrundgehalte dieser Pflanzen nicht bekannt.

Aus den genannten Gründen wurden am LANUV NRW in den vergangenen fünf Jahren **neue Bioindikationsverfahren** entwickelt und erprobt.

Dieser Fachbericht beschreibt die derzeit vom LANUV eingesetzten Verfahren inklusive der dafür ermittelten Verfahrenskenngrößen (Standardunsicherheiten und OmH für NRW) und zeigt auf, wann welches der Verfahren zum Einsatz kommt:

- Graskultur nach Richtlinie VDI 3957, Blatt 2 (Kapitel 4)
- Grünkohlexposition 90–100 Tage nach Richtlinie VDI 3957, Blatt 4 (Kapitel 5)
- Grünkohlexposition 28 Tage (Kapitel 6)
- Mangoldexposition 28 Tage (Kapitel 7)
- Löwenzahnexposition und -screening (Kapitel 8)



## 2 Einsatz pflanzlicher Bioindikationsverfahren in NRW

Je nach Fragestellung der zu untersuchenden Stoffe und zeitlicher Situation werden am LANUV verschiedene Bioindikationsverfahren zur Ermittlung von Luftschadstoffen und ihrer Wirkungen eingesetzt.

Abbildung 1 liefert einen Überblick, welche Verfahren wann zum Einsatz kommen. Es ist zu beachten, dass es sich bei jeder Untersuchung um einen Einzelfall handelt und diese sehr schematische Darstellung nicht zwangsläufig auf jede neue Untersuchung angewendet werden kann.

Grundsätzlich wird jede Untersuchung durch einen bestimmten Auslöser initiiert. Formal sind das in der Regel Aufträge, die das LANUV von anderen Behörden, schwerpunktmäßig den Bezirksregierungen oder dem nordrhein-westfälischen Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MULNV) erhält. Typische Auslöser für solche Aufträge sind z. B. Bürgerbeschwerden über Einträge von Schadstoffen in ihre Gärten, Verdachtsfälle aufgrund vorangegangener Untersuchungen oder Schadensereignisse (z. B. Brände).

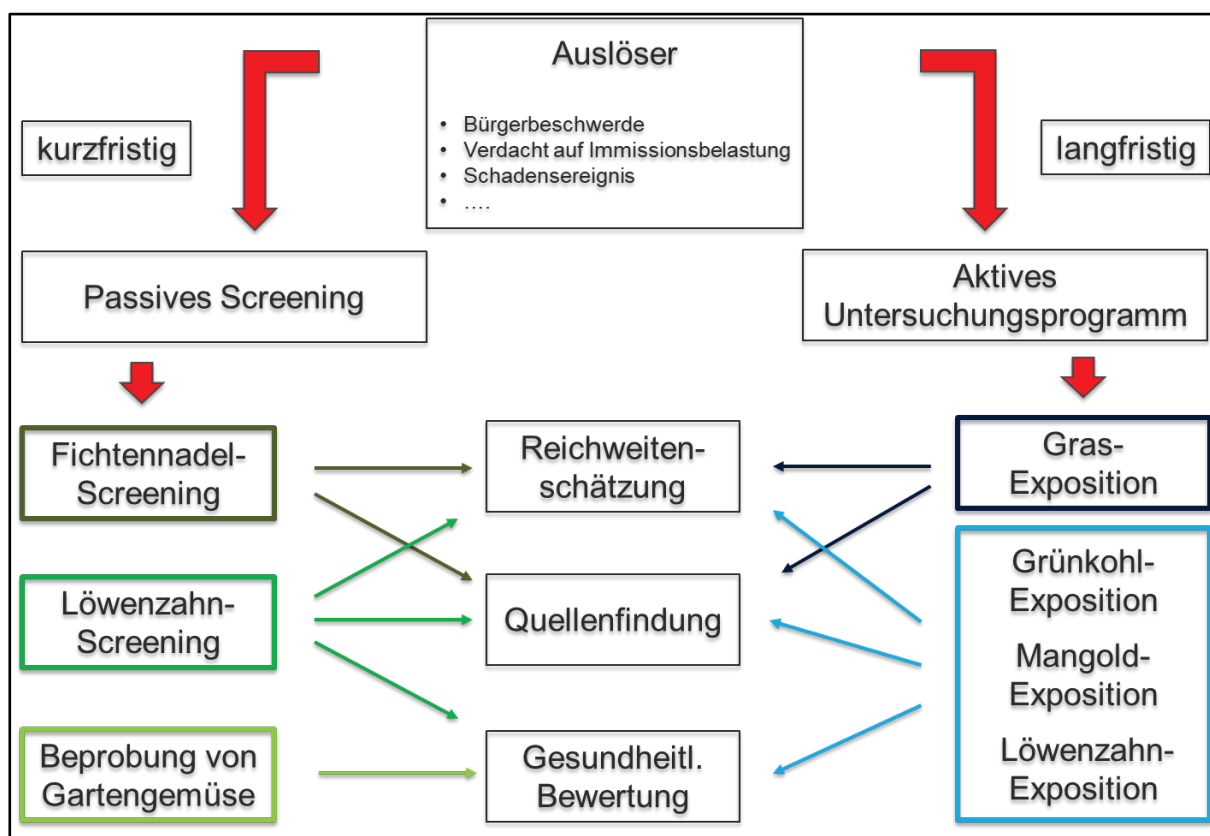


Abbildung 1: Einsatz der verschiedenen Bioindikationsverfahren

In einem ersten Schritt ist zu klären, ob Ergebnisse sehr kurzfristig (nach wenigen Wochen) vorliegen müssen, weil beispielsweise eine Gesundheitsgefahr bestehen könnte oder eine vorsorgliche Nichtverzehrempfehlung ausgesprochen wurde, wie das z. B. nach einem Schadensereignis der Fall sein könnte. Bei anderen Untersuchungen, wo es z. B. um eine Quellenfindung oder eine Reichweitenabschätzung geht, ist diese Dringlichkeit nicht grundsätzlich geboten und es können langfristige Untersuchungsprogramme geplant werden.

Bei Untersuchungen, in denen eine zeitnahe Einschätzung nötig ist, kommen passive Screening-Verfahren zum Einsatz. Im LANUV sind dies:

1. das Fichtennadelscreening,
2. das Löwenzahnscreening (s. Kapitel 8) und
3. die Beprobung von Gartengemüse.

Geht es ausschließlich um eine Reichweitenabschätzung oder eine Quellenfindung und nicht um eine gesundheitliche Bewertung, kann nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 11 ganzjährig ein Fichtennadel-Screening durchgeführt werden. Dieses ist aber nur für organische Schadstoffe zu empfehlen. Auch existieren keine Hintergrundgehalte (OmH) für dieses Verfahren.

Steht dagegen die gesundheitliche Bewertung von Nahrungspflanzen im Vordergrund, sollte ein Löwenzahnscreening (s. Kapitel 8) oder nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 15 eine Beprobung von exponiertem Gartengemüse durchgeführt werden (s. auch LANUV Arbeitsblatt 31 2015). Das Löwenzahnscreening bietet die Vorteile einer standardisierten Methode und es existieren Hintergrundgehalte für NRW anhand derer die ermittelten Gehalte beurteilt werden können. Allerdings nimmt Löwenzahn Schwermetalle aus einem belasteten Boden sehr gut auf, so dass die Belastung in dieser Pflanze höher sein könnte als in anderen Nahrungspflanzen. Im Einzelfall, z. B. nach einem Schadensereignis, wenn Gartenbesitzer Auskunft darüber erhalten möchten, ob ihr selbst angebautes Gemüse bedenkenlos zu verzehren ist, kann es daher auch nach wie vor sinnvoll sein, dieses Gemüse zu untersuchen und gesundheitlich zu bewerten.

Ist bei einer Untersuchung die Zeit vorhanden, aktive Bioindikationsverfahren einzusetzen, ermöglichen diese eine größere Standardisierung und damit eine bessere Möglichkeit der Beurteilung der ermittelten Schadstoffgehalte.

Im LANUV stehen fünf verschiedene Verfahren zur Verfügung:

1. das Verfahren der Grünkohlexposition nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 4 mit einer Expositionszeit von 90 – 100 Tagen (s. Kapitel 5),
2. die Grünkohlexposition mit einer Expositionszeit von 28 Tagen (s. Kapitel 6),
3. die Mangoldexposition mit einer Expositionszeit von 28 Tagen (s. Kapitel 7),
4. die Löwenzahnexposition mit einer Expositionszeit von 28 Tagen (s. Kapitel 8) und
5. die Grasexposition nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 2 ebenfalls mit einer Expositionszeit von 28 Tagen (s. Kapitel 4).

Wenn es um die Ermittlung von Einträgen organischer Schadstoffe geht, wird in der Regel Grünkohl als Akkumulatorpflanze gewählt, da dieser im Vergleich zu den anderen Bioindikatoren lipophile organische Schadstoffe am stärksten anreichert. Für die Ermittlung von Einträgen bestimmter Schwermetalle ist er aber nicht so gut geeignet. Hier sind die Verfahren der standardisierten Graskultur und der Mangoldexposition zu bevorzugen. Dabei eignet sich die Grasexposition besser, um z. B. eine Quellenfindung durchzuführen oder Reichweiten abzuschätzen, da das Gras vor der Analytik nicht gewaschen wird und so auch anhaftende Staubpartikel mit untersucht werden können. Sollen die ermittelten Gehalte allerdings gesundheitlich bewertet werden, bietet sich der Einsatz der Mangoldexposition an.

Sollen in einem Untersuchungszeitraum mehrere Messwerte ermittelt werden, um die Immissionsituation auch im zeitlichen Verlauf bewerten zu können, können die Verfahren mit jeweils

28 Tagen Expositionszeit, die in der Regel 5 bis maximal 6 Messungen in einer Vegetationsperiode ermöglichen, eingesetzt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, Grünkohl nach VDI 3957 Blatt 4 (Standard-Exposition August–November) zusätzlich zwischen Mai–August zu exponieren. Auf diese Weise erhält man zwei Messwerte pro Vegetationsperiode.

In den aktuellen Untersuchungsprogrammen hat sich bewährt, bei dem Verdacht auf eine Immissionsbelastung durch organische Schadstoffe zunächst ein Screening mit Löwenzahn durchzuführen, um die Reichweite der Belastung abzuschätzen (s. Kapitel 8). Bei Werten oberhalb des OmH (abzüglich Standardunsicherheit) wird bereits nach dem Löwenzahnscreening eine semiquantitative gesundheitliche Bewertung durchgeführt und ggf. eine vorsorgliche Nichtverzehrempfehlung ausgesprochen. In diesen Fällen muss anschließend eine Grünkohl-Exposition durchgeführt werden, um zum einen die in Löwenzahn ermittelten Gehalte zu bestätigen und zum anderen eine gesundheitliche Bewertung mit dem Ziel einer differenzierten Verzehrempfehlung durchzuführen.

### 3 Ermittlung der Verfahrenskenngrößen

Um die in den Bioindikationsverfahren ermittelten Schadstoffgehalte einordnen und bewerten zu können, müssen verschiedene Verfahrenskenngrößen ermittelt werden. Dazu wurden zum einen für alle in NRW eingesetzten Bioindikationsverfahren an Hintergrundstandorten (s. Kapitel 3.1) die Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH; s. Kapitel 3.2), zum anderen durch Doppelbeprobungen die Standardunsicherheit der Verfahren ermittelt (s. Kapitel 3.3).

#### 3.1 Messstationen

Die hier vorgestellten Hintergrundwerte (OmH) der einzelnen Bioindikationsverfahren wurden an verschiedenen Hintergrundstandorten ermittelt (LANUV-Fachbericht 61 2015). Aktuell unterhält das LANUV im Rahmen des Wirkungsdauermessprogramms in NRW 14 Messstationen, an denen die Bioindikationsverfahren Graskultur und Grünkohl (90–100 Tage) regelmäßig durchgeführt werden (s. Abb. 2).

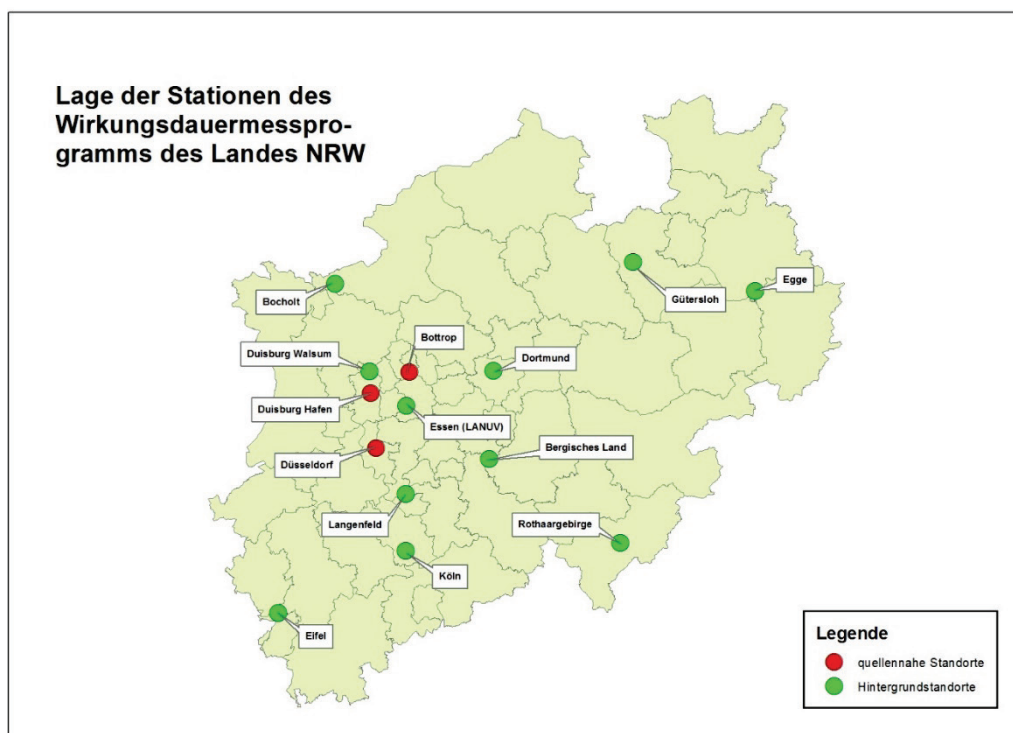


Abbildung 2: Lage der Messstationen in NRW

Die Hintergrundbelastung wird an elf Messstationen gemessen. Davon befinden sich vier Standorte in Waldgebieten (Egge, Bergisches Land, Eifel und Rothaargebirge), zwei Standorte in landwirtschaftlich stark genutzten Bereichen (Bocholt, Gütersloh) und fünf Standorte im städtisch geprägten Bereich (Essen, Duisburg-Walsum, Langenfeld, Köln, Dortmund). Die Messwerte der drei Quellenstandorte Duisburg-Hafen, Düsseldorf und Bottrop fließen dann in die OmH-Berechnung ein, wenn nachgewiesen werden kann, dass dort keine Einträge des zu betrachtenden Stoffes durch die vorhandene Quelle erfolgt.

## 3.2 Ermittlung des OmH

Gemäß Richtlinie VDI 3857 Blatt 2 bildet das 95. Perzentil bei einer Anzahl an Messwerten größer 100 (nach Ausreißerbereinigung) den Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) (VDI 3857 Blatt 2). Da das 95. Perzentil bei einer geringeren Anzahl an Messwerten nicht robust genug ist, wird bei einer Anzahl von 30–99 Messwerten der OmH berechnet indem der 1,5-fache Interquartilsabstand zum 75. Perzentil addiert wird (VDI 3857 Blatt 2). Als aktuell erhöhter immissionsbedingter Eintrag des jeweiligen Schadstoffes am Standort werden Überschreitungen des OmH nach Abzug der Standardunsicherheit des Verfahrens (s. Kapitel 3.3) gewertet (s. LANUV-Fachbericht 61 2015, VDI 3857 Blatt 2).

Für die regelmäßig an den WDMP-Messstationen exponierten Bioindikatoren Graskultur und Grünkohl werden jeweils die Messwerte der letzten zehn Jahre herangezogen, um daraus den OmH zu berechnen. Dieser wurde entsprechend schon über mehrere Jahre fortgeschrieben und unterliegt teilweise einem Trend (s. Kapitel 4 und 5).

