

# Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2022

mit Einordnung der Wirkungssituation 2017–2022  
und zusammenfassender Datendokumentation 2022



**Auftraggeber**

Flughafen München GmbH  
Postfach 23 17 55  
85326 München

Auftragsnummer Z377200-21

**Bearbeitung**

Dr. Monica Wäber  
Dipl.-Ing. Univ. (TUM) Frank Pompe

UMW Umweltmonitoring  
Wallbergstr. 13  
82054 Sauerlach  
Telefon +49 8104 2541 406  
Email [waeber@umweltmonitoring.com](mailto:waeber@umweltmonitoring.com)  
Internet [www.umweltmonitoring.com](http://www.umweltmonitoring.com)  
Ust-Id.Nr.: DE1831168827

**Stand**

20.02.2023

**Karten- und Bildnachweis:**

Messpunkt-Übersichtskarte und -Kartenausschnitte:  
Flughafen München GmbH,  
Grundlage: Geobasisdaten – Bundesamt für Kartografie und Geodäsie 2020 und  
Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung 2018

Fotos:  
Stefan Kaun und  
Bernhard Huber für Flughafen München GmbH  
Monica Wäber, Frank Pompe für UMW Umweltmonitoring  
Hinweis: Die Bilder dürfen nicht anderweitig verwendet werden.

**Titelseite: Biomonitoring-Messpunkt mit Informationstafel am Flughafen München Graskultur –  
Grünkohl – Graskultur – im Jahr 2022**

Bilder im Uhrzeigersinn von oben

## Kurzzusammenfassung

Das Bundes-Immissionsschutzgesetzes hat zum Ziel „Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“ (§1 BImSchG). Mit Biomonitoring können Immissionswirkungen unmittelbar erfasst werden.

Seit 2006 wird am Flughafen München und in seiner Umgebung die Luftqualität durch ein Biomonitoring überwacht. Standardisierte Graskulturen und Grünkohlexponate sammeln und reichern vor Ort Luftverunreinigungen an. Der Zuwachs wird geerntet und im Labor spurenanalytisch auf Metalle sowie auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) untersucht. Diese Stoffe können sich in der Nahrungskette anreichern und in höherer Dosis auf die Gesundheit des Menschen schädlich wirken. Das Messnetz war im Jahr 2022 um drei der seit 2020 verbliebenen acht Messpunkte reduziert worden. Im Jahr 2023 wird das Biomonitoring wieder an den acht repräsentativen Messpunkten durchgeführt werden.

Die Stoffgehalte in den Graskulturen werden mit Beurteilungswerten aus dem europäischen Futtermittelrecht und aus VDI-Richtlinien verglichen. Diese liefern Hinweise auf etwaige Beeinträchtigungen hinsichtlich landwirtschaftlicher Futter- und Nahrungsmittelproduktion. Die Grünkohlexponate können als Stellvertreter für Blattgemüse-Lebensmittel betrachtet werden und die festgestellten Stoffgehalte in Bezug zu Lebensmittel-Höchstgehalten gesetzt werden. So kann eine Gefährdung des Menschen durch den Verzehr abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Jahre 2017–2022 unterschritten allesamt diese Beurteilungswerte für landwirtschaftliche Futtermittel und für Blattkohl-Lebensmittel. Erhebliche Belastungen im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung und die Nahrungsmittelproduktion im Sinne des Verbraucherschutzes sind daraus für die Umgebung des Flughafens nicht abzuleiten. Die untersuchten Stoffe wiesen 2022 wie in den Vorjahren nur geringe Gehalte in den Bioindikatoren auf bzw. waren trotz empfindlicher Analysenverfahren in Einzelfällen unter der Bestimmungsgrenze.

Anhand Orientierungswerten für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) wurde beurteilt, ob in der Flughafenregion Immissionseinflüsse feststellbar waren und welcher Art. Für die meisten der untersuchten Metalle wurden im Untersuchungsgebiet keine oder allenfalls schwache Immissionseinflüsse festgestellt. Bei Grünkohl wurden für Antimon Immissionseinflüsse an den betriebsnahen Messpunkten MEF und MWF deutlich. Für PAK wurden nur schwache Immissionseinflüsse festgestellt: an MEF – mit Graskulturen – sowie saisonal durch Hausbrand am Messpunkt BIS innerorts – mit Grünkohl.

Anhand Messpunktabstufungen und der Lage der Messpunkte zueinander und zu potenziellen Emissionsquellen konnten anhand der Ergebnisse der Vorjahre von noch acht Messpunkten die Immissionswirkungen Quellen zugeordnet werden: Abrieb- und Verbrennungsprozesse als direkten Quellen für Antimon und PAK, versiegelte Oberflächen als indirekten Quellen für Bismut, Blei und Vanadium. Die räumliche Ausdehnung reicht nur in den Nahbereich, an die Messpunkte MEF am Ostende der nördlichen Start- und Landebahn und MWF am Westende der Südbahn. Die saisonalen Immissionswirkungen der PAK durch Hausbrand traten nur innerorts am Messpunkt BIS hervor. Die Messungen im Jahr 2022 führten an den nur fünf Messpunkten das Biomonitoring fort, reichen aber für differenzierte Aussagen nicht aus.

Die PAK-Immissionswirkungen am Messpunkt BIS deuteten eine abnehmende Entwicklung 2017–2021 an, die 2022 nicht bestätigt wurde. Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde – mit niedrigeren Werten 2020 und 2021 gegenüber den Vorjahren und Wiederanstieg im Jahr 2022 auf rund 70 % des Niveaus der Vor-Coronajahre – wurde nicht deutlich. Die in den Bioindikatoren untersuchten Stoffgehalte waren unauffällig niedrig.