Für die Ermittlung des OmH der neuen Bioindikationsverfahren wurden in den Jahren 2016–2019 Grünkohl-, Mangold- und Löwenzahnpflanzen an einzelnen WDMP-Messstationen exponiert (LANUV Essen, Köln, Egge). Daten von den Quellenstandorten des WDMP (Duisburg-Hafen, Bottrop) sowie von weiteren Belastungsstandorten (Essen-Kray, Dinslaken und Stolberg) aus den Jahren 2017–2019 konnten zusätzlich in die Berechnung einzelner Elemente einfließen, nachdem die Datenverteilungen entsprechend geprüft worden waren (vgl. VDI 3857 Blatt 2). So konnten beispielsweise Schwermetallgehalte vom Standort Bottrop in die Berechnung der OmH einfließen, weil die dort ansässige Kokerei zwar eine Quelle für Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) darstellt, nicht aber für Schwermetalle.

Die für die einzelnen Verfahren ermittelten OmH werden in den Kapiteln 4–8 detailliert dargestellt.

Es wurden für alle hier vorgestellten Bioindikationsverfahren die OmH für folgende Stoffe und Summenparameter ermittelt:

- PCB<sub>gesamt</sub>: Summe der 6 Indikator-PCB (PCB 28, 52, 101, 138, 180) \* Faktor 5
- dl-PCB: Summe der 12 dl-PCB-Kongenere in Toxizitätsäquivalenten
- PCDD/F: Summe der polychlorierten Dibenzo-Dioxine und -Furane in Toxizitätsäquivalenten
- PAK 4: Summe Benzo(a)pyren, Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthen
- Schwermetalle: Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Blei (Pb), Zink (Zn)

Zusätzlich dazu wurden für einzelne Verfahren auch OmH für folgende Parameter ermittelt:

- $\Sigma$ Tri – Decachlorbiphenyle: Homologensummen inklusive der PCB 47, 51 und 68
- PAK<sub>gesamt</sub>: Summe der 16 PAK nach US EPA
- Einzelne OmH für Benzo(a)pyren (BaP), Benzo(a)anthracen (BaA), Chrysen (Chr), Benzo(b)fluoranthen (BbF)
- Schwermetalle: Kobalt (Co), Mangan (Mn), Antimon (Sb) und Vanadium (V)

Der OmH wird in der graphischen Darstellung der Messwerte an einzelnen Messpunkten in einem Untersuchungsprogramm in der Regel als Linie eingetragen. Dadurch können Überschreitungen des OmH sehr gut visuell erfasst werden.

### 3.3 Ermittlung der Standardunsicherheit

Zur Validierung und der Ermittlung der Standardunsicherheit eines Bioindikationsverfahrens werden Doppelbeprobungen durchgeführt, indem an einem Standort jeweils zwei Pflanzcontainer mit Löwenzahn, Mangold und Grünkohl parallel exponiert werden (s. Abb. 3). Die Ernte, Aufarbeitung und Analytik der beiden Proben erfolgt vollständig getrennt.



**Abbildung 3:** Parallelexposition von Löwenzahn (Mitte, links Mangold, rechts Grünkohl)

Nach DIN EN ISO 20988 (Anhang B.8 Doppelbestimmungen mit zwei identischen Messeinrichtungen) wird für einen bestimmten Anwendungsbereich, der durch den niedrigsten und höchsten ermittelten Wert bestimmt wird, die Standardunsicherheit  $u$  berechnet, indem jeweils die beiden in den Doppelproben ermittelten Werte miteinander verglichen werden. Die Standardunsicherheit  $u$  ist ein Maß für die Messunsicherheit des gesamten Verfahrens.

Die Standardunsicherheiten werden in der Darstellung der Messwerte an einzelnen Messpunkten in einem Untersuchungsprogramm als Fehlerindikatoren eingetragen, wenn die ermittelten Gehalte im Anwendungsbereich liegen. Bei gleichzeitiger Darstellung des OmH als Linie (s. Kap. 2.4) ist so zu erkennen, wann ein Messwert abzüglich der Standardunsicherheit des Verfahrens den OmH überschreitet und damit anzeigt, dass eine Immissionsbelastung oberhalb des Hintergrundgehaltes für NRW vorliegt.

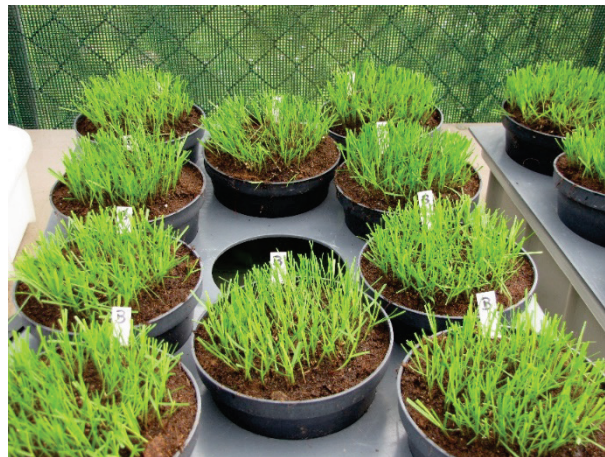
Die für die einzelnen Verfahren ermittelten Standardunsicherheiten werden ebenfalls in den Kapiteln 4–8 detailliert dargestellt. Es wurden die Standardunsicherheiten der in Kapitel 3.2 aufgeführten Stoffe und Summenparameter ermittelt.



## 4 Graskultur

### 4.1 Durchführung des Verfahrens

Das Verfahren der standardisierten Graskultur wird nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 2 „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation); Verfahren der standardisierten Graskultur“ durchgeführt. Als Akkumulatorpflanze wird die Grassorte *Lolium multiflorum* (ssp. *italicum*) der Sorte Lema (bis 2019) bzw. Gemini (ab 2020) verwendet. Das Gras wird in Kulturgefäßen vorgezogen (s. Abb. 4) und zwischen Mai und September jeweils für ca. 28 Tage am Standort in einer Höhe von 1,50 m exponiert (s. Abb. 5). Dabei findet die Wasserversorgung über Dochte durch ein Reservoir statt. Nach vier Wochen wird das Gras entnommen und das Schnittgut anschließend im Trockenschrank (Untersuchung auf Schwermetalle) bzw. in einer Gefriertrocknungsanlage (Untersuchung auf Organika) getrocknet. Es wird jeweils ein neuer Grastopf exponiert. Auf diese Weise erhält man pro Messstation fünf Proben pro Jahr. Diese Proben werden auf Schwermetalle untersucht. An neun Messstationen werden zudem in Sammelproben (die fünf Proben jeder Messstation werden vereinigt) organische Schadstoffe untersucht.



**Abbildung 4:** Anzucht der Graskultur in Kulturgefäßen



**Abbildung 5:** Expositionsvorrichtung mit Graskulturen

## 4.2 OmH der Graskultur

Aus den Messwerten der Graskulturrexposition von elf Dauermessstationen des WDMP der letzten zehn Jahre wurden die OmH für NRW berechnet (s. Tabelle 1). Erläuterungen zu den einzelnen Stoffen und Summenparametern finden sich in Kap. 3.2.

Zusätzlich zum errechneten OmH wird die Anzahl N der eingeflossenen Messwerte, die Anzahl der Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze (BG), die Anzahl der insgesamt untersuchten Messpunkte (MP) und die Anzahl der untersuchten Jahre angegeben. Letztere beträgt bei der standardisierten Graskultur immer zehn Jahre (beispielsweise 2010–2019). Bei Summenparametern werden keine Angaben zur Anzahl der Messwerte kleiner BG gemacht, da diese nur ermittelt werden, wenn eine ausreichende Anzahl an Einzelkomponenten größer BG ist.

Der OmH der standardisierten Graskultur wurde wegen der großen auswertbaren Probenanzahl ( $N > 100$ ) bei den Schwermetallen immer als das 95. Perzentil berechnet. Der OmH der organischen Schadstoffe wurde wegen der geringeren Probenanzahl ( $N < 100$ ) als das 75. Perzentil zuzüglich des 1,5-fachen Interquartilsabstands berechnet. Alle OmH werden in der Trockenmasse (TM) angegeben.

**Tabelle 1:** Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) der standardisierten Graskultur für NRW, berechnet nach VDI 3857 Blatt 2

Stoff	OmH	Einheit	N	Anzahl < BG	Anzahl MP	Anzahl Jahre
PCB <sub>gesamt</sub>	13	µg/kg TM	44	k. A.	6	10
dl-PCB	0,40	ngTEQ/kg TM	44	k. A.	6	10
PCDD/F	0,30	ngTEQ/kg TM	46	k. A.	6	10
PAK <sub>gesamt</sub>	320	µg/kg TM	50	k. A.	6	10
PAK 4	22	µg/kg TM	53	k. A.	6	10
BaP	3,2	µg/kg TM	53	16	6	10
BaA	3,2	µg/kg TM	53	18	6	10
Chr	7,0	µg/kg TM	53	0	6	10
BbF	9,1	µg/kg TM	53	1	6	10
As	0,21	mg/kg TM	520	99	11	10
Cd	0,089	mg/kg TM	513	0	11	10
Cr	2,4	mg/kg TM	513	18	11	10
Cu	14	mg/kg TM	520	0	11	10
Ni	3,5	mg/kg TM	519	0	11	10
Pb	1,6	mg/kg TM	509	9	11	10
Zn	41	mg/kg TM	520	0	11	10

Seit 2013 wurden jährlich neue OmH aus dem jeweils zurückliegenden Zehnjahreszeitraum für die standardisierte Graskultur ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass der OmH für die überwiegende Anzahl der untersuchten Stoffe und Summenparameter relativ konstant ist. Einige Stoffe zeigten aber auch deutliche Trends: So zeigt sich beispielsweise bei Blei eine kontinuierliche Abnahme. Der OmH, welcher zur Bewertung der aktuellen Immissionsbelastung herangezogen wird, ist von 2,4 mg/kg TM (2004–2013) auf 1,6 mg/kg TM (2010–2019)



zurückgegangen. Diese Abnahme kann offensichtlich durch eine rückläufige Entwicklung der Blei-Emissionen erklärt werden. Auch bei Chrom und Cadmium sieht man eine leichte Abnahme der Gehalte und damit eine Verringerung des OmHs.

Die Perzentile der dl-PCB- und PCDD/F-Gehalte sind in den letzten Zehnjahreszeiträumen auf einem ähnlichen Niveau geblieben. Bei den PCB<sub>gesamt</sub>-Gehalten gab es aufgrund hoher Werte vor dem Jahr 2007 noch deutlich höhere OmH als aktuell. Seit der Berechnung der OmH 2007–2016 sind die Werte aber auf einem gleichbleibenden Niveau.

### 4.3 Standardunsicherheit der Graskultur

Die aus den Ergebnissen der Doppelbeprobungen ermittelten Standardunsicherheiten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Es wurden nur die Standardunsicherheiten der in Kapitel 3.2 aufgeführten Schwermetalle ermittelt, da für die Graskultur bisher keine Doppelbeprobungen für organische Schadstoffe durchgeführt worden sind.

Die Standardunsicherheit  $u$  wird einmal in der jeweiligen Einheit und zum anderen in % des Mittelwertes angegeben. Die Spalten Min und Max geben den Anwendungsbereich wieder. Die Anzahl  $N$  gibt an, wie viele Doppelsektionen ausgewertet werden konnten.

**Tabelle 2:** Standardunsicherheit  $u$  der standardisierten Graskultur nach DIN EN ISO 20988

Stoff	$u$	Einheit	$u$ in % Mittelwert	Min	Max	N
As	<b>0,014</b>	mg/kg TM	16	0,030	0,21	20
Cd	<b>0,012</b>	mg/kg TM	21	0,034	0,12	20
Cr	<b>0,24</b>	mg/kg TM	22	0,16	4,8	20
Co	<b>0,034</b>	mg/kg TM	8,6	0,22	0,58	20
Cu	<b>0,87</b>	mg/kg TM	11	5,0	16	20
Mn	<b>8,0</b>	mg/kg TM	5,1	78	252	20
Ni	<b>0,38</b>	mg/kg TM	14	1,6	5,2	20
Pb	<b>0,14</b>	mg/kg TM	15	0,14	2,5	20
V	<b>0,016</b>	mg/kg TM	14	0,014	0,25	20
Zn	<b>1,9</b>	mg/kg TM	6,8	12	55	20

Die Standardunsicherheiten der untersuchten Schwermetalle betragen 5,1–22 % des Mittelwertes. Das gesamte Verfahren der standardisierten Graskultur inklusive der Analytik ist also mit einer verhältnismäßig geringen Unsicherheit behaftet.

Da die Doppelbeprobungen der Graskultur an zwei Dauermessstationen des WDMP (Dortmund und Hilchenbach/ Rothaargebirge) durchgeführt worden sind, die ein relativ großes Wertespektrum abbilden, gelten die ermittelten Standardunsicherheiten für einen verhältnismäßig großen Wertebereich.

## 4.4 Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten

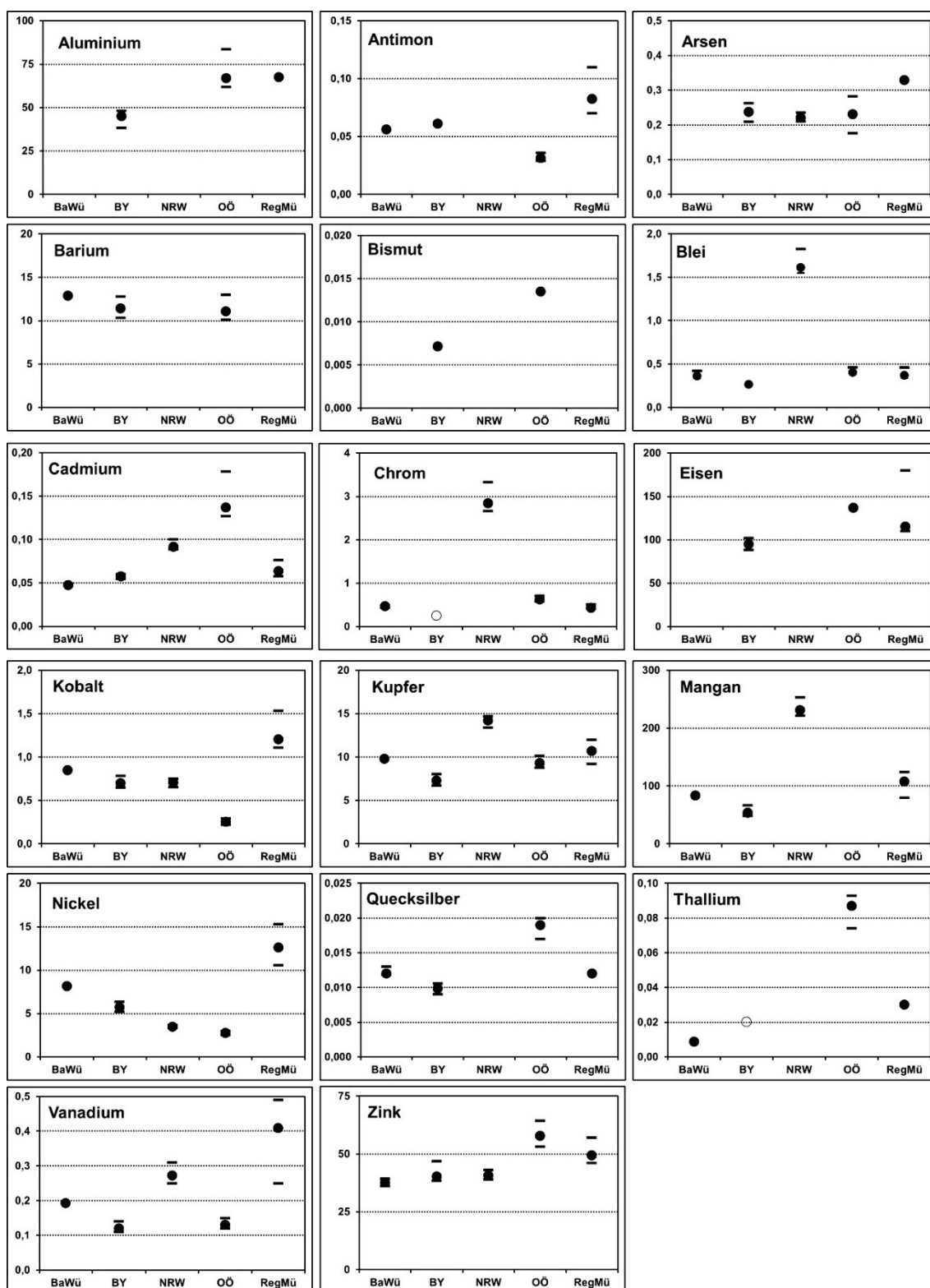
Das Verfahren der standardisierten Graskultur wird auch in anderen Bundesländern und in Österreich zur Ermittlung der Hintergrundbelastung eingesetzt. Im Rahmen eines Ländervergleichs wurden aus den Daten verschiedener Regionen Deutschlands (Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen) sowie Oberösterreichs sowohl regionale als auch überregionale OmH für Metalle berechnet (HOMBRECHER et al. 2018; 2019).