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Kurzzusammenfassung.....  | 3  |
| Inhaltsverzeichnis .....  | 4  |
| Danksagung .....  | 6  |
| 1 Einführung.....   | 7  |
| 1.1 Zielsetzung .....   | 7  |
| 1.2 Luftverunreinigungen, Immissionswirkungen und Biomonitoring ..... | 7  |
| 1.3 Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München .....        | 9  |
| 2 Untersuchungskonzept und -methoden.....                             | 11 |
| 2.1 Untersuchungsgebiet und Messpunkte .....                          | 11 |
| 2.2 Untersuchte Stoffe .....  | 13 |
| 2.3 Standardisierte Graskultur .....                                  | 15 |
| 2.4 Grünkohlexposition .....  | 15 |
| 2.5 Analysen .....  | 17 |
| 2.6 Maßgaben zur Auswertung und Beurteilung .....                     | 18 |
| 2.7 Kenngrößen, Messunsicherheit, Umgang mit den Messwerten .....     | 23 |
| 3 Ergebnisse des Biomonitorings 2017–2022 .....                       | 26 |
| 3.1 Aluminium in Graskultur und Grünkohl.....                         | 26 |
| 3.2 Antimon in Graskultur und Grünkohl .....                          | 30 |
| 3.3 Bismut in Graskultur und Grünkohl.....                            | 33 |
| 3.4 Blei in Graskultur und Grünkohl.....                              | 36 |
| 3.5 Chrom in Graskultur und Grünkohl.....                             | 40 |
| 3.6 Eisen in Graskultur und Grünkohl .....                            | 44 |
| 3.7 Kupfer in Grünkohl.....   | 47 |
| 3.8 Molybdän in Graskultur und Grünkohl .....                         | 50 |
| 3.9 Nickel in Graskultur .....  | 53 |
| 3.10 Vanadium in Graskultur und Grünkohl .....                        | 56 |
| 3.11 PAK in Graskultur und Grünkohl .....                             | 60 |
| 4 Messergebnisse 2022.....  | 69 |
| 4.1 Aluminium 2022 .....  | 70 |
| 4.2 Antimon 2022.....   | 71 |
| 4.3 Bismut 2022.....  | 72 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.4  | Blei 2022 .....   | 73  |
| 4.5  | Chrom 2022 .....  | 74  |
| 4.6  | Eisen 2022 .....  | 75  |
| 4.7  | Kupfer 2022 .....   | 76  |
| 4.8  | Molybdän 2022 .....   | 77  |
| 4.9  | Nickel 2022 .....   | 78  |
| 4.10 | Vanadium 2022 .....   | 79  |
| 4.11 | Benzo[a]pyren 2022 .....  | 80  |
| 4.12 | PAK4 2022 .....   | 81  |
| 4.13 | Summe 16 PAK (EPA) 2022 .....   | 82  |
| 5    | Zusammenfassende Bewertung .....                                      | 83  |
| 6    | Abkürzungen .....   | 87  |
| 7    | Glossar .....   | 89  |
| 8    | Literatur .....   | 92  |
| 8.1  | Gesetze und Verordnungen .....  | 92  |
| 8.2  | Normen und Richtlinien .....  | 93  |
| 8.3  | Literaturquellen .....  | 94  |
| 8.4  | Quellen im Internet .....   | 95  |
|      | Abbildungsverzeichnis .....   | 97  |
|      | Tabellenverzeichnis .....   | 98  |
| 9    | Anhang .....  | 99  |
| 9.1  | Witterungseinflüsse 2022 .....  | 100 |
| 9.2  | Messnetz Biomonitoring und Deposition – Messpunktbeschreibungen ..... | 103 |
| 9.3  | Metalle in Graskultur 2022 .....                                      | 111 |
| 9.4  | Metalle in Grünkohl 2022 .....  | 112 |
| 9.5  | PAK in Graskultur (16 PAK nach EPA) 2022 .....                        | 113 |
| 9.6  | PAK in Grünkohl (16 PAK nach EPA) 2022 .....                          | 115 |

## Danksagung

Unser herzlicher Dank geht an:

- das Bayerische Landesamt für Umwelt für die fachliche Diskussion und die Bereitstellung von Vergleichswerten,
- die Bürger in den umliegenden Gemeinden für den Schutz der an den Messpunkten im Umland aufgestellten Biomonitoringpflanzen
- unsere Partnerlabore Eurofins Food Testing Süd GmbH Tübingen und Eurofins Ökometric GmbH Bayreuth (vormals firmierend als Berghof Analytik + Umweltengineering GmbH Tübingen und ÖKOMETRIC GmbH – Bayreuther Institut für Umweltforschung,
- die Flughafen München GmbH (FMG) für die Bereitstellung von Messpunkt-Karten, Windrosen und Fotos.

# 1 Einführung

## 1.1 Zielsetzung

Durch den **Betrieb eines Flughafens** werden zwangsläufig Luftverunreinigungen an die Umwelt abgegeben. Der Flughafen München ist einer der wichtigsten Verkehrsknotenpunkte in Europa. Seit 1991 erfassen dort technische Analysegeräte kontinuierlich die Konzentrationen von Stoffen in der Luft. Aktuell messen zwei stationäre Messstellen – eine im Westen und eine im Osten des Flughafengeländes – die Luftgüte, sowie eine mobile Luftgütemessstation mit wechselndem Einsatz in den Umlandkommunen: im Internet <https://www.munich-airport.de/luftguetemessung-4838888>.

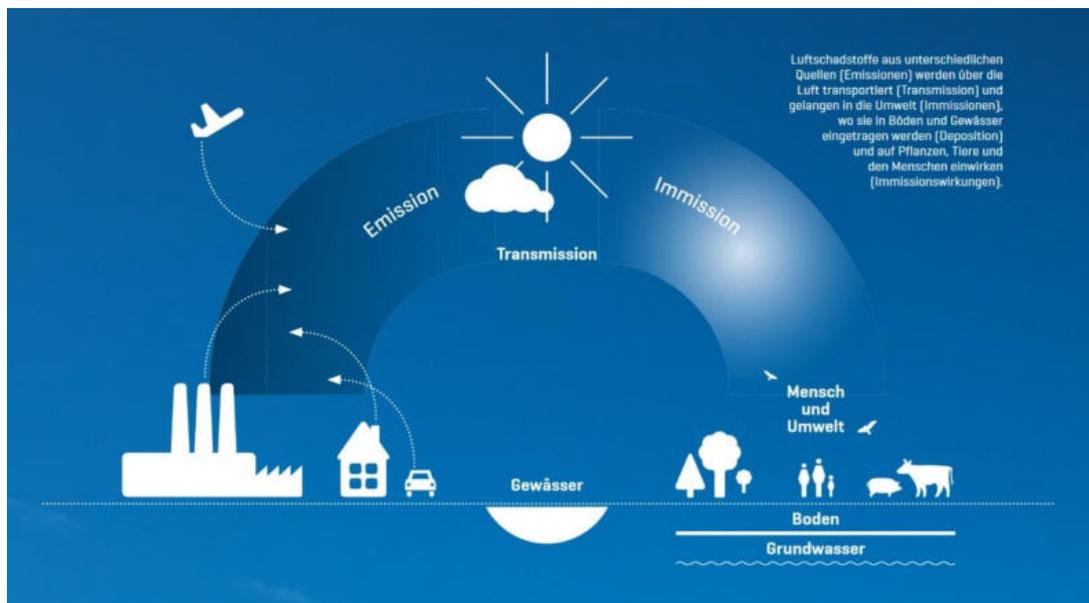
Um **Auswirkungen der Luftverunreinigungen** auf die Umweltqualität zu überwachen wird seit 2006 am Flughafen München und in seiner Umgebung **Biomonitoring** durchgeführt, bis 2020 ergänzt durch Depositionsuntersuchungen. Die Wirkungsermittlung und -beurteilung orientieren sich am aktuellen Stand bestehender Gesetze, Verordnungen und Richtlinien, insbesondere an Richtlinie VDI 3957 Blatt 10 mit deren zentralen Fragestellungen:

- Sind in der Umgebung des Flughafens Immissionsinflüsse feststellbar?
- Können Immissionswirkungen vorhandenen Emissionsquellen zugeordnet werden?
- Wie ist die zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation?
- Wie hoch ist die Wirkungssituation und wie ist sie zu bewerten?
- Sind Gefährdungen von Menschen oder Tieren über die Nahrungskette zu erwarten?

## 1.2 Luftverunreinigungen, Immissionswirkungen und Biomonitoring

**Luftverunreinigungen** werden aus vielen Quellen emittiert: Energieerzeugung, Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Haushalte, Straßen-, Schienen-, und Flugverkehr u.v.a.m.. Durch den Betrieb des Flughafens werden *Emissionen* durch Flugzeuge, aber auch durch Bodenverkehr und Energieerzeugung auf dem Flughafengelände, sowie durch Zubringerverkehr und Logistiktransporte im Umland freigesetzt. Die emittierten Stoffe werden über die Luft verfrachtet, verdünnt, durchmischt und teilweise umgewandelt. Diese Vorgänge werden als *Transmission* bezeichnet. An der Luftgüte in der Umgebung des Flughafens haben noch viele weitere Quellen Anteil (Bild 1-1): die regionalen Industrie- und Landwirtschaftsbetriebe, der gesamte Verkehr ringsum und die Heizungsanlagen der Haushalte sowie der Ferntransport von Luftverunreinigungen. Die Luftverunreinigungen an ihrem Wirkort, z. B. in der Umgebungsluft von Menschen, Tieren und Pflanzen bezeichnet man als *Immission*. Die Luftverunreinigungen sinken partikelförmig allmählich als *Deposition* zu Boden oder verbleiben aufgrund geringer Größe und Gewicht als Gas oder Schwebstaub in der Luft. Stoffdepositionen können durch Luftbewegungen wieder aufgewirbelt und weiter transportiert werden.

**Immissionswirkungen** – dieser Begriff beschreibt, wie Immissionen sich in Pflanzen und Tieren anreichern und wie sie sich auf Organismen auswirken. Organismen, beispielsweise Pflanzen können die Stoffdepositionen und Schwebeteilchen aufnehmen und anreichern. Auf diese Weise gelangen die Stoffe in die Nahrungskette. Von Menschen oder Tieren in zu hohen Dosen aufgenommen, können einige dieser Stoffe schädliche Wirkungen hervorrufen.



**Bild 1.2-1: Schadstoffe gelangen über die Luft in die Umwelt**

[Grafik: Flughafen München, abgewandelt nach © Grafik Monica Wäber]

**Biomonitoring** ist der Einsatz biologischer Systeme, um luftgetragene *Immissionswirkungen* im Sinne des Immissionsschutzes unmittelbar zu erfassen (VDI 3957/1). Die *Bioindikatoren* sammeln und reichern die Luftverunreinigungen an (Akkumulation), oder reagieren spezifisch darauf. So können die Wirkungen von Immissionen auf Vegetation und Anreicherungen in der Nahrungskette ermittelt werden (VDI 3957/1).

Beim aktiven Biomonitoring werden Bioindikatoren für einen bestimmten Zeitraum den Immissionswirkungen gezielt ausgesetzt und danach untersucht. Zumeist kommen Weidelgras (als *Standardisierte Graskultur* nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 2) als Futtermittelvertreter und Grünkohl (als *Standardisierte Exposition von Grünkohl* nach Richtlinie VDI 3957 Blatt 3) als Vertreter von Gemüselebensmitteln zum Einsatz (Wäber 2016). Neben schwer abbaubaren (persistenten) Stoffen, die partikelförmig abgelagert werden, erfassen sie auch gasförmige Stoffe und Schwebstaub: z. B. Metalle sowie organische Schadstoffe wie die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Die während der Exposition akkumulierten Stoffe können der aktuellen Luftgütesituation zugeordnet werden.

Biomonitoringverfahren sind seit Jahrzehnten etabliert und in Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) und europäischen Normen festgelegt (VDI 2016). Sie liefern vergleichbar reproduzierbare und zuverlässige Ergebnisse wie technische Immissionsmessungen und bieten zahlreiche Vorteile, z. B.:

- Viele Luftverunreinigungen können, auch im Zusammenwirken, gleichzeitig erfasst werden.
- Messpunkte können beim aktiven Biomonitoring unabhängig von der Infrastruktur so gewählt werden, dass Einwirkungsbereiche von Emittenten abgegrenzt werden können.
- Biomonitoring gibt anschauliche und begreifbare Antworten auf die Fragen, ob Immissionswirkungen feststellbar sind, wie hoch sie sind und ob man unter den möglichen Quellen den oder die Verursacher identifizieren kann (Kapitel 1.1).

### 1.3 Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München

**Im Jahr 2006** begann die Flughafen München GmbH (FMG) auf freiwilliger Basis in der Umgebung des Flughafens München ein Biomonitoring einzurichten. In den Folgejahren wurden diese Untersuchungen zum langfristigsten und umfangreichsten Biomonitoring-Messnetz aller europäischen Flughäfen ausgebaut (Wäber und Pompe 2018). Im Zuge des Planfeststellungsverfahrens zur dritten Start- und Landebahn im Jahr 2010 wurden die Untersuchungen Bestandteil des Beweissicherungsverfahrens Landwirtschaft (BSL). Sie wurden seitdem in Abstimmung mit den Behörden kontinuierlich und werden aktuell freiwillig fortgeführt.