Der Vergleich der regionalen OmH des Zehnjahreszeitraumes 2007–2016 an unbelasteten Standorten dieser Regionen ist in Abbildung 6 aufgetragen. Die regionalen OmH werden jeweils mit dem unteren und oberen Vertrauensbereich (untere und obere Grenze des 95 %-Konfidenzintervalls) dargestellt. Lagen in einer Region weniger als 100 Werte vor, wurde der OmH nach einer anderen Methode berechnet und deshalb ohne Vertrauensbereich dargestellt (VDI 3857 Blatt 2).

Vergleicht man die in NRW ermittelten regionalen OmH mit denen der anderen untersuchten Regionen, so ergeben sich teilweise sehr große Unterschiede. Für einige der in Abbildung 6 dargestellten Stoffe gab es in NRW keine Messwerte oder es standen, wie z. B. bei Antimon, nicht ausreichend auswertbare Daten für die OmH-Berechnung zur Verfügung. Die aus dem Ländervergleich erhaltenen Erkenntnisse werden im Folgenden detaillierter erläutert und mit Daten aus der Literatur verglichen.

An den Hintergrundmessstationen in NRW liegen die **Antimon**-Gehalte in der Graskultur meist unter der Nachweisgrenze, weshalb für Antimon keine OmH berechnet werden können. Lediglich am Quellenstandort Düsseldorf im vielbefahrenen „Mörsenbroicher Ei“ werden verhältnismäßig hohe Gehalte ermittelt, was daran liegt, dass Antimon hauptsächlich durch den Straßenverkehr freigesetzt wird, da es als Antimontrisulfid in Bremsbelägen enthalten ist. So weisen straßennahe Messpunkte in der Regel höhere Gehalte auf (WÄBER et al. 1998, KLUMPP et al. 2009). Graskulturen an einer straßennahen Station in München zeigten bis um einen Faktor sechs höhere Antimongehalte als an bayerischen Hintergrundstationen (BAY. LFU 2017), was zu dem höheren OmH für die Region München geführt hat (s. Abb. 6).

Bei **Arsen** wurde für NRW für den Zeitraum 2007–2016 mit 0,22 mg/kg TM (2010–2019: 0,21 mg/kg TM) ein ähnlicher OmH ermittelt wie für Bayern und Oberösterreich. Aus den Messwerten aller Regionen wurde ein überregionaler OmH von 0,23 mg/kg TM berechnet. In früheren Untersuchungen in elf europäischen Städten wurden Arsengehalte in Graskulturen zwischen 0,21 und 0,76 mg/kg TM ermittelt (KLUMPP et al. 2009). Dabei war die Streuung der Werte für Arsen zwischen den untersuchten Städten im Verhältnis zur Streuung bei anderen Elementen gering, was auch der Vergleich der OmH unterschiedlicher Regionen zeigt. Arsen wird hauptsächlich durch die Energiewirtschaft, also bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt, weshalb eine weitflächige Verbreitung und damit ein einheitliches Hintergrundniveau in allen Regionen anzunehmen ist (UBA 2018).



**Abbildung 6:** Regionale OmH für Metalle in Graskulturen in den Regionen BaWü = Baden-Württemberg, BY = Bayern, NRW = Nordrhein-Westfalen, OÖ = Oberösterreich, RegMü = Region München (in mg/kg Trockenmasse, teilweise mit unterem und oberem Vertrauensbereich)

Die regionalen OmH für **Blei** lagen in den vier nicht in NRW liegenden Regionen auf einem sehr ähnlichen Niveau zwischen 0,26 und 0,40 mg/kg TM. In NRW ist der OmH mit 1,6 mg/kg TM deutlich höher. Damit ist der Hintergrundgehalt in NRW gegenüber dem überregionalen OmH von 0,36 mg/kg TM, in dessen Berechnung die Werte aus NRW nicht eingeflossen sind, etwa 4,5-fach höher.

In einer Untersuchung in Brandenburg wurde 1995, sieben Jahre nach Inkrafttreten des Abgabeverbots für verbleites Normalbenzin in Deutschland, in Graskulturen ein mittlerer Hintergrundwert von 0,50 +/- 0,20 mg/kg TM ermittelt (MEZGER 1995), welcher etwas höher als der überregionale OmH liegt. In der damaligen Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Blei-Gehalte in den Graskulturen mit zunehmender Nähe zu vielbefahrenen Straßen deutlich anstiegen. In 10 m Entfernung zur Stadtautobahn in Berlin wurden damals Blei-Gehalte von bis zu 2,95 mg/kg TM ermittelt, die also noch einmal deutlich höher waren als der hier ermittelte regionale OmH für NRW. Auch in einer Untersuchung von Graskulturen in elf europäischen Städten zeigten sich Bleigehalte zwischen 0,50 und 4,6 mg/kg TM, wobei die hohen Gehalte mit einer zunehmenden Belastung durch den Straßenverkehr korrelierten (KLUMPP et al. 2009).

Laut UBA sind die Blei-Emissionen 2016 zu 40 % auf den Straßenverkehr und zu 33 % auf die Metallindustrie zurückzuführen (UBA 2018). Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der in NRW ansässigen Industrie, insbesondere der Stahlindustrie, die Hintergrundgehalte in Pflanzen in NRW gegenüber denen anderer, weniger industriell geprägter Regionen, deutlich erhöht sind. Selbst an den industriefernen Messstationen in NRW werden höhere Gehalte ermittelt als in den anderen untersuchten Regionen. Zusätzlich dazu war und ist das Verkehrsaufkommen in NRW sehr hoch und die Messpunkte sind straßennäher als die in anderen Regionen. Dabei ist zu beachten, dass Blei heutzutage nicht mehr direkt von den Kraftfahrzeugen emittiert wird, sondern in der Regel bereits vorliegende Belastungen durch den Straßenverkehr sekundär, beispielsweise durch Aufwirbelungen freigesetzt werden.

Der regionale OmH für **Cadmium** in NRW liegt in dem gleichen Wertebereich wie der der anderen untersuchten Regionen. Für Cadmium konnte in früheren Untersuchungen gezeigt werden, dass dieses Element im Boden deutlich mobiler ist als z. B. Nickel, Blei, Chrom und Arsen und deshalb von Pflanzen sehr gut systemisch – also über die Wurzel – aus dem Substrat aufgenommen werden kann (LANUV Arbeitsblatt 22 2014, HOCK & ELSTNER 1995). Es ist also möglich, dass die Gehalte in den Graskulturen durch die Menge an pflanzenverfügbarem Cadmium im Substrat beeinflusst werden.

Bei **Chrom** konnten – ähnlich wie bei Blei – für drei der untersuchten Regionen OmH auf recht ähnlichem Niveau zwischen 0,43 und 0,63 mg/kg TM ermittelt werden. In NRW ist der OmH mit 2,8 mg/kg TM (2007–2016) bzw. 2,4 mg/kg TM (2010–2019) deutlich höher und beträgt ungefähr das 5,5-fache des überregionalen OmH von 0,51 mg/kg TM. Laut UBA sind die Chrom-Emissionen 2016 zu 63 % auf den Straßenverkehr und zu 22 % auf die Metallindustrie zurückzuführen (UBA 2018). Graskulturen zeigten in früheren Untersuchungen an verkehrsexponierten Standorten deutlich höhere Chromgehalte (KLUMPP et al. 2009). In elf europäischen Städten wurden dabei Gehalte zwischen 0,50 in eher unbelasteten Gebieten und 3,1 mg/kg TM in verkehrsbelasteten Gebieten ermittelt. Damit weisen diese Untersuchungen ähnliche Ergebnisse auf wie die hier für die Regionen ermittelten OmH. Eine mögliche Ursache ist, ähnlich wie bei Blei, dass aufgrund der in NRW ansässigen Stahlindustrie und des hohen

Verkehrsaufkommens die Hintergrundgehalte an Chrom in Pflanzen in ganz NRW gegenüber denen anderer, weniger industriell geprägter Regionen, deutlich erhöht sind.

Bei **Kobalt** befinden sich die regionalen OmH von Baden-Württemberg, Bayern und NRW in etwa auf dem gleichen Niveau von 0,70–0,85 mg/kg TM, welches auch dem überregionalen OmH entspricht. Auch Kobalt kann von den Pflanzen systemisch aus dem Substrat aufgenommen werden. Die Kobalt-Gehalte wurden in NRW nur bis einschließlich 2014 erfasst, weshalb aktuell kein OmH mehr berechnet wird.

Die regionalen OmH für **Kupfer** betragen zwischen 7,3 mg/kg TM (Bayern) und 14 mg/kg TM (NRW). Der regionale OmH für NRW ist etwa 1,6-fach höher als der überregionale OmH.

In einer Untersuchung in Brandenburg wurde 1995 in Graskulturen ein mittlerer Hintergrundwert von 3,96 +/- 0,64 mg/kg TM ermittelt (MEZGER 1995). Für Kupfer wurde – ähnlich wie für Blei – in dieser Untersuchung ein Einfluss des Straßenverkehrs auf die Gehalte festgestellt. Je näher die Graskulturen an der Stadtautobahn in Berlin exponiert wurden, desto höher waren die Kupfergehalte. Auch an einem verkehrsbeeinflussten Standort in München lagen die Kupfergehalte rund doppelt so hoch wie an den ländlich geprägten bayerischen Hintergrundstandorten (BAY. LFU 2017). Auch in NRW liegen die Werte an der Messstation in Düsseldorf deutlich höher als an den Hintergrundmessstationen in NRW. In einer anderen Untersuchung in elf europäischen Städten wurden in Graskulturen Werte in einem Größenbereich 4,5–14 mg/kg TM ermittelt und für Kupfer ein deutlicher Substrateinfluss festgestellt (KLUMPP et al. 2009). Kupfer-Emissionen stammen zu 95 % aus Brems- und Reifenabrieb aus dem Straßenverkehr (UBA 2018). Kupfer kann aber auch systemisch von den Pflanzen aus dem Substrat aufgenommen werden.

Bei **Mangan** gibt es deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen: Der regionale OmH für NRW liegt mit 231 mg/kg TM deutlich höher als die OmH der anderen Regionen (54–108 mg/kg TM). Mangan wird von den Pflanzen hauptsächlich aus dem Substrat aufgenommen. Diese Aufnahme ist stark vom pH-Wert und vom Redoxpotenzial des Substrates abhängig. Möglicherweise führten Unterschiede im Substrat zu den deutlich höheren Werten in NRW. Die Mangan-Gehalte wurden in NRW nur bis einschließlich 2014 erfasst, weshalb aktuell kein OmH mehr berechnet wird.

Für **Nickel** wurden – ähnlich wie für Cadmium – innerhalb der einzelnen Regionen konsistente Daten ermittelt. Es zeigten sich aber große Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen. Die regionalen OmH betragen zwischen 2,8 mg/kg TM in Oberösterreich und 13 mg/kg TM in der Region München. In NRW beträgt der regionale OmH 3,5 mg/kg TM (2007–2016). In elf europäischen Städten wurden 2009 Nickelgehalte von 3,7 mg/kg TM bis 7,3 mg/kg TM ermittelt (KLUMPP et al. 2009). In dieser Untersuchung wurde gezeigt, dass die Nickelaufnahme substratbedingt war. Es ist also davon auszugehen, dass die Nickel-Gehalte in den Graskulturen durch die Menge an pflanzenverfügbarem Nickel im Substrat beeinflusst werden. Nickel wird laut UBA zu 52 % bei der Energiegewinnung und zu 38 % durch den Straßenverkehr emittiert (UBA 2008). Die hohen Werte in der Region München können auf eine Immissionsbelastung hinweisen, da die Anzucht dieser Graskulturen mit denen der Regionen Baden-Württemberg und Bayern identisch war.

Die regionalen OmH für **Vanadium** betragen zwischen 0,12 mg/kg TM in Bayern und 0,41 mg/kg TM in der Region München. Es wurde ein überregionaler OmH von 0,15 mg/kg TM ermittelt. In elf europäischen Städten wurden Vanadiumgehalte in der Graskultur zwischen

0,31 mg/kg TM und 2,17 mg/kg TM ermittelt (KLUMPP et al. 2009). Dabei lagen die Gehalte in neun der elf Städte auf einem ähnlichen Niveau (0,31 mg/kg TM bis 0,56 mg/kg TM). Nur in zwei Städten in Spanien wurden deutlich höhere Gehalte ermittelt und allgemein auf den Straßenverkehr zurückgeführt. Ob die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten höheren Werte in NRW (0,27 mg/kg TM) und der Region München diesen Sachverhalt stützen, kann nicht abschließend gefolgert werden, da es auch andere Quellen für Vanadium, wie etwa die Energiewirtschaft oder substratbedingte Einträge gibt. Die Vanadium-Gehalte wurden in NRW nur bis einschließlich 2014 erfasst, weshalb aktuell kein OmH mehr berechnet wird.

Für **Zink** wurden regionale OmH von 38 mg/kg TM (Baden-Württemberg) bis 58 mg/kg TM (Oberösterreich) sowie ein überregionaler OmH von 41 mg/kg TM ermittelt, was dem regionalen OmH für NRW entspricht (2007–2016). Die Untersuchung in elf europäischen Städten ergab Zinkgehalte zwischen 25 mg/kg TM und 51 mg/kg TM (KLUMPP et al. 2009). Damit liegen die ermittelten OmH in einer sehr ähnlichen Größenordnung. Zink wird zu 93 % durch den Straßenverkehr freigesetzt (UBA 2018). Allerdings erfolgt die Aufnahme von Zink auch systemisch aus dem Substrat. Deshalb kann hier keine Aussage zu immissionsbedingten Belastungen getroffen werden, da die festgestellten Unterschiede verfahrensbedingt sein könnten. Ein Eintrag von Zink durch den Straßenverkehr konnte in der oben aufgeführten Untersuchung in Brandenburg nicht nachgewiesen werden (MEZGER 1995). An der verkehrsbeeinflussten Station München wurden allerdings meist rund 1,5-fach höhere Zinkgehalte gemessen als an den bayerischen Hintergrundstationen. In der Untersuchung der europäischen Städte wurde gezeigt, dass bei Zink ein deutlicher Substrateinfluss vorlag (KLUMPP et al. 2009).

Ein Ländervergleich für die Gehalte an **organischen Schadstoffen** in der standardisierten Graskultur ist nicht so umfassend, da in der Regel die Graskultur schwerpunktmäßig für Untersuchungen auf Schwermetalle eingesetzt wird. In einigen Untersuchungen wurden aber auch Einträge organischer Schadstoffe mit Hilfe der standardisierten Graskultur und z. T. auch regionale OmH ermittelt. Hierauf wird im Folgenden eingegangen. Eine Veröffentlichung vergleichbar zu Hombrecher et al. 2018, 2019 ist geplant.

Die österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES) gibt für **BaP** einen OmH von 0,5 µg/kg FM an (AGES 2017). Bei einem angenommenen Trockenmassegehalt von 12 % entsprechen das 4,2 µg/kg TM. Dieser liegt etwas höher als der in NRW ermittelte OmH von 3,2 µg/kg TM.

Der OmH für **PAK 4** der AGES beträgt ca. 17 µg/kg TM und liegt damit etwas niedriger als der in NRW in der Graskultur ermittelte Gehalt von 22 µg/kg TM.

Für die sechs Indikator-**PCB** werden von der AGES jeweils die Bestimmungsgrenzen der Einzelkongenere angegeben (AGES 2017). Das bedeutet, dass sich der OmH für Österreich nicht bestimmen lässt, da zu viele Werte unterhalb der Bestimmungsgrenzen liegen. Auch in NRW liegen verhältnismäßig viele Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die Graskultur akkumuliert PCB ganz offensichtlich weniger stark als andere Pflanzen, wie z. B. Grünkohl. Dennoch konnte für NRW ein OmH für PCB<sub>gesamt</sub> von 13 µg/kg TM ermittelt werden. Es ist also davon auszugehen, dass die PCB-Gehalte in NRW höher liegen als in Österreich.

In einer Untersuchung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt wurden im Stadtgebiet von Nürnberg PCB<sub>gesamt</sub>-Gehalte von 2,6–4 µg/kg TM in der Graskultur ermittelt (BAY LFU 2019). Die Gehalte im Umkreis eines PCB-belasteten Schulgebäudes lagen allerdings mit 8,9–33,5 µg/kg TM, im Innenhof des Schulgebäudes sogar bis zu 1099 µg/kg TM, deutlich

höher. Diese Werte lagen auch deutlich über dem für NRW ermittelten OmH von 13 µg/kg TM. Am Referenzmesspunkt der Untersuchung in Kulmbach (ländlicher Hintergrund) lag der Gehalt bei 0,7 µg/kg TM.