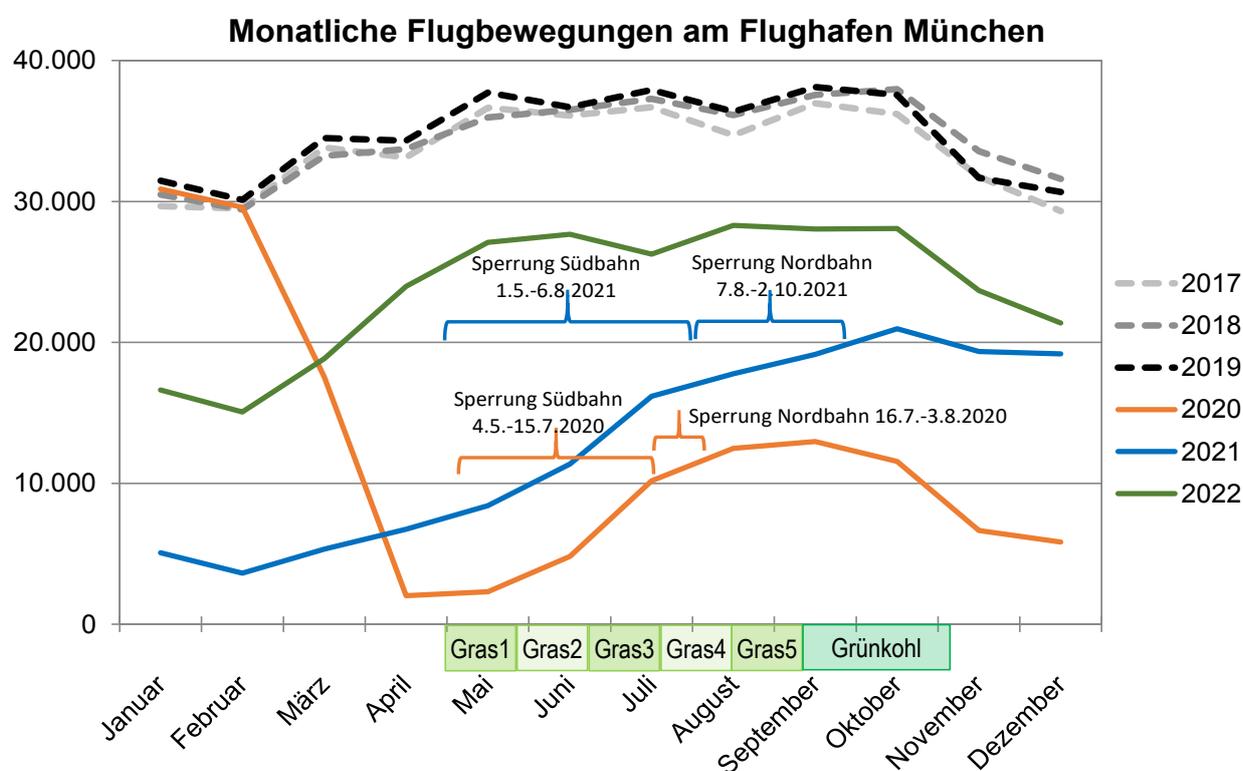
**Die Messpunkte** liegen im landwirtschaftlich genutzten Bereich, verkehrs- und siedlungsnah, oder quellenfern. Bis 2017 umfasste das Messnetz 14 Messpunkte: zehn Messpunkte im direkten Flughafenumfeld, zwei südlich gelegene Referenzmesspunkte und zwei Messpunkte im Vergleichsgebiet Aichach ohne Flughafen. Im Jahr 2018 wurden die zwei Messpunkte im Vergleichsgebiet Aichach aufgelassen. Aufgrund des Moratoriums zur 3. Bahn und der damit verbundenen, vorläufigen Einstellung der Planungsarbeiten, entfällt die Grundlage für Biomonitoring-Untersuchungen (Moratorium 2018). Dennoch wird das Biomonitoring in reduziertem Umfang fortgeführt, um keine qualitativen Messlücken bis zu einer endgültigen Entscheidung zur 3. Bahn entstehen zu lassen. Dafür wurde das Messnetz 2019 um drei der zehn Messpunkte im direkten Flughafenumfeld und um einen der beiden Referenzmesspunkte reduziert. Die Zwischenlösung mit den verbleibenden acht repräsentativen Messpunkten ist den aktuellen Anforderungen der Richtlinie VDI 3957 Blatt 10 (2022) „Emittentenbezogener Einsatz pflanzlicher Bioindikatoren“ angenähert. Im Berichtsjahr 2022 wurde das Messnetz nochmals um drei der verbliebenen acht Messpunkte reduziert. Dies war ein einmaliger Schritt, denn im darauffolgenden Jahr 2023 wird das freiwillige kontinuierliche Biomonitoring wieder an den acht repräsentativen Messpunkten von 2021 durchgeführt werden.

**Als anerkannte Biomonitoring-Verfahren** werden in der Umgebung des Flughafens München die *Standardisierte Graskultur* (VDI 3957/2) und die *Standardisierte Exposition von Grünkohl* (VDI 3957/3) eingesetzt. Graskulturen werden in fünf Expositionsabschnitten von Mai bis September jeweils 4wöchig aufgestellt und anschließend auf die Anreicherungen von ausgewählten Metallen und PAK analysiert. Grünkohl wird im Anschluss daran 8wöchig exponiert. Das Biomonitoring wurde 2006 bis 2020 durch Depositionsuntersuchungen ergänzt. Untersuchungskonzept und -methoden 2022 sind nachfolgend in Kapitel 2 dargestellt. Seit dem Jahr 2021 werden die begleitenden Depositionsuntersuchungen nicht mehr durchgeführt, dafür wird Grünkohl wieder auf Metalle analysiert (2020 pausiert).