Dasselbe gilt für die im Stadtgebiet von Nürnberg ermittelten **dl-PCB**-Gehalte von 4,7–7,8 ng TEQ/kg TM; im Innenhof des Schulgebäudes bis zu 205 ng TEQ/kg TM. Dabei wäre der OmH NRW mit 0,40 ng TEQ/kg TM deutlich überschritten. Am Referenzmesspunkt lag der Gehalt mit 0,1 niedriger als der OmH in NRW.

Es wurden in dieser Untersuchung auch **PCDD/F**-Gehalte in den Graskulturen ermittelt und dabei im Umfeld des Schulgebäudes Werte zwischen 0,1 und 0,4 ng TEQ/kg TM, im Innenhof 9,3 ng TEQ/kg TM ermittelt. Am Referenzmesspunkt betrug der Wert 0,2 ng TEQ/kg TM und lag damit unterhalb des für NRW ermittelten OmH von 0,30 ng TEQ/kg TM.

## 4.5 Anwendung

Am LANUV NRW dient das Verfahren der standardisierten Graskultur schwerpunktmäßig der Erfassung der Hintergrundbelastung. Da auch andere Bundesländer und Länder dieses Verfahren sowohl zur Langzeitbeobachtung als auch in Untersuchungen zur Immissionsbelastung in der Nähe von Quellen einsetzen, können die Daten gut miteinander verglichen werden. Das ermöglicht z. B. eine Beurteilung und Einordnung der in NRW ermittelten Gehalte und berechneten OmH. Deshalb soll auch ein Ländervergleich der in standardisierten Graskulturen ermittelten Gehalte organischer Schadstoffe durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurde das Verfahren auch zur Quellenfindung eingesetzt, beispielweise bei der Untersuchung im Dortmunder Hafengebiet zur Eingrenzung einer Quelle stark erhöhter PCB-Emissionen. Auch in Kamp-Lintfort (Deponie Eyler Berg) kam das Verfahren zum Einsatz, um mehrere Messwerte auf einem Transekt von der vermeintlichen Quelle (Deponie) zu einem belasteten Messpunkt zu erhalten.

## 5 Grünkohlexposition (90–100 Tage)

### 5.1 Durchführung des Verfahrens

Die Grünkohlexposition wird nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 4, „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation); Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl“ (in Vorbereitung) durchgeführt. Dabei werden Grünkohlpflanzen (*Brassica oleracea* var. *Sabellica*, Sorte Reflex/ Winnetou) für einen Zeitraum von 90 bis 100 Tagen in Containern exponiert (s. Abbildung 7). Es werden dabei analog zu der Verwendung des Grünkohls durch den Nutzer (z. B. Kleingartenbesitzer) alle verzehrbaren Teile der Pflanze der Analyse zugeführt. Nach Exposition wird der Grünkohl geerntet, gewaschen und küchenfertig aufgearbeitet. Bei Grünkohl werden die Werte in der Trockenmasse (TM) umgerechnet auf die Frischmasse (FM), um sie einzelfallbezogen mit lebensmittelrechtlich verankerten Höchstmengen und Beurteilungsgrundlagen vergleichen zu können.



**Abbildung 7:** Grünkohlexposition nach VDI 3957 Blatt 4



## 5.2 OmH der Grünkohlexposition (90–100 Tage)

Aus den Messwerten der Grünkohlexposition von neun bis elf Dauermessstationen des WDMP der letzten zehn Jahre wurden die OmH für NRW berechnet (s. Tab. 3). Die einzelnen Stoffe und Summenparameter sind in Kap. 3.2 aufgeführt.

Zusätzlich zum errechneten OmH wird die Anzahl N der eingeflossenen Messwerte, die Anzahl der Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze (BG), die Anzahl der insgesamt untersuchten Messpunkte (MP) und die Anzahl der untersuchten Jahre angegeben. Letztere beträgt bei der Grünkohlexposition immer zehn Jahre (aktuell 2010–2019). Bei Summenparametern werden keine Angaben zur Anzahl der Messwerte kleiner BG gemacht, da diese nur ermittelt werden, wenn eine ausreichende Anzahl an Einzelkomponenten größer BG ist.

Der OmH der Grünkohlexposition wurde wegen der großen auswertbaren Probenanzahl ( $N > 100$ ) meist als das 95. Perzentil berechnet.

**Tabelle 3:** Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) der Grünkohlexposition für NRW, berechnet nach VDI 3857 Blatt 2

Stoff	OmH	Einheit	N	Anzahl < BG	Anzahl MP	Anzahl Jahre
PCB <sub>gesamt</sub>	4,1	µg/kg FM	107	k. A.	10	10
∑ Tri-DecaCB	3,2	µg/kg FM	89	k. A.	10	10
di-PCB	0,069	ngTEQ/kg FM	107	k. A.	10	10
PCDD/F	0,094	ngTEQ/kg FM	108	k. A.	10	10
PAK <sub>gesamt</sub>	63	µg/kg FM	109	k. A.	10	10
PAK 4	6,0	µg/kg FM	110	k. A.	10	10
BaP	0,31	µg/kg FM	106	49	10	10
BaA	1,1	µg/kg FM	112	18	10	10
Chr	3,1	µg/kg FM	112	0	10	10
BbF	1,5	µg/kg FM	110	22	10	10
As	0,0070	mg/kg FM	109	84	10	10
Cd	0,021	mg/kg FM	112	0	11	10
Cr	0,10	mg/kg FM	109	53	11	10
Cu	1,2	mg/kg FM	110	0	11	10
Ni	0,19	mg/kg FM	111	7	11	10
Pb	0,043	mg/kg FM	111	51	11	10
Zn	5,1	mg/kg FM	112	0	11	10

Seit 2013 wurden jährlich neue OmH aus dem jeweils zurückliegenden Zehnjahreszeitraum für die Grünkohlexposition ermittelt. Eine detaillierte Darstellung der zeitlichen Verläufe erfolgt in der geplanten Neuauflage des LANUV-Fachberichtes 61 (2015). Bei einigen untersuchten Schadstoffen zeigt sich eine Absenkung des OmH: So ist der OmH für Blei von 0,13 mg/kg FM (2004–2013) um fast 70 % auf 0,043 mg/kg FM (2009–2018) zurückgegangen und in 2019 konstant geblieben, was sich entsprechend auf die Interpretation von Messwerten von Blei-Immissionen in Untersuchungsprogrammen auswirkt. Bei fast allen anderen untersuchten Schwermetallen sind die OmH annähernd gleichgeblieben.

Die OmH der untersuchten organischen Verbindungen verringern sich bei Grünkohl in den untersuchten Zehnjahreszeiträumen. Dabei ist z. B. der OmH für PCB<sub>gesamt</sub> von 6,1 µg/kg FM (2004–2013) um 33 % auf 4,1 µg/kg FM (2010–2019) zurückgegangen. Auch die Immissionen an dl-PCB, PCDD/F und PAK 4 in NRW gehen über die Jahre leicht zurück.

### 5.3 Standardunsicherheit der Grünkohlexposition (90–100 Tage)

Die aus den Ergebnissen der Doppelbeprobungen ermittelten Standardunsicherheiten sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Die Standardunsicherheit *u* wird einmal in der jeweiligen Einheit und zum anderen in % des Mittelwertes angegeben. Die Spalten Min und Max geben den Anwendungsbereich wieder. Die Anzahl *N* gibt an, wie viele Doppelsexpositionen ausgewertet werden konnten.

**Tabelle 4:** Standardunsicherheit *u* der Grünkohlexposition nach DIN EN ISO 20988

Stoff	<i>u</i>	Einheit	<i>u</i> in % Mittelwert	Min	Max	N
PCB <sub>gesamt</sub>	0,27	µg/kg FM	8,0	0,83	8,0	28
dl-PCB	0,015	ngTEQ/kg FM	26	0,011	0,25	28
PCDD/F	0,0075	ngTEQ/kg FM	13	0,021	0,14	28
PAK 4	1,0	µg/kg FM	16	1,0	35	25
BaP	0,080	µg/kg FM	22	0,080	2,3	28
BaA	0,23	µg/kg FM	17	0,15	13	27
Chr	0,45	µg/kg FM	15	0,50	15	27
BbF	0,29	µg/kg FM	19	0,15	5,2	25
As	0,00068	mg/kg FM	21	0,00085	0,010	28
Cd	0,0023	mg/kg FM	15	0,0068	0,024	28
Cr	0,023	mg/kg FM	38	0,011	0,20	28
Cu	0,12	mg/kg FM	15	0,46	1,8	28
Ni	0,018	mg/kg FM	18	0,032	0,24	28
Pb	0,011	mg/kg FM	32	0,0060	0,16	28
Zn	0,44	mg/kg FM	10	2,2	7,6	28

Die Standardunsicherheiten der untersuchten Stoffe und Summenparameter betragen zwischen 8,0 und 38 % des Mittelwertes. Das gesamte Verfahren der Grünkohlexposition inklusive der Analytik ist also mit einer verhältnismäßig geringen Unsicherheit behaftet.

Da die Doppelbeprobungen der Grünkohlexposition an allen Dauermessstationen des WDMP inklusive der Quellenstandorte durchgeführt worden sind, gelten die ermittelten Standardunsicherheiten für einen verhältnismäßig großen Wertebereich.

## 5.4 Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten

Da das hier beschriebene Bioindikationsverfahren nach VDI 3957 Blatt 4 (in Vorbereitung), das auch eine gesundheitliche Bewertung der Gehalte ermöglicht, derzeit nur vom LANUV NRW praktiziert wird, ist eine direkte Gegenüberstellung der Daten anderer Bundesländer und Untersuchungen nicht ohne weiteres möglich. So wird der Grünkohl beispielsweise in Bayern und Baden-Württemberg auch standardmäßig an Hintergrundmessstationen exponiert, aber entsprechend VDI 3957 Blatt 3 nach einer kürzeren Zeit geerntet und nicht küchenfertig aufbereitet (gewaschen).

Beim Biomonitoring mit Grünkohl im Umfeld des zukünftigen Flughafens Berlin Brandenburg wurden **Schwermetall**gehalte in ungewaschenem Grünkohl ermittelt (WÄBER et al. 2015), die – umgerechnet mit einem überschlägigen Trockenmassegehalt von 15–20 % auf die Frischmasse – im Folgenden mit den für NRW ermittelten OmH verglichen werden:

Die in der Untersuchung ermittelten **Arsen**-Gehalte in Berlin betragen 0,012–0,072 mg/kg FM und lagen damit alle höher als der OmH NRW von 0,0070. Auch die in Berlin ermittelten **Blei**-Gehalte lagen mit Werten zwischen 0,032–0,34 mg/kg FM im Verhältnis zum OmH in NRW von 0,043 mg/kg FM verhältnismäßig hoch. Dasselbe gilt auch für die **Cadmium-, Nickel-, Zink- und Chrom**gehalte.

Wie zu erwarten, sind die Schwermetall-Gehalte ungewaschener Grünkohl-Proben höher als die der gewaschenen Proben, denn auch an den Referenzmesspunkten der Untersuchung in Berlin wurden in den ungewaschenen Proben verhältnismäßig hohe Schwermetallgehalte ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass Metalle von den Grünkohlpflanzen nicht in die Zellen aufgenommen werden, sondern auf der Oberfläche in Form von Staub aufliegen und entsprechend beim Waschen teilweise entfernt werden können. Für eine gesundheitliche Bewertung eignen sich in diesem Fall nur küchenfertig aufbereitete (gewaschene) Proben.

Anders verhält es sich mit lipophilen, **organischen Schadstoffen** wie PCB, PCDD/F oder PAK. Diese binden sehr effektiv an die Wachse der Cuticula und lassen sich durch Waschen eher nicht entfernen.

Nach VDI 3957 Blatt 3 beträgt der mittlere PCB<sub>6</sub>-Gehalt in ungewaschenem Grünkohl im ländlichen Bereich ca. 3 µg/kg TM, im Ballungsraum ca. 10 µg/kg TM. Umgerechnet auf den **PCB<sub>gesamt</sub>**-Gehalt und die Frischmasse (bei einem Trockenmassegehalt von 15–20 %) sind das etwa 2,3–8 µg/kg FM. Das entspricht dem Niveau des OmH NRW von 4,1 µg/kg FM für gewaschenen Grünkohl.

Ähnliches gilt für die in der Richtlinie angegebenen Gehalte an **PCDD/F**, die zwischen 0,15 ng TEQ/kg TM im ländlichen Bereich und 1,5 ng TEQ/kg TM im Ballungsraum angegeben werden. Bei Umrechnung auf die Frischmasse wären das 0,023–0,30 ng TEQ/kg FM. Der OmH NRW beträgt 0,094 ng TEQ/kg FM.

Die in der Richtlinie VDI 3957 Blatt 3 angegebenen **PAK<sub>gesamt</sub>**-Gehalte liegen zwischen 30 µg/kg TM im ländlichen Raum und 2.000 µg/kg TM im Ballungsraum, was umgerechnet etwa 4,5–400 µg/kg FM entspräche. Der für NRW ermittelte OmH beträgt 63 µg/kg FM und liegt dementsprechend im Rahmen dieses Wertebereiches.

Bei der Untersuchung von Grünkohl im Umfeld des zukünftigen Flughafens Berlin Brandenburg wurde ein OmH für PAK<sub>gesamt</sub> im Grünkohl von 330 µg/kg TM angegeben (Wäber et al.

2015). Bei einem Trockenmassegehalt in Grünkohl zwischen 15 und 20 % würde dies einem Wert von 50–66 µg/kg FM entsprechen. Dies deckt sich gut mit dem für NRW ermittelten OmH von 63 µg/kg FM. Die in der Flughafen-Untersuchung ermittelten PAK<sub>gesamt</sub>-Gehalte betragen zwischen 260 µg/kg TM (39 – 52 µg/kg FM) an einem Referenzmesspunkt und 920 µg/kg TM (138–187 µg/kg FM) an einem der Belastungsmesspunkte und liegen damit teilweise oberhalb des OmH in NRW.

In derselben Untersuchung wurden **BaP**-Gehalte zwischen 4 und 21 µg/kg TM (entsprechend 0,6–4,2 µg/kg FM) ermittelt. Der OmH für NRW beträgt 0,31 µg/kg FM. Die in dieser Untersuchung ermittelten Werte liegen also deutlich oberhalb des OmH für NRW.

## 5.5 Anwendung

Das hier beschriebene Verfahren der Grünkohlexposition über 90–100 Tage ist beim LANUV NRW das Standardverfahren für Untersuchungen auf organische Schadstoffe, die gesundheitlich bewertet werden sollen. Deshalb wird es derzeit in einer Vielzahl an Untersuchungsprogrammen angewendet.

So wurde das Verfahren der Grünkohlexposition in der Vergangenheit beispielsweise zur Beurteilung der PCB-Immission im Dortmunder Hafen (RADERMACHER et al. 2011) und im Umfeld eines Recyclingbetriebes in Essen-Kray (KLEES et al. 2017) eingesetzt. Seit 2019 werden im Umkreis von silikonverarbeitenden Anlagen in Grünkohl auch die dabei entstehenden PCB-Kongenere 47, 51 und 68 erfasst (HOMBRECHER et al. 2021).

Außerdem werden mit Hilfe der Grünkohlexposition die PAK-Immissionen in Bottrop im Umfeld einer Kokerei ermittelt.

Neben der Exposition von Grünkohl zwischen August und November kann Grünkohl auch früher im Jahr, z. B. zwischen Mai und August am Standort exponiert werden, um einen weiteren Messwert pro Vegetationsperiode zu erhalten (s. Kap. 6).

## 6 Grünkohlexposition (28 Tage)

### 6.1 Entwicklung des Verfahrens

Da es bislang noch kein standardisiertes Bioindikationsverfahren gab, welches die gesamte Vegetationsperiode abbildet, mehrere Messwerte pro Jahr liefert und zudem auch noch die Möglichkeit einer gesundheitlichen Bewertung bietet, sollte ein solches am LANUV entwickelt werden.

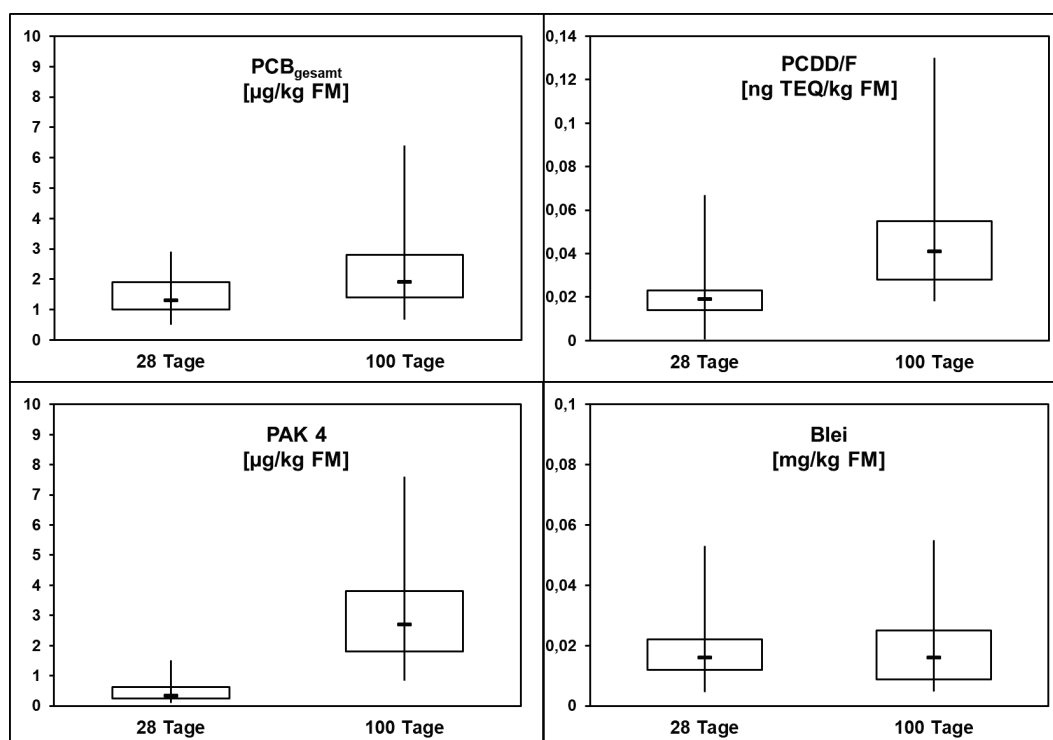
In einem ersten Schritt wurden umfangreiche Versuche zum Wuchsverhalten von verschiedenen Nahrungspflanzen in Pflanzcontainern durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass Grünkohl auch im Frühsommer ausreichend Biomasse bildet, um mehrere Ernten zu gewährleisten.

Es wurden analog zum Verfahren der Grünkohlexposition nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 4 (s. Kapitel 5) jeweils fünf vorgezogene Grünkohlpflanzen in Pflanzcontainer gepflanzt. Alle vier Wochen wurden jeweils ca. 500 g der voll ausgebildeten älteren Blätter geerntet und der Rest der jüngeren Blätter an den Pflanzen belassen. Auf diese Weise konnten über die Vegetationsperiode fünf Ernten realisiert werden.

Die in den Pflanzcontainern vorgezogenen Grünkohlpflanzen wurden in einem zweiten Schritt an verschiedenen Belastungsstandorten exponiert, alle vier Wochen geerntet und auf verschiedene Schadstoffe analysiert. Als Belastungsstandorte dienten: Stolberg (Immissionsbelastung durch Schwermetalle), Essen-Kray (Immissionsbelastung durch PCB), Bottrop (Immissionsbelastung durch PAK) und Duisburg-Hafen (Immissionsbelastung durch Schwermetalle, PCB, PCDD/F).

Diese Untersuchungen zeigten, dass Grünkohl in den vier Wochen geringere Mengen an organischen Schadstoffen akkumuliert hat als Grünkohl, der nach dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren 90–100 Tage exponiert wurde (s. Abb. 8). Dabei waren die Unterschiede bei  $PCB_{gesamt}$  geringer als bei PCDD/F und PAK. Bei den Schwermetallen sind die Unterschiede noch deutlich geringer als bei  $PCB_{gesamt}$ , bzw., wie in Abb. 8 für Blei abgebildet, nicht vorhanden.

Dieser Vergleich zeigt, dass es wichtig ist, für jedes Verfahren eigene OmH zu berechnen, um die an Belastungsmesspunkten ermittelten Gehalte beurteilen zu können.



**Abbildung 8:** Vergleich der Anreicherung von PCB<sub>gesamt</sub>, PAK<sub>4</sub>, PCDD/F und Blei (Pb) von Grünkohl, der an Hintergrundstandorten 28 bzw. 100 Tage exponiert wurde (N = 62–88 bei einer Exposition von 28 Tagen, N = 107–111 bei einer Exposition von 100 Tagen)

Im Verhältnis zu den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Bioindikatoren Mangold und Löwenzahn akkumuliert der 28 Tage exponierte Grünkohl immer noch größere Mengen an organischen Schadstoffen, insbesondere PCB (s. Kapitel 7 und 8). Deshalb bleibt der Grünkohl für Untersuchungen auf PCB auch bei kurzfristiger Exposition die beste Akkumulatorpflanze.

Allerdings akkumuliert der 28 Tage exponierte Grünkohl Schwermetalle wie Blei, Chrom, Arsen und Kupfer deutlich schlechter als die anderen beiden untersuchten Nutzpflanzen. Für Cadmium, Nickel und Zink konnte auch hier ein Substrateinfluss nachgewiesen werden. Zudem zeigten Grünkohlblätter von verhältnismäßig jungen Pflanzen (1. und 2. Ernte) jeweils deutlich niedrigere Metallgehalte als gleich lang exponierte Blätter älterer Pflanzen. Grünkohl eignet sich demnach nicht gut als Bioindikator für Schwermetalle. Das gilt auch für die 100 Tage exponierten Pflanzen.

Die Anzucht von Grünkohl ist etwas langwieriger als bei Mangold und die Grünkohlpflanzen weisen insbesondere im Früh- und Hochsommer viele Schädlinge auf (z. B. Gemüsefliege, Raupen vom Kohlweißling, Blattläuse). Trotzdem eignet er sich sehr gut auch für kurzfristige Untersuchungen bzw. wenn während einer Vegetationsperiode mehrere Werte ermittelt werden sollen, um z. B. kurzfristig auftretende Emissionen differenzieren zu können. Deshalb wurde das Verfahren bereits 2018 in einem Untersuchungsprogramm in Dinslaken erprobt (s. Kapitel 6.5).

## 6.2 Durchführung des Verfahrens

Die Grünkohlexposition wird, wie bereits in Kap. 5 beschrieben, nach der Richtlinie VDI 3957 Blatt 4, „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Bioindikation); Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl“ (in Vorbereitung) durchgeführt.

Abweichend dazu werden die Grünkohlpflanzen nicht von August bis November über 90–100 Tage, sondern über die gesamte Vegetationsperiode exponiert. Dazu werden vorgezogene Grünkohlpflanzen im Mai/ Juni an einem Hintergrund- oder Belastungsstandort in Pflanzcontainern ausgebracht. Die Pflanzen verbleiben über die gesamte Vegetationsperiode von Ende Mai bis Oktober am Expositionsort und nach jeweils vier Wochen (28 Tagen) Exposition werden die jeweils ältesten Blätter geerntet. Es werden fünf bis maximal sechs Teilernten erzeugt. Die geernteten Blätter werden gewaschen und küchenfertig aufgearbeitet. Bei Grünkohl werden die Werte in der Trockenmasse (TM) umgerechnet auf die Frischmasse (FM), um sie einzelfallbezogen mit lebensmittelrechtlich verankerten Höchstmengen und Beurteilungsgrundlagen vergleichen zu können.

## 6.3 OmH der Grünkohlexposition (28 Tage)

Zur Ermittlung von Hintergrundgehalten für NRW wurden die in den Jahren 2017–2019 ermittelten Schadstoffgehalte in Grünkohl vom Referenzstandort Essen/LANUV sowie von den in 2018 und 2019 untersuchten Standorten Egge und Köln herangezogen. Außerdem wurden Werte von verschiedenen Belastungsstandorten einbezogen, wenn diese für den jeweils untersuchten Schadstoff keinen erhöhten Immissionseinfluss aufwiesen. Die einzelnen Stoffe und Summenparameter sind in Kap. 3.2 aufgeführt.

Zusätzlich zum errechneten OmH wird die Anzahl N der eingeflossenen Messwerte, die Anzahl der Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze (BG), die Anzahl der insgesamt untersuchten Messpunkte und die Anzahl der untersuchten Jahre angegeben. Letztere beträgt hier immer drei Jahre (2017–2019). Bei Summenparametern werden keine Angaben zur Anzahl der Messwerte kleiner BG gemacht, da diese nur ermittelt werden, wenn eine ausreichende Anzahl an Einzelkomponenten größer BG ist.

Der OmH der Grünkohlexposition über 28 Tage wurde wegen der geringeren Probenanzahl ( $N < 100$ ) als das 75. Perzentil zuzüglich des 1,5-fachen Interquartilsabstands berechnet. Alle OmH werden in der Frischmasse (FM) angegeben (s. Tab. 5).

**Tabelle 5:** Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) der Grünkohlexposition über 28 Tage für NRW, berechnet nach VDI 3857 Blatt 2

Stoff	OmH	Einheit	N	Anzahl < BG	Anzahl MP	Anzahl Jahre
PCB <sub>gesamt</sub>	3,1	µg/kg FM	71	k. A.	4	3
dI-PCB	0,10	ngTEQ/kg FM	72	k. A.	4	3
PCDD/F	0,037	ngTEQ/kg FM	88	k. A.	8	3
PAK 4	1,2	µg/kg FM	62	k. A.	3	3
BaP	0,062	µg/kg FM	59	53	3	3
BaA	0,057	µg/kg FM	31	30	3	3
Chr	0,71	µg/kg FM	62	15	3	3
BbF	0,42	µg/kg FM	61	20	3	3
As	0,012	mg/kg FM	85	6	7	3
Cd	0,053	mg/kg FM	81	0	7	3
Cr	0,057	mg/kg FM	79	34	6	3
Cu	0,80	mg/kg FM	95	4	8	3
Ni	0,081	mg/kg FM	80	33	6	3
Pb	0,038	mg/kg FM	64	27	3	3
Zn	4,6	mg/kg FM	82	0	5	3

## 6.4 Standardunsicherheit der Grünkohlexposition (28 Tage)

Die aus den Ergebnissen der Doppelbeprobungen ermittelten Standardunsicherheiten sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Die Standardunsicherheit  $u$  wird einmal in der jeweiligen Einheit und zum anderen in % des Mittelwertes angegeben. Die Spalten Min und Max geben den Anwendungsbereich wieder. Die Anzahl  $N$  gibt an, wie viele Doppelexpositionen ausgewertet werden konnten.

Die Standardunsicherheiten der untersuchten Stoffe und Summenparameter betragen zwischen 7,0 und 39 % des Mittelwertes. Das gesamte Verfahren der Grünkohlexposition über 28 Tage inklusive der Analytik ist also mit einer verhältnismäßig geringen Unsicherheit behaftet.

Da die Doppelbeprobungen der Grünkohlexposition bisher ausschließlich an Hintergrundmessstationen durchgeführt wurden, ist der Anwendungsbereich der ermittelten Standardunsicherheiten relativ gering. Es ist geplant, in Zukunft auch Doppelbeprobungen an Belastungsstandorten durchzuführen, um den Anwendungsbereich entsprechend auszuweiten.



**Tabelle 6:** Standardunsicherheit u der Grünkohlexposition über 28 Tage nach DIN EN ISO 20988

Stoff	u	Einheit	u in % Mittelwert	Min	Max	N
PCB <sub>gesamt</sub>	0,21	µg/kg FM	16	0,093	2,3	27
dl-PCB	0,0042	ngTEQ/kg FM	11	0,0091	0,091	27
PCDD/F	0,0016	ngTEQ/kg FM	9,1	0,00046	0,028	25
PAK 4	0,078	µg/kg FM	16	0,10	1,3	27
BaP	0,014	µg/kg FM	39	0,014	0,057	27
BaA	0,014	µg/kg FM	23	0,016	0,21	27
Chr	0,054	µg/kg FM	22	0,025	0,95	27
BbF	0,031	µg/kg FM	24	0,025	0,40	25
As	0,0013	mg/kg FM	21	0,00067	0,031	27
Cd	0,0017	mg/kg FM	10	0,0024	0,040	27
Cr	0,0052	mg/kg FM	27	0,0065	0,17	24
Cu	0,056	mg/kg FM	12	0,18	0,94	27
Ni	0,010	mg/kg FM	33	0,0080	0,075	27
Pb	0,0063	mg/kg FM	33	0,0050	0,086	27
Zn	0,21	mg/kg FM	7,0	1,1	4,1	27

## 6.5 Anwendung

Das Verfahren wurde bereits an verschiedenen Belastungsstandorten erprobt und angewendet. So wurde es beispielsweise zur Erfassung kurzfristig variierender Schwermetall- und PCB-Einträge im Untersuchungsprogramm Dinslaken 2018 (Metallwerke Dinslaken) eingesetzt. Durch die vierwöchige Ernte erhielt man im Laufe der Vegetationsperiode fünf Messwerte, die einen Aufschluss darüber gaben, wie die Immissionssituation in den einzelnen Monaten war. Außerdem konnten die Messwerte mit den parallel stattfindenden Depositionsmessungen verglichen werden.

Auch im Untersuchungsprogramm Bottrop im Umfeld einer Kokerei kam das Verfahren 2019 zum Einsatz. In diesem Fall war es das Ziel der Untersuchungen, eine vermutete Quelle zu bestätigen. Die Messwerte der einzelnen Messperioden wurden dazu mit der in dem jeweiligen Monat vorherrschenden Windrichtung abgeglichen. Durch eine Korrelation der Gehalte mit der Windhäufigkeit aus der Richtung der vermuteten Quelle in der jeweiligen Messperiode konnte die Quelle bestätigt werden.

Auch in Zukunft soll dieses Verfahren eingesetzt werden, wenn es erforderlich ist, mehrere Messwerte pro Vegetationsperiode zu ermitteln.

Die in den 28 Tage exponierten Grünkohlpflanzen ermittelten Schadstoffgehalte könnten auch gesundheitlich bewertet werden. Allerdings wurden in den bisherigen Untersuchungen die jeweils zusätzlich über 100 Tage exponierten Grünkohlpflanzen bewertet, da diese eher einem tatsächlichen Anbau im Garten entsprechen.

## 7 Mangoldexposition (28 Tage)

### 7.1 Entwicklung des Verfahrens

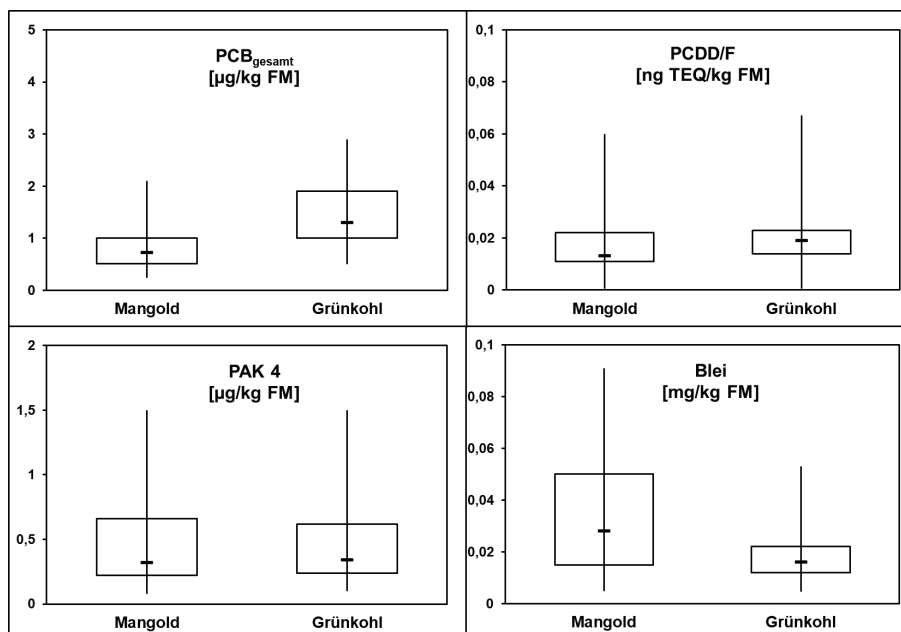
Auch die Mangoldexposition wurde als standardisiertes Bioindikationsverfahren entwickelt, welches die gesamte Vegetationsperiode abbildet, mehrere Messwerte pro Jahr liefert und die Möglichkeit einer gesundheitlichen Bewertung bietet.

Bei den umfangreichen Voruntersuchungen zeigte sich, dass Mangold in Pflanzcontainern ebenfalls genügend Biomasse bildet, um jeweils nach vier Wochen ausreichend Blätter zu ernten. Mangold wurde bereits in Österreich erfolgreich als Bioindikator für Schwermetalle eingesetzt (MAYR 1987).