**Die Messergebnisse** aus dem Biomonitoring wurden zusammen mit einer Gefährdungsbeurteilung 2006 bis 2020 als jährliche „Zusammenfassende Dokumentationen“ der Öffentlichkeit auf der Website des Münchner Airports unter <https://www.munich-airport.de/biomonitoring-88353> zugänglich gemacht. 2019 veröffentlichte der Flughafen München mit der Broschüre „Biomonitoring“ eine Zusammenschau der Messergebnisse und Gefährdungsabschätzungen aus den Jahren 2006 bis 2017. Der hier vorgelegte Bericht Teil 1 *Einordnung der Wirkungssituation* stellt, wie der Vorjahresbericht, die Ergebnisse des Biomonitorings 2022 dar und bettet sie in den Rahmen der Untersuchungen seit 2017 ein. Dabei erfolgt eine über die Gefährdungsbeurteilung hinausgehende Auswertung (Kapitel 3), um die eingangs gestellten Fragen hinsichtlich Immissionseinflüssen und deren Ursachen und Einordnung soweit möglich zu beantworten. Im Kapitel 4 finden sich die *Messergebnisse 2022* in der gewohnten Darstellung einer *Zusammenfassende Dokumentation* (grafisch, sowie im Anhang Kap. 9.3 ff. tabellarisch). Darin werden sie zum einen anhand von Beurteilungswerten bewertet (Kapitel 2.6: V), die auf die Gefahrenabwehr abzielen, wie

Höchstgehalte für Futtermittel und Lebensmittel. Zum anderen werden sie anhand Orientierungswerten für den maximalen Hintergrundgehalt bewertet, um Immissionseinflüsse – weit unterhalb Beurteilungswerten für die Gefahrenabwehr – zu identifizieren.

Als **Auswirkung der Coronapandemie** war das Verkehrsaufkommen aller Verkehrsträger ab dem Frühjahr 2020 zurückgegangen. Das Flugverkehrsaufkommen am Flughafen München verzeichnete einen besonders drastischen Rückgang um rund 90 % in den Monaten April bis Juni und um rund 70 % von Juli bis Oktober 2020 gegenüber dem Vergleichszeitraum 2019 [FMG Verkehrsbericht 2020]. Im Jahr 2021 war das Flugverkehrsaufkommen in den Monaten April und Mai immer noch rund 80 % geringer als 2019 und stieg bis Oktober 2021 an – auf ein Niveau von rund 40% des Vergleichszeitraums 2019 (FMG Verkehrsbericht 2021). Im Jahr 2022 war dann das Flugverkehrsaufkommen auf rund 70 % des Niveaus der Vor-Coronajahre 2018 und 2019 zurückgekehrt (Flugbewegungen in Bild 1.3-1).



**Bild 1.3-1: Flugbewegungen 2020 bis 2022 im Vergleich zu den Vorjahren**

Biomonitoring-Expositionsabschnitte von Graskultur und Grünkohl: grün unterlegt; die Sperrungen erfolgten für (in 2021 massive) Sanierungsarbeiten der Start- und Landebahnen

Die Start- und Landebahn (SLB) Süd des Münchner Airports war vom 4. Mai bis 15. Juli 2020 gesperrt und die SLB Nord vom 16. Juli bis 3. August 2020. In diesen Zeiträumen wurden an den Pisten Sanierungsarbeiten im eher kleinen Rahmen durchgeführt. Im Jahr 2021 war die SLB Süd vom 1. Mai bis 6. August gesperrt und die SLB Nord vom 7. August bis 2. Oktober. Die Sanierungen in 2021 waren massiv: Die SLB wurden mit Asphaltfräsen geöffnet und Teilstücke erneuert, der Abtransport des Abraums erfolgte mit LKW, teilweise, insbesondere auf der Südbahn, verbunden mit erheblichen Staubfahnen (Mitteilungen Dr. Liebmann, FMG). Im Jahr 2022 fanden keine größeren Sanierungsarbeiten statt.

## 2 Untersuchungskonzept und -methoden

Das Biomonitoring wurde so angelegt, dass es die Anforderungen der maßgeblichen Richtlinie zum emittentenbezogenen Biomonitoring (VDI 3957/10) erfüllt und der Fragestellung entspricht (vgl. Kapitel 1.1):

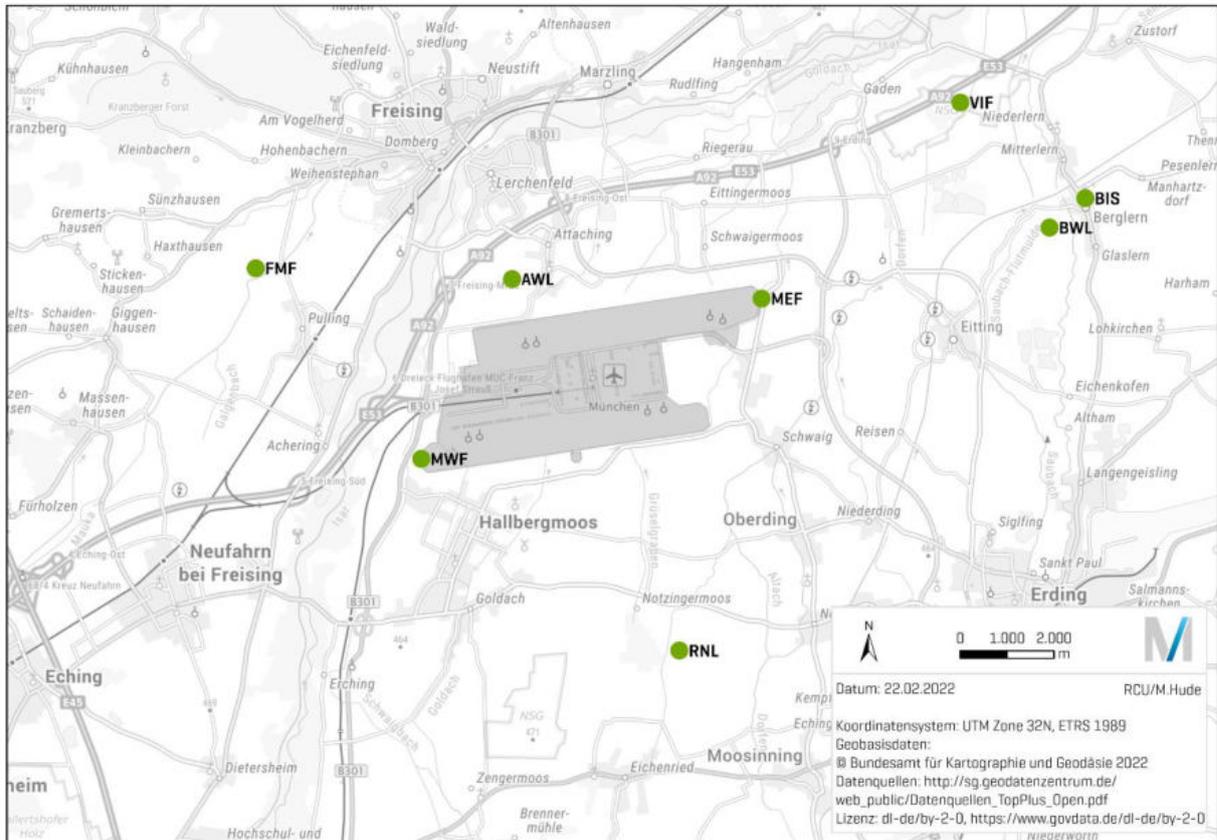
- Die Messpunkte im Untersuchungsgebiet bilden die lufthygienische Situation in der Umgebung möglichst repräsentativ ab – im Siedlungsbereich der Anwohner, im landwirtschaftlich genutzten Bereich, im Bereich von Landschaftsschutzmaßnahmen, mit unterschiedlichem Abstand zum Flughafen München (Kapitel 2.1).
- Das Spektrum der untersuchten Stoffe enthält solche, die für die Emissionsquelle Flughafenbetrieb charakteristisch sind und aufgrund ihrer Persistenz in der Umwelt und der Nahrungskette angereichert werden können. Beurteilungswerte in Hinblick auf die Landnutzung und die menschliche Gesundheit sind für einen Teil dieser Stoffe festgelegt (Kapitel 2.2).
- Mit den aktiven Biomonitoring-Verfahren Graskultur (VDI 3957/2; Kapitel 2.3) und Grünkohl (VDI 3957/3; Kapitel 2.4) als Futtermittelvertreter und als Lebensmittelvertreter kann über die gemessene Akkumulation der Bezug zu den Schutzgütern Tier und Mensch hergestellt werden. Weitere Vorteile des Verfahrens sind einleitend ausgeführt (Kapitel 1.3).
- Die Auswertung und Beurteilung des Biomonitorings 2022 richtet sich nach den aktuellen Maßgaben (VDI 3957/10, 2023). Es berücksichtigt die Entwicklung der letzten sechs Jahre, in der das Programm durch die Nachgenannten einheitlich und nach dem neusten Stand ausgeführt wurde (mit Ausnahme der Reduktion der Messpunkte von acht auf fünf für das Jahr 2022).

Das Programm wurde von Dr. Monica Wäber – UMW Umweltmonitoring in Sauerlach beraten und durchgeführt. Die Partnerlabore von UMW, Eurofins Food Testing Süd GmbH Tübingen (vormals firmierend als Berghof Analytik + Umweltengineering GmbH) und Eurofins Ökometric GmbH Bayreuth (vormals firmierend als ÖKOMETRIC GmbH – Bayreuther Institut für Umweltforschung), führten die Metall- und PAK-Analysen durch.

### 2.1 Untersuchungsgebiet und Messpunkte

**Das Untersuchungsgebiet** in der Flughafenregion ist vom Freisinger Moos und Pulling über Attaching bis Berglern und vom Notzingermoos über Hallbergmoos bis Gaden und Viehlaßmoos ausgedehnt (FMG Broschüre Biomonitoring 2019).

**Die Immissionseinflüsse im Untersuchungsgebiet** können von Flughafenbetrieb, Straßenverkehr, landwirtschaftlichen Aktivitäten, Siedlungen mit Verkehr und häuslichen Feuerungsanlagen (auch: Hausbrand) sowie weiteren Quellen ausgehen. Sie können kontinuierlich (Verkehr), temporär (landwirtschaftliche Aktivitäten) und saisonal (Hausbrand) sein. Die Immissionssituation wird von der Witterung beeinflusst, vor allem von Windrichtung und -geschwindigkeit sowie von Niederschlägen.



**Bild 2.1-1: Lage der Messpunkte am Flughafen München und in seiner Umgebung**

bis 2021 acht Biomonitoring-Messpunkte (grüne Symbole), im Jahr 2022 verblieben FMF, MWF, AWL; MEF, BIS [Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 2022]

**Das Messnetz** umfasste im direkten Flughafenumfeld 2020 und 2021, aber anders als in den Vorjahren, sieben Messpunkte und einen südlich gelegenen Messpunkt RNL (Bild 2.1-1): RNL wurde ursprünglich als Referenzmesspunkt für die Hintergrundbelastung (VDI 3957/10, Stand 2004), im Notzingermoos abseits von Flughafeneinfluss, angelegt. Aktuell ermittelt man die Hintergrundbelastung anhand der Messpunkte im Untersuchungsgebiet, die für den jeweiligen Stoff niedrigste Stoffanreicherungen in den Bioindikatoren zeigen (VDI 3857/2, Stand 2021). Im Jahr 2022 – und nur für dieses Untersuchungsjahr – wurde das Messnetz um drei (RNL, VIF, BWL) der verbliebenen acht Messpunkte reduziert.

**Die Messpunkte** repräsentieren typische Standorte: Flughafenbetrieb an den Start- und Landebahnen (MWF, MEF), im Überflug (FMF, VIF), in landwirtschaftlich genutzten Gebieten (FMF, AWL, MEF, BWL, VIF, RNL), im Einflussbereich von Siedlungen mit Verkehr und häuslichen Feuerungsanlagen zu Heizzwecken (BIS). Ein Teil der Messpunkte befindet sich in oder nahe Landschaftsschutzgebieten (FMF, VIF, RNL; Tabelle 2.1-1). Im Anhang finden sich für jeden dieser Messpunkte Kennblätter mit Lagebeschreibung, Kartenausschnitt und Foto (Bild 9.2-1 ff.).