Zunächst wurden Mangoldpflanzen (*Beta vulgaris* subsp. *Vulgaris*, Sorte Lucullus) in Pflanzcontainern in Einheitserde (ED 73) aus Saatgut angezogen, um deren Wuchsverhalten zu dokumentieren. Pro Pflanzcontainer (Fläche 40 x 60 cm) wurden ca. 20–30 Pflanzen ausgesät, um bei einer Ernte nach jeweils vierwöchiger Exposition fünfmal hintereinander ca. 300–500 g Pflanzenmaterial zu erhalten. Bei der Ernte wurden alle großen Blätter mit einer Keramikscherre abgeschnitten. Die Sprossspole und die jüngsten Blätter der Pflanzen blieben erhalten. Hieraus wuchsen in den darauffolgenden vier Wochen in der Regel erneut eine ausreichende Menge an Blättern heran. Nach der Ernte wurden die Pflanzcontainer jeweils gedüngt, um das Pflanzenwachstum im weiteren Verlauf nicht durch Nährstoffmangel zu limitieren.

Die in den Pflanzcontainern vorgezogenen Mangoldpflanzen wurden anschließend an verschiedenen Belastungsstandorten exponiert, alle vier Wochen geerntet und auf verschiedene Schadstoffe analysiert. Als Belastungsstandorte dienten: Stolberg (Immissionsbelastung durch Schwermetalle), Essen-Kray (Immissionsbelastung durch PCB), Bottrop (Immissionsbelastung durch PAK) und Duisburg-Hafen (Immissionsbelastung durch Schwermetalle, PCB, PCDD/F).

Diese Untersuchungen zeigten, dass Mangold sowohl organische Schadstoffe, wie PCB, PAK sowie PCDD/F, als auch Schwermetalle gut anreichert und infolgedessen einen sehr guten Akkumulationsindikator darstellt. Im Vergleich zu den parallel exponierten Grünkohlpflanzen reicherte Mangold etwas geringere Mengen an PCB, vergleichbare Mengen an PAK und PCDD/F und höhere Mengen an Schwermetallen an (s. Abb. 13).



**Abbildung 13:** Vergleich der Anreicherung von PCB<sub>gesamt</sub>, PAK4, PCDD/F und Blei (Pb) von jeweils vier Wochen exponierten Mangold- und Grünkohlpflanzen an Hintergrundstandorten (N = 62–88)

## 7.2 Durchführung des Verfahrens

Beim Mangoldexpositionsverfahren werden Mangoldpflanzen direkt in einen Pflanzcontainer ausgesät und im Gewächshaus vorgezogen. Ab Ende Mai erfolgt dann die Exposition. Nach jeweils vier Wochen werden alle exponierten Blätter der Mangoldpflanzen geerntet (s. Abbildung 14). Anschließend erfolgt eine Düngung. Zwischen Ende Mai und Oktober werden so fünf Teilernten erzeugt.



**Abbildung 14:** Ernte der Mangoldblätter nach vier Wochen Exposition

Die Anzucht und die Aufbereitung von Mangold (Sorte „Lucullus“) ist sehr unkompliziert und Mangold wird kaum von Schädlingen befallen. Durch die problemlose Ernte von ausreichenden Probenmengen nach jeweils vier Wochen eignet er sich sehr gut als Indikator für kurzfristige Untersuchungen bzw. wenn während einer Vegetationsperiode mehrere Werte ermittelt werden sollen, um z. B. kurzfristig auftretende Emissionen differenzieren zu können.

### 7.3 OmH der Mangoldexposition (28 Tage)

Zur Ermittlung von Hintergrundgehalten für NRW wurden die in den Jahren 2015–2019 ermittelten Schadstoffgehalte in Mangold vom Referenzstandort Essen/LANUV sowie von den in 2018 und 2019 untersuchten Standorten Egge und Köln herangezogen. Außerdem wurden auch Werte von verschiedenen Belastungsstandorten einbezogen, wenn diese für den jeweils untersuchten Schadstoff keinen erhöhten Immissionseinfluss aufwiesen. Die einzelnen Stoffe und Summenparameter sind in Kap. 3.2 aufgeführt.

Zusätzlich zum errechneten OmH wird die Anzahl N der eingeflossenen Messwerte angegeben, die Anzahl der Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze (BG), die Anzahl der insgesamt untersuchten Messpunkte (MP) und die Anzahl der untersuchten Jahre. Letztere beträgt hier zwischen drei und fünf Jahre (2015–2019). Bei Summenparametern werden keine Angaben zur Anzahl der Messwerte kleiner BG gemacht, da diese nur ermittelt werden, wenn eine ausreichende Anzahl an Einzelkomponenten größer BG ist.

Der OmH der Mangoldexposition über 28 Tage wurde – bis auf den für PCDD/F – wegen der geringeren Probenanzahl ( $N < 100$ ) als das 75. Perzentil zuzüglich des 1,5-fachen Interquartilsabstands berechnet. Alle OmH werden in der Frischmasse (FM) angegeben (s. Tab. 7).

**Tabelle 7:** Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) der Mangoldexposition über 28 Tage für NRW, berechnet nach VDI 3857 Blatt 2

Stoff	OmH	Einheit	N	Anzahl < BG	Anzahl MP	Anzahl Jahre
PCB <sub>gesamt</sub>	1,8	µg/kg FM	72	k. A.	4	5
dl-PCB	0,011	ngTEQ/kg FM	71	k. A.	4	5
PCDD/F	0,041	ngTEQ/kg FM	110	k. A.	10	5
PAK 4	1,3	µg/kg FM	74	k. A.	5	4
BaP	0,033	µg/kg FM	53	49	5	4
BaA	0,10	µg/kg FM	40	26	5	4
Chr	0,75	µg/kg FM	75	8	5	4
BbF	0,42	µg/kg FM	74	13	5	4
As	0,0083	mg/kg FM	80	13	8	3
Cd	0,040	mg/kg FM	88	0	8	4
Cr	0,072	mg/kg FM	84	26	8	4
Cu	1,8	mg/kg FM	92	0	9	4
Ni	0,14	mg/kg FM	76	26	7	4
Pb	0,10	mg/kg FM	69	9	4	4
Zn	8,7	mg/kg FM	84	0	6	4

## 7.4 Standardunsicherheit der Mangoldexposition (28 Tage)

Die aus den Ergebnissen der Doppelbeprobungen ermittelten Standardunsicherheiten sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Die Standardunsicherheit  $u$  wird einmal in der jeweiligen Einheit und zum anderen in % des Mittelwertes angegeben. Die Spalten Min und Max geben den Anwendungsbereich wieder. Die Anzahl  $N$  gibt an, wie viele Doppelexpositionen ausgewertet werden konnten.

Die Standardunsicherheiten der untersuchten Stoffe und Summenparameter betragen zwischen 5,8 und 46 % des Mittelwertes. Das gesamte Verfahren der Mangoldexposition über 28 Tage inklusive der Analytik ist also mit einer verhältnismäßig geringen Unsicherheit behaftet.

Da die Doppelbeprobungen der Mangoldexposition bisher ausschließlich an Hintergrundmessstationen durchgeführt wurden, ist der Anwendungsbereich der ermittelten Standardunsicherheiten relativ gering. Es ist geplant, in Zukunft auch Doppelbeprobungen an Belastungsstandorten durchzuführen, um den Anwendungsbereich entsprechend auszuweiten.

**Tabelle 8:** Standardunsicherheit  $u$  der Mangoldexposition über 28 Tage nach DIN EN ISO 20988

Stoff	$u$	Einheit	$u$ in % Mittelwert	Min	Max	N
PCB <sub>gesamt</sub>	<b>0,073</b>	µg/kg FM	11	0,24	1,3	26
dl-PCB	<b>0,0036</b>	ngTEQ/kg FM	46	0,0051	0,034	26
PCDD/F	<b>0,00066</b>	ngTEQ/kg FM	5,8	0,00043	0,024	25
PAK 4	<b>0,13</b>	µg/kg FM	33	0,079	1,5	25
BaP	<b>0,0083</b>	µg/kg FM	31	0,010	0,088	25
BaA	<b>0,014</b>	µg/kg FM	42	0,011	0,082	25
Chr	<b>0,066</b>	µg/kg FM	34	0,023	0,70	25
BbF	<b>0,054</b>	µg/kg FM	39	0,023	0,70	25
As	<b>0,00031</b>	mg/kg FM	13	0,00058	0,0061	26
Cd	<b>0,0020</b>	mg/kg FM	14	0,0033	0,030	26
Cr	<b>0,0034</b>	mg/kg FM	16	0,0050	0,067	26
Cu	<b>0,10</b>	mg/kg FM	10	0,57	1,4	26
Ni	<b>0,0089</b>	mg/kg FM	23	0,0046	0,10	26
Pb	<b>0,014</b>	mg/kg FM	44	0,0049	0,20	26
Zn	<b>0,45</b>	mg/kg FM	10	2,1	7,3	26

## 7.5 Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten

Mangold wurde bereits als Bioindikator für immissionsbedingte Einträge von Schwermetallen eingesetzt (MAYR 1987). Dabei wurde das Verfahren ähnlich wie die standardisierte Graskultur in aufgeständerten Expositionsgefäßen im Stadtgebiet von Linz/ Oberösterreich durchgeführt. Bei einer 21-tägigen Exposition wurden Blei-Gehalte von 0,60–2,6 mg/kg TM ermittelt, was bei einem mittleren Trockenmassegehalt von 9,3 % Gehalten von 0,056–0,24 mg/kg FM entspräche. Diese Werte liegen in der Größenordnung im Bereich der in NRW ermittelten Gehalte in Mangoldpflanzen. An einigen Messpunkten in Linz wäre der in NRW ermittelte OmH von 0,1 mg/kg FM damit überschritten.

## 7.6 Anwendung

Zur Erprobung als Bioindikator für kurzfristig variierende Schwermetalleinträge wurde Mangold bereits 2018 im Untersuchungsprogramm Dinslaken (Metallwerke Dinslaken) eingesetzt. Auch im Untersuchungsprogramm Bottrop kam Mangold zum Einsatz, um die ermittelten PAK-Gehalte in den einzelnen Messperioden mit der Windhäufigkeit zu korrelieren (s. Kap. 5.5).

Das Bayerische Landesamt für Umwelt erprobt diese Methode derzeit aufgrund unserer Expertise zur Erfassung von kurzfristigen Einträgen von Pflanzenschutzmitteln. Die in den Mangoldpflanzen ermittelten Schadstoffgehalte könnten auch gesundheitlich bewertet werden. Allerdings wurden in den bisherigen Untersuchungen die jeweils zusätzlich über 100 Tage exponierten Grünkohlpflanzen bewertet.

## 8 Löwenzahnexposition und Löwenzahnscreening

### 8.1 Entwicklung der Verfahren

Zusätzlich zu den in den Kapiteln 6 und 7 beschriebenen aktiven Bioindikationsverfahren sollte ein passives Screening-Verfahren entwickelt werden, das eine hohe Standardisierung und Vergleichbarkeit aufweist, aber im Gegensatz zur Fichtennadelbeprobung auch die Möglichkeit der gesundheitlichen Bewertung bietet.

Dazu wurde Löwenzahn als Akkumulatorpflanze ausgewählt, da dieser als Nahrungspflanze eingestuft wird: Die Stoffliste des Bundes und der Bundesländer Kategorie „Pflanzen und Pflanzenteile“ führt Kraut und Wurzel von *Taraxacum officinale* sowohl als Lebensmittel als auch als Arzneistoff mit durch klinische Daten belegter pharmakologischer Wirkung auf (BVL-Report 8.4 2014). Auch von der Europäischen Agentur für Lebensmittelsicherheit (EFSA) wird Löwenzahn als Nahrungspflanze eingestuft (EFSA 2014). Löwenzahn ist ubiquitär in den wärmeren Bereichen der Nordhalbkugel verbreitet und seine Bestandteile werden in vielen verschiedenen Zubereitungen, wie beispielsweise die Blätter frisch als Salat, oder in anderen Lebensmittelprodukten verwendet (LIS & OLAS 2019). Außerdem ist er in vielen Habitaten zu finden: In Klein- und Hausgärten genauso wie auf Wiesen und Weiden sowie auf Ruderalstandorten.

Löwenzahn wurde bereits als Bioindikator für Schwermetallbelastungen beschrieben (LISIAK-ZIELINSKA et al. 2021, NADGORSKA-SOCHA et al. 2017, LIGOCKI et al. 2011, RADULESCU et al. 2013). Dabei nimmt Löwenzahn verschiedene Metalle (Cadmium, Chrom, Kupfer, Blei, Zink und Eisen) sehr effektiv aus kontaminierten Böden auf und akkumuliert diese sowohl in der Wurzel als auch im Spross (BINI et al. 2012). Es konnte aber auch gezeigt werden, dass Löwenzahnblätter in industriell geprägten Regionen als Bioindikator für immissionsbedingte Einträge von Blei und Quecksilber zum Einsatz kommen können (KLECKEROVA & DOCEKALOVA 2013).

In einigen Studien wurde auch die Eignung von Löwenzahn als Bioindikator für organische Schadstoffe untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Löwenzahn in der Umgebung eines Eisenbahn-Knotenpunktes in Polen sowohl polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) als auch polychlorierte Biphenyle (PCB) aufgenommen hat und sich dementsprechend gut als Bioindikator für diese Schadstoffe eignet (MALAWSKA & WILKOMIRSKI 2000; 2001). Es wurde dabei gezeigt, dass die ermittelten PCB-Gehalte in den Löwenzahnblättern deutlich höher waren als in parallel untersuchten Böden und es keinen klaren Zusammenhang zwischen Boden- und Pflanzengehalten gab (MALAWSKA & WILKOMIRSKI 2001).

Grundsätzlich ist die Aufnahme komplexer, lipophiler Schadstoffe über die Wurzel bei vielen Pflanzen eher gering; die Aufnahme über den sogenannten Verschmutzungspfad oder die Ausgasung aber durchaus möglich (LANUV Arbeitsblatt 22 2014). Die Aufnahme organischer Schadstoffe aus der Luft wurde an Löwenzahnblättern bereits gut untersucht (BÖHME et al. 1999). Dabei konnte gezeigt werden, dass die Beschaffenheit der Cuticula eine wichtige Rolle für das Aufnahmevermögen verschiedener Spezies spielt. Es ist also davon auszugehen, dass organische Schadstoffe in Löwenzahnblättern hauptsächlich aus der Luft aufgenommen werden und in der cuticulären Wachsschicht akkumulieren.

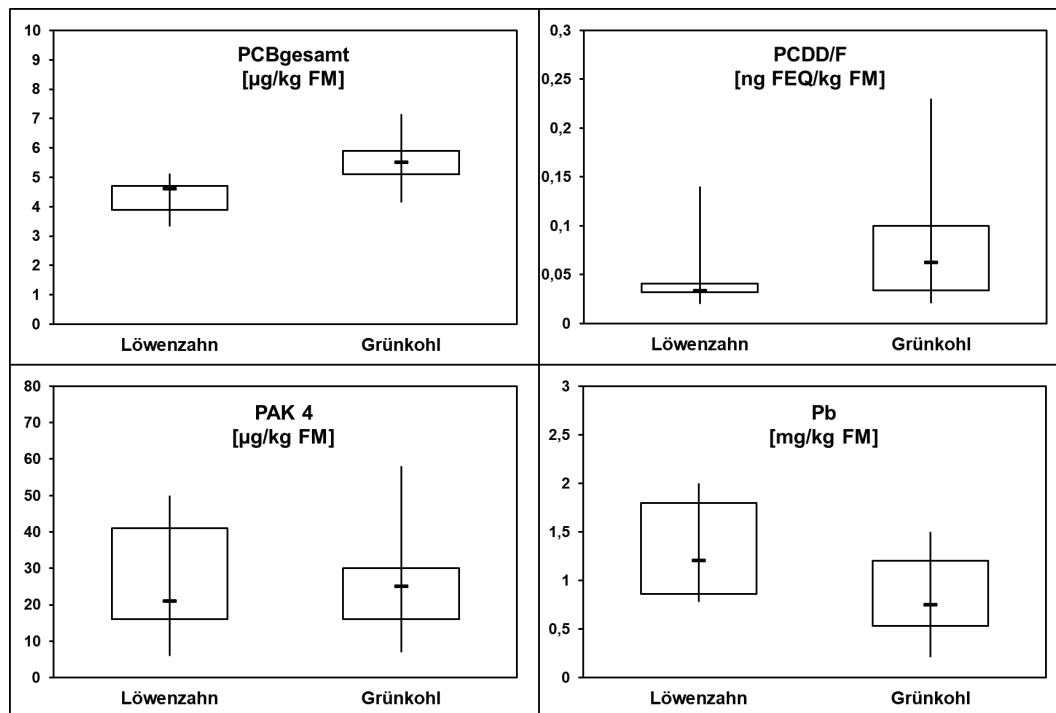
Da gerade der immissionsbedingte Eintrag von organischen Schadstoffen, wie polychlorierten Biphenylen (PCB), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) oder polychlorierten Dibenzodioxinen und -Furanen (PCDD/F) in den Untersuchungen des LANUV von großem Interesse ist, sollte die Eignung von Löwenzahn als Bioindikator für diese Luftschadstoffe geprüft und mit parallel exponiertem Grünkohl verglichen werden.