**Tabelle 2.1-1: Übersicht über die Messpunkte 2021 (in Grau) und 2022 (in Schwarz)**

| Messpunkt       | Lage des Messpunkts (MP)  | Beschreibung  |
|-----------------|---|---|
| FMF             | ca. 1 km nordwestlich von Pulling im Landschaftsschutzgebiet „Freisinger Moos“    | <ul style="list-style-type: none"> <li>landwirtschaftlich genutztes Umfeld, im Flugrouten-Bereich</li> </ul>          |
| MWF             | am Westende der südlichen Start- und Landebahn                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>im Flugrouten-Bereich</li> </ul>   |
| AWL             | ca. 500 m westlich von Attaching  | <ul style="list-style-type: none"> <li>landwirtschaftlich genutztes Umfeld</li> </ul>                                 |
| MEF             | am Ostende der nördlichen Start- und Landebahn                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>im Flugrouten-Bereich, landwirtschaftlich genutztes Umfeld</li> </ul>          |
| VIF             | 250 m südlich Bundesautobahn A 92 im Naturschutzgebiet Viehlaßmoos                | <ul style="list-style-type: none"> <li>landwirtschaftlich genutztes Umfeld, im Flugrouten-Bereich</li> </ul>          |
| BWL             | ca. 700 m westlich von Berglern   | <ul style="list-style-type: none"> <li>landwirtschaftlich genutztes Umfeld</li> </ul>                                 |
| BIS             | im Ortsgebiet von Berglern  | <ul style="list-style-type: none"> <li>im Siedlungsbereich,</li> <li>Kfz-Verkehr (innerorts, Stopp-and-go)</li> </ul> |
| RNL Referenz-MP | ca. 6 km südlich des Flughafens im Notzinger Moos zwischen Notzing und Eichenried | <ul style="list-style-type: none"> <li>landwirtschaftlich genutztes Umfeld</li> </ul>                                 |

## 2.2 Untersuchte Stoffe

Beim Biomonitoring von Graskultur und Grünkohl werden aktuell jeweils 9 von 10 ausgewählten Metallen sowie 16 polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) untersucht (Tabelle 2.2-1).

**Die Metalle** gelangen aus vielen Quellen in die Umwelt, z. B. aus Quellen im Verkehr (Reifen- und Bremsabrieb, Abgasanlagen etc.), Staubverwehungen von versiegelten Flächen oder landwirtschaftlichen Aktivitäten, industriellen Prozessen. Für die ausgewählten 10 Metalle können Verkehr und Flughafenbetrieb direkte Quellen sein:

- Bremsabrieb als Quelle von Aluminium (Al), Bismut (Bi), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Blei (Pb), Antimon (Sb);
- Reifenabrieb als Quelle von Aluminium und Eisen;
- Straßenbelag als Quelle von Aluminium und Eisen;
- Abgase als Quelle von Aluminium, Chrom, Kupfer, Eisen, Molybdän (Mo), Nickel (Ni), Blei und Vanadium (V) (BayLfU 2019).

Einige der untersuchten Metalle sind als Spurenelemente lebensnotwendig, z. B. Eisen. Andere sind einerseits lebensnotwendig, z. B. Kupfer, können aber in höheren Konzentrationen ökotoxisch (umweltgiftig) und gesundheitsschädlich wirken. Für Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Vanadium sind aufgrund ihrer umweltschädlichen Wirkungen Richtwerte und gesetzliche Grenzwerte festgesetzt (TA Luft, Verordnung (EG) Nr. 1881/2006).

In Graskultur wurde von den 10 oben genannten Metallen nicht Kupfer untersucht, da erfahrungsgemäß Anreicherungseffekte über die Wurzel aus dem Substrat auftreten können (VDI 3957/2, 2020). In Grünkohl wurde von den 10 Metallen nicht Nickel untersucht, weil Grünkohl Nickel in erhöhtem Maß aus dem Substrat aufnehmen kann, was die Eignung Nickel-Immissionen zu erfassen einschränkt (VDI 3957/3, 2023).

**Tabelle 2.2-1: Übersicht Stoffspektrum beim Biomonitoring 2022**

| <b>Biomonitoring mit Graskultur und Grünkohl 2021</b>  |  |
|--|--|
| <p><b>10 Metalle:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminium</li> <li>• Antimon</li> <li>• Bismut</li> <li>• Blei</li> <li>• Chrom</li> <li>• Eisen</li> <li>• Kupfer (nicht in Graskultur)</li> <li>• Molybdän</li> <li>• Nickel (nicht in Grünkohl)</li> <li>• Vanadium</li> </ul> | <p><b>16 PAK (EPA):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Naphthalin (NAP)</i></li> <li>• <i>Acenaphtylen (ACY)</i></li> <li>• <i>Acenaphthen (ACE)</i></li> <li>• <i>Fluoren (FLE)</i></li> <li>• <i>Phenanthren (PHE)</i></li> <li>• <i>Anthracen (ANT)</i></li> <li>• <i>Pyren (PYR)</i></li> <li>• <u>Benzo[a]anthracen (BaA)</u></li> <li>• <u>Chrysen (+Triphenylen) (CHR)</u></li> <li>• <i>Fluoranthen (FLU)</i></li> <li>• <u>Benzo[b]fluoranthen (BbF)</u></li> <li>• <i>Benzo[k]fluoranthen (BkF)</i></li> <li>• <u>Benzo[a]pyren (BaP)</u></li> <li>• <i>Indeno[1,2,3,-cd]pyren (INP)</i></li> <li>• <i>Benzo[g,h,i]perylen (BghiP)</i></li> <li>• <i>Dibenzo[a,h]anthracen (DBahA)</i></li> </ul> |
| <p><i>kursiv: leichter flüchtige PAK, Rest: 12 schwerer flüchtige PAK, unterstrichen: PAK4</i></p>   |  |

**PAK** entstehen in der Hauptsache bei unvollständiger Verbrennung von organischem Material wie Holz, Kohle oder Ölprodukten. Mehr als 80 % stammen aktuell von Kleinf Feuerungsanlagen in Haushalten (Hausbrand), rund 6 % von kleinen und mittleren Feuerungsanlagen im Gewerbe, weitere 6 % aus Industrieprozessen und 2 % aus dem Verkehr, der Rest aus Energiewirtschaft, verarbeitendem Gewerbe und weiteren Quellen (UBA 2016). Verkehrsabgase und der Flughafenbetrieb (Rückstände aus dem Kerosin) stellen also direkte, kontinuierliche PAK-Quellen dar, während die Hauptquelle – Hausbrand – saisonal relevant hervortritt.

Die etwa 10.000 PAK-Verbindungen bestehen aus zwei bis sieben Ringen von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen – je mehr Ringe vorhanden sind, desto stabiler sind sie und desto besser reichern sie sich im Fettgewebe von Organismen an (UBA 2016).