Zunächst wurden Löwenzahnpflanzen (*Taraxacum officinale*) unter standardisierten Bedingungen in Pflanzcontainern in Einheitserde (ED 73) aus Saatgut angezogen, um deren Wuchsverhalten zu dokumentieren. Pro Pflanzcontainer (Fläche 40 x 60 cm) wurden ca. 20–30 Pflanzen ausgesät, um bei einer Ernte nach jeweils vierwöchiger Exposition fünfmal hintereinander ca. 300–500 g Pflanzenmaterial zu erhalten. Bei der Ernte wurden alle großen Blätter mit einer Keramikscherer abgeschnitten. Die Sprossspole und die jüngsten Blätter der Pflanzen blieben erhalten. Hieraus wuchsen in den darauffolgenden vier Wochen in der Regel erneut eine ausreichende Menge an Blätter heran. Nach der Ernte wurden die Pflanzcontainer jeweils gedüngt, um das Pflanzenwachstum im weiteren Verlauf nicht durch Nährstoffmangel zu limitieren.

Die in den Pflanzcontainern vorgezogenen Löwenzahnpflanzen wurden anschließend an verschiedenen Belastungsstandorten exponiert, alle vier Wochen geerntet und auf verschiedene Schadstoffe analysiert. Als Belastungsstandorte dienten: Stolberg (Boden- und Immissionsbelastung durch Schwermetalle), Essen-Kray (Immissionsbelastung durch PCB), Bottrop (Immissionsbelastung durch PAK) und Duisburg-Hafen (Immissionsbelastung durch Schwermetalle, PCB, PCDD/F).

Die Untersuchungen von in Pflanzcontainern an Belastungsstandorten exponierten Löwenzahnpflanzen zeigen, dass Löwenzahn sowohl organische Schadstoffe, wie PCB, PAK sowie PCDD/F als auch Schwermetalle gut aus der Luft anreichert und infolgedessen einen sehr guten Akkumulationsindikator darstellt. Im Vergleich zu den parallel exponierten Grünkohlpflanzen reicherte Löwenzahn etwas geringere Mengen an PCB, vergleichbare Mengen an PAK und PCDD/F und höhere Mengen an Schwermetallen an (s. Abb. 15).



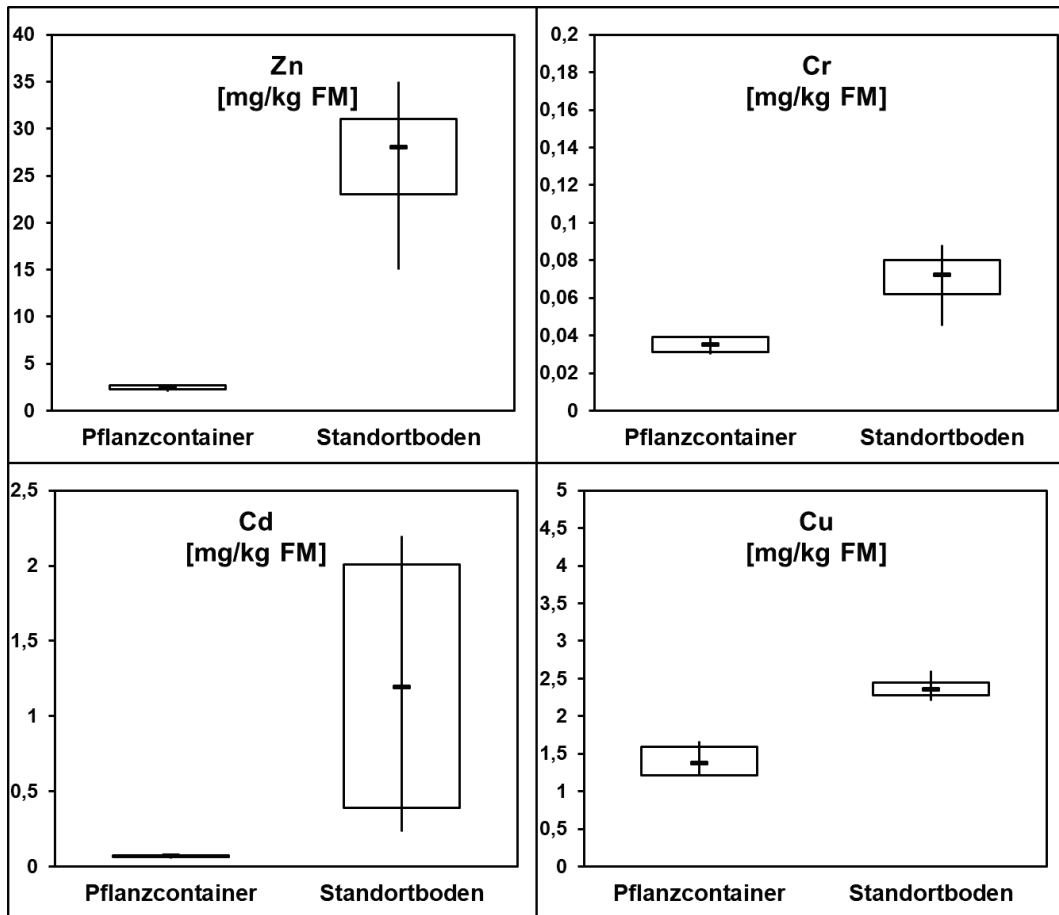


**Abbildung 15:** Vergleich der Anreicherung von PCB<sub>gesamt</sub>, PAK<sub>4</sub>, PCDD/F und Blei (Pb) von jeweils vier Wochen exponierten Löwenzahn- und Grünkohlpflanzen an Belastungsstandorten in Pflanzcontainern mit Einheitserde (PCB<sub>gesamt</sub> am Standort Essen-Kray 2017 N = 5/8; PAK 4 am Standort Bottrop 2017, N = 6/9; PCDD/F am Standort Duisburg-Hafen 2017, N = 9/9; Pb am Standort Stolberg, N = 8/8)

Bei der weiteren Untersuchung wurden zusätzlich zu der Exposition von Löwenzahn in Pflanzcontainern an Belastungsstandorten auch vor Ort in Standortböden wachsende Löwenzahnpflanzen beprobt, um zu überprüfen, ob die im Standortboden wachsenden Pflanzen höhere Gehalte aufwiesen als die im Pflanzcontainer.

Dabei zeigte sich am Belastungsstandort Stolberg deutlich, dass Löwenzahn in der Lage ist, Schwermetalle aus belasteten Böden aufzunehmen und anzureichern, wie es bereits in der Literatur beschrieben wurde (LISIAK-ZIELINSKA et al. 2021, NADGORSKA-SOCHA et al. 2017, BINI et al. 2012, LIGOCKI et al. 2011, RADULESCU et al. 2013). Es wurden in Löwenzahnproben vom Standortboden deutlich höhere Gehalte an Zink und Cadmium gefunden; auch Chrom und Kupfer waren erhöht (s. Abb. 16). Bei Blei war der Unterschied etwas geringer. Dadurch wird im Einzelfall die Erfassung von immissionsbedingten Schwermetalleinträgen an Belastungsstandorten mit kontaminierten Böden erschwert.

Ein Eintrag von organischen Schadstoffen aus dem Boden in die Löwenzahnpflanzen konnte nicht nachgewiesen werden. Zum einen wiesen die untersuchten Standortböden eher niedrige Gehalte an organischen Schadstoffen auf, um einen Eintrag über den Verschmutzungspfad bzw. durch Ausgasen und gasförmige Aufnahme in die Pflanze zu verursachen. Zum anderen ist eine systemische Aufnahme der hier untersuchten lipophilen, organischen Schadstoffe über die Wurzel eher unwahrscheinlich (vgl. LANUV Arbeitsblatt 22 2014).



**Abbildung 16:** Vergleich der Anreicherung von Zink, Cadmium, Chrom und Kupfer von in Pflanzcontainern exponierten und in belastetem Standortboden geernteten Löwenzahnpflanzen am Standort Stolberg (N = 4)

## 8.2 Durchführung der Verfahren

Bei der **Löwenzahnexposition** werden Löwenzahnpflanzen direkt in einen Pflanzcontainer ausgesät und im Gewächshaus vorgezogen. Ab Ende Mai erfolgt dann die Exposition. Nach jeweils vier Wochen werden alle exponierten Blätter der Löwenzahnpflanzen geerntet (s. Abbildung 17). Nach jeder Ernte erfolgt eine Düngung. Zwischen Ende Mai und Oktober werden so fünf Teilernten erzeugt.

Beim **Löwenzahnscreening** werden vor Ort einzelne, große Löwenzahnblätter geerntet oder ganze Pflanzen aus der Erde ausgestochen.

Die Löwenzahnblätter/-pflanzen werden küchenfertig aufbereitet, indem die Blattspreiten von den längeren Stielen getrennt werden. Sie werden mehrfach gewaschen und anschließend (gefrier-)getrocknet, vermahlen und auf ihre Gehalte an Schwermetallen und/ oder organischen Schadstoffen analysiert.



Abbildung 17: geerntete Löwenzahnblätter

## 8.3 OmH der Löwenzahnexposition und des -screenings

Die aus den Messwerten berechneten Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) sind in Tabelle 9 aufgeführt. Es wurden die OmH für die in Kap. 3.2 aufgeführten Stoffe und Summenparameter ermittelt.

Zusätzlich zum errechneten OmH wird die Anzahl N der eingeflossenen Messwerte angegeben, die Anzahl der Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze (BG), die Anzahl der insgesamt untersuchten Messpunkte (MP) und die Anzahl der untersuchten Jahre. Letztere beträgt maximal vier Jahre (2016–2019). Bei Summenparametern werden keine Angaben zur Anzahl der Messwerte kleiner BG gemacht, da diese nur ermittelt werden, wenn eine ausreichende Anzahl an Einzelkomponenten größer BG ist.

Der OmH wird in der Darstellung der Messwerte an einzelnen Messpunkten in einem Untersuchungsprogramm als Linie eingetragen. Dadurch können Überschreitungen des OmH sehr gut visuell erfasst werden.

**Tabelle 9:** Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) von Löwenzahn für NRW, berechnet nach VDI 3857 Blatt 2

Stoff	OmH	Einheit	N	Anzahl < BG	Anzahl MP	Anzahl Jahre
PCB <sub>gesamt</sub>	1,9	µg/kg FM	57	k. A.	4	4
∑ Tri-DecaCB	1,5	µg/kg FM	57	k. A.	4	4
dl-PCB	0,055	ngTEQ/kg FM	57	k. A.	4	3
PCDD/F	0,041	ngTEQ/kg FM	78	k. A.	10	4
PAK 4	1,3	µg/kg FM	53	k. A.	5	4
BaP	0,033	µg/kg FM	53	40	4	4
BaA	0,10	µg/kg FM	40	34	5	4
Chr	0,75	µg/kg FM	75	8	5	4
BbF	0,42	µg/kg FM	74	13	5	4
As	0,029	mg/kg FM	48	0	7	3
Cd	0,049	mg/kg FM	61	0	7	4
Cr	0,075	mg/kg FM	61	25	7	4
Cu	2,2	mg/kg FM	71	6	9	4
Ni	0,088	mg/kg FM	55	17	6	4
Pb	0,091	mg/kg FM	50	13	3	4
Zn	4,3	mg/kg FM	57	0	4	4

Es ist zu beachten, dass diese OmH auf der Basis von Gehalten ermittelt wurden, die auf einer standardisierten Exposition von Löwenzahnpflanzen über vier Wochen in gut gedüngter Einheitserde basiert. Da das Screening allerdings an vor Ort gewachsenen Löwenzahnpflanzen durchgeführt wird, sind bei der Interpretation der Daten folgende Punkte zu beachten:

- Es handelt sich bei vor Ort wachsendem Löwenzahn in der Regel um verschiedene Subspezies von *Taraxacum officinale*, die aufgrund ihrer genetischen Disposition und der spezifischen Standortbedingungen sehr unterschiedliche Wuchsformen aufweisen können und damit ggf. auch andere Akkumulationseigenschaften besitzen als die in Pflanzcontainern exponierten Löwenzahnpflanzen. So gibt es z. B. Pflanzen mit großen Blattspreiten und solche mit sehr stark aufgegliederten Blättern, deren Blattfläche um ein Vielfaches geringer ist.
- Das Blattalter und damit die Expositionszeit von vor Ort geernteten Löwenzahnblättern ist in der Regel nicht bekannt. Dieses kann variieren: Überwinternde Blattrosetten weisen ggf. Blätter auf, die zwischen November und März exponiert waren, also deutlich länger als vier Wochen. Dagegen werden die Blätter im Frühsommer, insbesondere bei Trockenheit, ggf. auch schon schneller seneszent. Aus Beobachtungsstudien an verschiedenen Löwenzahnpflanzen zeigte sich jedoch, dass die meisten Blätter ca. 4–8 Wochen alt werden und deshalb mit den für die OmH-Berechnung exponierten Blättern durchaus vergleichbar waren.
- Löwenzahn kann Schwermetalle aus belasteten Böden aufnehmen. Das erschwert die Beurteilung von immissionsbedingten Einträgen von Schwermetallen deutlich. In diesem Fall macht es Sinn, gleichzeitig auch die Bodengehalte der untersuchten Messpunkte zu bestimmen, wenn diese nicht bereits bekannt sind. Das LANUV NRW hat

das Löwenzahnscreening deshalb bisher ausschließlich für das Monitoring von organischen Schadstoffen eingesetzt.

## 8.4 Standardunsicherheit der Löwenzahnexposition und des -screenings

Die aus den Ergebnissen der Doppelbeprobungen ermittelten Standardunsicherheiten sind in Tabelle 10 aufgeführt. Es wurden die Standardunsicherheiten für die im Kapitel 3.2 aufgeführten Stoffe und Summenparameter ermittelt.

Die Standardunsicherheit  $u$  wird einmal in der jeweiligen Einheit und zum anderen in % des Mittelwertes angegeben. Die Spalten Min und Max geben den Anwendungsbereich wieder. Die Anzahl  $N$  gibt an, wie viele Doppelexpositionen ausgewertet werden konnten.

**Tabelle 10:** Standardunsicherheit  $u$  von Löwenzahn nach DIN EN ISO 20988

Stoff	$u$	Einheit	$u$ in % Mittelwert	Min	Max	N
PCB <sub>gesamt</sub>	0,045	µg/kg FM	5,9	0,36	1,3	17
∑ Tri-DecaCB	0,041	µg/kg FM	13	0,012	0,77	17
dl-PCB	0,0047	ngTEQ/kg FM	17	0,0087	0,050	17
PCDD/F	0,0080	ngTEQ/kg FM	50	0,0012	0,062	17
PAK 4	0,13	µg/kg FM	33	0,091	0,92	16
BaP	0,013	µg/kg FM	41	0,012	0,073	16
BaA	0,014	µg/kg FM	30	0,013	0,15	16
Chr	0,040	µg/kg FM	21	0,028	0,41	16
BbF	0,043	µg/kg FM	34	0,027	0,41	16
As	0,0011	mg/kg FM	9,2	0,0050	0,025	11
Cd	0,0025	mg/kg FM	9,6	0,013	0,047	16
Cr	0,0025	mg/kg FM	11	0,0061	0,046	16
Cu	0,098	mg/kg FM	12	0,036	1,3	16
Ni	0,0043	mg/kg FM	16	0,0053	0,060	16
Pb	0,047	mg/kg FM	19	0,0060	0,063	16
Zn	0,32	mg/kg FM	11	1,7	4,1	16

Die Standardunsicherheiten für die einzelnen PCB-Parameter sind verhältnismäßig niedrig und betragen zwischen 5,9–17 % des Mittelwertes. Auch bei den untersuchten Schwermetallen liegen die Standardunsicherheiten zwischen 9–19 % des Mittelwertes. Bei den PAK und Dioxinen liegen die Messwerte der an Hintergrundstationen exponierten Löwenzahnpflanzen insgesamt sehr nah an der Bestimmungsgrenze und schwanken dadurch stärker. Dadurch wurden für diese Stoffe etwas höhere Standardunsicherheiten berechnet. Trotzdem ist die festgestellte Standardunsicherheit des gesamten Löwenzahnverfahrens inklusive der Analytik als verhältnismäßig gering anzusehen.

Die Anwendungsbereiche der hier ermittelten Standardunsicherheiten sind z. T. sehr gering, weil die Doppelexpositionen zunächst nur an Hintergrundstandorten erfolgt sind. In Zukunft

sollen auch Doppelbeprobungen an Belastungsstandorten erfolgen, um den Anwendungsbereich dieser Kenngrößen zu erhöhen.

## 8.5 Vergleich mit Literaturdaten/Länderdaten

Löwenzahn wurde bereits als Bioindikator für immissionsbedingte Einträge von Blei und Quecksilber (KLECKEROVA & DOCEKALOVA 2013) sowie für PAK und PCB (MALAWSKA & WILKOMIRSKI 2000; 2001) beschrieben. Allerdings gab es bisher offensichtlich keine systematische Bestimmung von Hintergrundgehalten.

In den Untersuchungen in der Umgebung eines Eisenbahn-Knotenpunktes in Polen wurden PAK 4-Gehalte zwischen 49 und 142 µg/kg in der Trockenmasse ermittelt, was (bei einem durchschnittlichen Trockenmassegehalt von Löwenzahn von 12 %) Werten in der Frischmasse von 5,8–17 µg/kg entspräche (MALAWSKA & WILKOMIRSKI 2000). Diese Werte liegen deutlich höher als der bisher in NRW ermittelte OmH. Dabei ist allerdings zu beachten, dass in der polnischen Untersuchung bei der Pflanzenaufbereitung die Löwenzahnblätter vermutlich nicht gewaschen wurden.

## 8.6 Anwendung der Löwenzahnexposition und des -screenings

Das Löwenzahnscreening wurde bereits in verschiedenen Untersuchungsprogrammen erprobt und erfolgreich angewendet. Dabei erfolgte die Untersuchung im Umkreis der Kokerei Bottrop auf PAK und im Umkreis verschiedener Betriebe zur Silikonverarbeitung auf PCB (HOMBRECHER & BOTH 2021, HOMBRECHER et al. 2021).

Das Verfahren soll auch in Zukunft bei Untersuchungen zum Einsatz kommen, in denen kurzfristig Messwerte benötigt werden, um z. B. eine Reichweitenabschätzung zu erhalten oder eine semiquantitative gesundheitliche Bewertung vorzunehmen. Die Bewertung wird als semiquantitativ bezeichnet, da im Vergleich zur standardisierten Verfahren der Expositionszeitraum nicht exakt bestimmt, sondern nur abgeschätzt werden kann.

Die standardisierte Exposition von Löwenzahn erwies sich als deutlich arbeitsaufwendiger als z. B. die Exposition von Mangold oder Grünkohl, was unter anderem daran liegt, dass es schwer ist keimfähiges Saatgut zu beschaffen. Aus diesem Grund werden bei Untersuchungsprogrammen über längere Zeiträume Mangold und Grünkohl als Bioindikatoren bevorzugt.

## 9 Zusammenfassung und Fazit

Zur Erfassung der Immissionsbelastung stehen mehrere Bioindikationsverfahren zur Verfügung, die je nach Fragestellung zum Einsatz kommen können.

Das Verfahren der **standardisierten Graskultur** nach VDI 3957 Blatt 2 dient in NRW schwerpunktmäßig der Erfassung der Hintergrundbelastung. Darüber hinaus wird das Verfahren auch zur Quellenfindung eingesetzt.

Da auch andere Bundesländer und Länder dieses Verfahren sowohl zur Langzeitbeobachtung als auch in Untersuchungen zur Immissionsbelastung in der Nähe von Quellen einsetzen, können die Daten gut miteinander verglichen werden. Das ermöglicht z. B. eine Einordnung der in NRW ermittelten Schadstoffgehalte und berechneten OmH.

Mit Hilfe der standardisierten Graskultur können sehr gut Schwermetallimmissionen nachgewiesen werden. Die Graskultur eignet sich auch für die Untersuchung von organischen Schadstoffen, akkumuliert diese aber deutlich schlechter als z. B. Grünkohl. Derzeit wird die Graskultur vom LANUV auch zur Ermittlung des immissionsbedingten Eintrags von Pflanzenschutzmitteln eingesetzt. Ergebnisse lagen bei Drucklegung dieses Berichtes noch nicht vor.

Das Verfahren der **Grünkohlexposition** über 90–100 Tage nach VDI 3957 Blatt 4 ist beim LANUV NRW das Standardverfahren für Untersuchungen auf organische Schadstoffe, die gesundheitlich bewertet werden sollen. Deshalb wird es derzeit in einer Vielzahl an Untersuchungsprogrammen angewendet.

Grünkohl ist im Vergleich zu den anderen eingesetzten Bioindikatoren die beste Akkumulatorpflanze für PCB. Auch andere organische Schadstoffe, wie PCDD/F und PAK, akkumuliert Grünkohl sehr gut. Als Indikator für die Aufnahme von Schwermetallen ist dieses Verfahren weniger geeignet, da Grünkohl Schwermetalle aus der Luft nicht effektiv anreichert und durch das Waschen der Grünkohlblätter viele immissionsbedingte, nur lose auf der Oberfläche anhaftende, Einträge entfernt werden.

Neben der Exposition von Grünkohl zwischen August und November kann Grünkohl auch früher im Jahr, z. B. zwischen Mai und August am Standort exponiert werden, um einen weiteren Messwert pro Vegetationsperiode zu erhalten.

Außerdem wurde ein Verfahren neu entwickelt, Grünkohl ganzjährig zu exponieren, alle vier Wochen zu ernten und so bis zu fünf Messwerte pro Vegetationsperiode zu erhalten.

Auch das neu entwickelte Verfahren der **Mangold-Exposition** eignet sich sehr gut, um mehrere Messwerte pro Vegetationsperiode zu erhalten.

Dabei eignet sich Mangold besser als Bioindikator für Schwermetalle als z. B. Grünkohl. Auch die organischen Schadstoffe PCDD/F und PAK werden von Mangold gut akkumuliert. Derzeit laufen in Bayern auch Untersuchungen zur Ermittlung von immissionsbedingten Einträgen von Pflanzenschutzmitteln in Mangoldpflanzen.

Das ebenfalls neu entwickelte Verfahren des **Löwenzahnscreenings** hat sich als ein probates Mittel für das anlagenbezogene Monitoring von organischen Schadstoffen erwiesen, um sehr kurzfristig verlässliche Erkenntnisse über die räumliche Verteilung und orientierend auch über die Höhe der Belastung von Nahrungspflanzen in einem Untersuchungsgebiet zu erhalten.

Die Probenahme ist ab Mitte März und bis November problemlos möglich und kurzfristig durchzuführen. In Ausnahmefällen könnten zwischen Dezember und Februar sogar die überwinterten Rosetten geerntet werden. Dies war in der Vergangenheit aber noch nicht erforderlich.

Trotz der in Kapitel 8.3 genannten Punkte zur eingeschränkten Vergleichbarkeit der beprobten Löwenzahnpflanzen hinsichtlich Genetik, Wuchsform und Expositionszeit, wurden in allen bisher durchgeführten Untersuchungsprogrammen plausible Ergebnisse erzielt. Die jeweils ermittelten Werte zeigten in Relation zur Windrichtung und zur Quelle entsprechende Gradienten.

Das LANUV NRW wird diese Methode auch weiterhin für das anlagenbezogene Monitoring von organischen Schadstoffen einsetzen und plant, die Methode in der Richtlinienreihe VDI 3957 einzubringen.



## 10 Literatur

- AGES 2017: Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) der Österreichischen Agentur für Ernährung und Lebensmittelsicherheit GmbH, Stand 01.04.2017; Quelle: [https://www.ages.at/download/0/0/dc128f14adaded4ea366e0ebbcf1103f1d9c4d8e/fileadmin/AGES2015/Themen/R%C3%BCckst%C3%A4nde\\_Kontaminanten\\_Dateien/AGES\\_Orientierungswerte1-4-17.pdf](https://www.ages.at/download/0/0/dc128f14adaded4ea366e0ebbcf1103f1d9c4d8e/fileadmin/AGES2015/Themen/R%C3%BCckst%C3%A4nde_Kontaminanten_Dateien/AGES_Orientierungswerte1-4-17.pdf)
- BAY. LFU 2017: Zeitreihen charakteristischer Elemente aus dem Bremsabrieb von Kraftfahrzeugen, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Quelle: [https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe\\_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/bremsabrieb\\_kfz.pdf](https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/bremsabrieb_kfz.pdf), 5.12.2018.
- BAY. LFU 2019: Abschlussbericht Biomonitoring persistenter Schadstoffe - Immissionsökologisches Monitoring persistenter organischer und anorganischer Schadstoffe im Hintergrund und bei quellspezifischer Belastung, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2019
- BINI, C., WAHSHA, M., FONTANA, S., MALECI, L. 2012: Effects of heavy metals on morphological characteristics on *Taraxacum officinale* Web growing on mine soils in NE Italy, Journal of Geochemical Exploration 123 (2012), 101–108
- BÖHME, F., WELSCH-PAUSCH, K., MCLACHLAN, M. S. 1999: Uptake of airborne semivolatile organic compounds in agricultural plants: Field measurements of interspecies variability, Environ. Sci. Technol. 1999, 33, 1805–1813
- BVL-Report 8.4: Stoffliste des Bundes und der Bundesländer Kategorie "Pflanzen und Pflanzenteile", Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), Berlin. 2014
- DIN EN ISO 20988: Luftbeschaffenheit – Leitlinien zur Schätzung der Messunsicherheit (ISO 20988: 2007), VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5, 2007
- EFSA Journal 2014: Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water, EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), EFSA Journal 2014;12(3):3595
- HOMBRECHER, K., KOSTKA-RICK, R., KRAPP, M., ÖHLINGER, R. 2018: Metallgehalte in Graskulturen in verschiedenen Regionen Deutschlands und Österreichs – Ermittlung von robusten Hintergrundwerten als Beurteilungsgrundlage (Teil 1: Methodik), Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 78, Nr. 4, S. 152–156, 2018
- HOMBRECHER, K., KOSTKA-RICK, R., KRAPP, M., ÖHLINGER, R. 2019: Metallgehalte in Graskulturen in verschiedenen Regionen Deutschlands und Österreichs – Ermittlung von robusten Hintergrundwerten als Beurteilungsgrundlage (Teil 2: Ergebnisse), Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 79, Nr. 4, S. 128–136, 2019
- HOMBRECHER, K., BOTH, R. 2021: Löwenzahnscreening als Methode zum anlagenbezogenen Umweltmonitoring, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft (in Vorbereitung)
- HOMBRECHER, K., QUASS, U., LEISNER, J., WICHERT, M. 2021: Significant release of unintentionally produced non-Aroclor polychlorinated biphenyl (PCB) congeners PCB 47, PCB 51 and PCB 68 from a silicone rubber production site in North Rhine-Westphalia, Germany, in Press: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131449>

- HOCK, B., ELSTNER, E.F. (Hrsg.) 1995: Schadwirkungen auf Pflanzen. Heidelberg: Spektrum 1995.
- KLECKEROVA, A., DOCEKALOVA, H. 2014: Dandelion Plants as a Biomonitor of Urban Area Contamination by Heavy Metals, *Int. J. Environ. Res.*, 8 (1), 2014, 157–164
- KLEES, M., HOMBRECHER, K., GLADTKE, D. 2017: Polychlorinated biphenyls in the surrounding of an e-waste recycling facility in North-Rhine Westphalia: Levels in plants and dusts, spatial distribution, homologue pattern and source identification using the combination of plants and wind direction data, *Science of the Total Environment* 603–604 (2017), 606–615
- KLUMPP, A., ANSEL, W., KLUMPP, G., BREUER, J., VERGNE, P., SANZ, M. J., RASMUSSEN, S., ROPOULSEN, H., RIBAS ARTOLA, A., PENUELAS, J., HE, S.; GARREC, J. P., CALATAYUD, V. 2009: Airborne trace element pollution in 11 European cities assessed by exposure of standardised ryegrass cultures, *Atmospheric Environment* 43, S. 329–339
- LANUV-Arbeitsblatt 22 2014: Weitere Sachverhaltsermittlung bei Überschreitung von Prüfwerten nach der BBodSchV für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Recklinghausen, 2014
- LANUV-Arbeitsblatt 31 2015: Probenahme von Nahrungspflanzen zur Prüfung, ob selbst angebautes Gemüse nach immissionsbedingten Einträgen verzehrt werden darf, Recklinghausen 2015
- LANUV-Fachbericht 61 2015: Immissionsbedingte Hintergrundbelastung von Pflanzen in NRW – Schwermetalle und organische Verbindungen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Recklinghausen 2015
- LIGOCKI, M., TARASEWICZ, Z., ZYGMUNT, A., MIECZYSLAW, A. 2011: The common dandelion (*Taraxacum officinale*) as an indicator of anthropogenic toxic metal pollution of environment, *Acta Sci. Pol., Zootechnica* 10 (4) 2011, 73–82
- LIS, B., OLAS, B. 2019: Pro-health activity of dandelion (*Taraxacum officinale* L.) and its food products – history and present, *Journal of Funczional Foods* 59 (2019), S. 40–48
- LISIAK-ZIELINSKA, M, BOROWIAK, K., BUDKA, A., KANCLERZ, J., JANICKA, E., KACZOR, A., ZYROMSKI, A., BINIAK-PIEROG, M., PODAWCA, K., MLECZEK, M., NIEDZIELSKI, P. 2021: How polluted are cities in central Europe? – Heavy metal contamination in *Taraxacum officinale* and soils collected from different land use areas of three representative cities, *Chemosphere* 266 (2021) 129113
- MALAWSKA, M., WILKOMIRSKI, B. 2000: An Analysis of soil and plant (*Taraxacum officinale*) contamination with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the area of the railway junction Ilawa Glowna, Poland, *Water, Air, and Soil Pollution* 127: 339–349, 2001
- MALAWSKA, M., WILKOMIRSKI, B. 2001: Accumulation rate of polychlorinated biphenyls (PCBs) in dandelion (*Taraxacum officinale*) in the conditions of soil contamination with oil derivatives, *ROCZN. PZH*, 2001, 52, NR 4

- MAYR, R. 1987: Immissionserhebungen mit Hilfe landwirtschaftlicher Nutzpflanzen im Stadtgebiet von Linz im Jahre 1986, Naturk. Jb. Stadt Linz 31/32, 1987, S. 121–148
- MEZGER, U. 1995: Biomonitoring mit standardisierten Graskulturen in Berlin (Deutschland) und Umland, *Limnologica* 25 (3/4), S. 353–364, 1995
- NADGORSKA-SOCHA, A., KANDZIORA-CIUPA, M., TRZESICKI, M., BARCZYK, G. 2017: Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes, *Chemosphere* 183 (2017) 471–482
- RADERMACHER, L., ALTENBECK, P., KRAFT, M., DELSCHEN, T., HIESTER, E. 2011: Ermittlung von PCB-Quellen im Dortmunder Hafen mittels Exposition von pflanzlichen Bioindikatoren, *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 71 (2011), Nr. 4, S. 159–164
- UBA 2018: Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Schwermetalle) 1990–2016, Umweltbundesamt <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>, 05.12.2018
- 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, Nr. 5, S. 276–280
- WÄBER, M., AUST, S., JOHANNSEN, K., POMPE, F., HEIMBERG, J. 2015: Biomonitoring mit Grünkohl und Graskultur im Umfeld des zukünftigen Flughafens Berlin Brandenburg, *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 75 (2015), Nr. 4, S. 137–142
- VDI 3857 Blatt 2: Beurteilungswerte für immissionsbedingte Stoffanreicherungen in standardisierten Graskulturen – Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte ausgewählter anorganischer Luftverunreinigungen. Berlin: Beuth-Verlag 2021 (Gründruck)
- VDI 3957 Blatt 2: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Verfahren der standardisierten Graskultur. Berlin: Beuth 2016. 2016
- VDI 3957 Blatt 3: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl. Berlin: Beuth-Verlag (in Überarbeitung)
- VDI 3957 Blatt 4: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl, Bewertung von Schadstoffgehalten in Nahrungspflanzen für den menschlichen Verzehr. Berlin: Beuth-Verlag in Vorb.
- VDI 3957 Blatt 11: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Einsatz von passiven Biomonitoringverfahren mit Blattorganen von frei stehenden Gehölzen. Berlin: Beuth-Verlag 2019
- VDI 3957 Blatt 15: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Untersuchungsstrategie nach Schadensereignissen (Passives Biomonitoring) Berlin: Beuth-Verlag 2014

---

Landesamt für Natur, Umwelt und  
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10  
45659 Recklinghausen  
Telefon 02361 305-0  
poststelle@lanuv.nrw.de

[www.lanuv.nrw.de](http://www.lanuv.nrw.de)