Die Summe der 16 PAK wird aufgrund ihrer Häufigkeit und Umwelrelevanz in der Regel stellvertretend untersucht. Die 16 PAK wurden von der US Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) als „prioritäre Schadstoffe“ klassifiziert (VDI 3957/2 und /3).

Die Summe der schwerer flüchtigen 12 PAK wird häufig als Teilsumme der 16 PAK nach EPA betrachtet. Die Summe von 4 PAK, meist als PAK4 bezeichnet, besteht aus den Verbindungen: Benzo[a]pyren, Benzo[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthen und Chrysen. PAK4 bewertet u. a. Kontaminanten (unerwünschte Stoffe) in Lebensmitteln (Verordnung (EU) Nr. 853/2011). Benzo[a]pyren (BaP) als eine der PAK4 Verbindungen gilt Leitsubstanz der PAK und wird daher gesondert betrachtet, u. a., weil sie besonders stark krebserregend ist.

## 2.3 Standardisierte Graskultur

Die standardisierte **Graskultur** von Welschem Weidelgras (*Lolium multiflorum* Lam. ssp. *italicum* Sorte „Gemini“) wird gemäß Richtlinie VDI 3957 Blatt 2 in der aktuellen Fassung (2020) unter gleichartigen Bedingungen im Gewächshaus vorkultiviert. An Messpunkten im Umfeld des Flughafens werden die Graskulturen in vierwöchigem Wechsel von Mai bis September aufgestellt (exponiert; Tabelle 2.4-1). Vor Ort sammeln sie die Schadstoffe aus der Luft (Bild Titelseite links unten und Bild 2.3-1). Der Biomassezuwachs wird nach der Exposition geerntet und im Labor auf Schadstoffgehalte analysiert.

Einige der Metalle können systemisch (natürlicherweise) aus dem Substrat über die Wurzeln aufgenommen werden. Daher werden die Graskulturen in sogenannter Nullerde kultiviert, einem Gemisch aus Einheitserde Typ 0 mit geringem Spurenelementanteil, Weißtorf und Kalk. Mit Kalk wird der Säuregrad des Substrats auf rund pH 6–7 schwach sauer bis neutral eingestellt, um den Einfluss der Metallaufnahme aus dem Substrat möglichst konstant gering zu erhalten.



**Bild 2.3-1: Graskulturen für die Analysen auf Metalle (2 kleine Kulturtöpfe, hinten) und auf PAK (2 große Kulturtöpfe, vorne)**

[Foto: Bernhard Huber für Flughafen München GmbH]

## 2.4 Grünkohlexposition

**Grünkohl** wird entsprechend dem Richtlinien-„Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl“ (VDI 3957/3, 2023) vorkultiviert. Die Grünkohlexponate werden in einem Gemisch aus Einheitserde Typ

ED73 und Sand kultiviert. Mit Kalk wird wie bei Graskulturen (Kapitel 2.3) der Säuregrad so eingestellt, dass der Einfluss der Metallaufnahme aus dem Substrat möglichst konstant gering bleibt. Sie werden im Anschluss an die Graskulturen ebenfalls in Pflanztöpfen mit autonomer Wasserversorgung aufgestellt (Bild Titelseite rechts unten und Bild 2.4-1): jeweils drei Grünkohlexponate einmal pro Jahr von September bis November an denselben Messpunkten wie Graskulturen. Nach acht Wochen (Tabelle 2.4-1) wird eine bestimmte Anzahl voll entwickelter Grünkohlblätter einheitlich geerntet. Die Proben werden, nach den gleichen Verfahren wie die Graskulturen im Labor aufgearbeitet und deren Stoffgehalte untersucht (Kapitel 2.5). Die Untersuchung auf Metalle wurde 2021 wieder aufgenommen, nachdem 2020 pandemiebedingt zur Kostenreduktion keine Analysen durchgeführt worden waren (Messbericht im Internet: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000012223301bb61829c0e/biomonitoring-2020.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000012223301bb61829c0e/biomonitoring-2020.pdf)).

Die Grünkohlproben werden nicht gewaschen und nicht verzehrfertig aufbereitet wie Lebensmittel, sondern ungewaschen analysiert, da sie gemäß Richtlinie VDI 3957 Blatt 3 (2023) als Indikatoren für Immissionsbelastungen der Vegetation und auch für die Belastung von Futtermitteln verwendet werden können. Von Grünkohl als Lebensmittel, der vor dem Verzehr gewaschen würde, könnten ausgelagerte Luftverunreinigungen teilweise abgewaschen werden. In den hier als Indikatoren für Immissionsbelastungen der Vegetation ungewaschen analysierten Grünkohlproben werden demgegenüber tendenziell höhere Stoffgehalte gemessen.



**Bild 2.4-1: Grünkohlexponat und Grünkohlernte für die Analysen auf Metalle (1 Kulturtopf) und auf PAK (2 Kulturtopfe)**

[Foto rechts: Günter Wicker]

Tabelle 2.4-1 stellt nachfolgend die Expositionsabschnitte von Graskulturen und Grünkohl 2022 dar.

Folgende Besonderheiten traten 2022 auf, die bei der Ergebnisbetrachtung ggf. zu berücksichtigen sind: Nach der 3. Serie Graskultur konnte von MWF nur eine Kultur auf Metalle untersucht werden, da die andere einen andersartigen Wuchs aufwies und Vandalismus nicht auszuschließen war.

Während der 5. Serie Graskultur fanden unmittelbar an AWL größere Erdarbeiten statt; an MEF wurde nur eine Kultur auf Metalle untersucht, da in der anderen eine tote Maus abgelegt war.

Bei der Ernte des Grünkohl in KW45 fanden am Haus neben BIS Bauarbeiten mit Staubentwicklung statt. Außerdem waren während der Expositionsperioden 2022 wegen der trockenen heißen Witterung mehrfach Zwischenbewässerung erforderlich. Ausfälle gab es 2022 nicht. Zum Vergleich: Ein Ausfall war in der 1. Serie Graskulturen 2021 am Messpunkt AWL zu beklagen: Sämtliche Kulturen und Geräte waren in den angrenzenden Bach geworfen worden. Ersatzweise wurde daher dort die 2. Serie 2021 auf Metalle analysiert und die Mischprobe für die PAK-Analytik anstatt aus der 1., 2. und 3. Serie nur aus der 2. und 3. Serie gebildet.

**Tabelle 2.4-1: Expositionsabschnitte 2022**

| Expositionsabschnitte 2022 – alle Expositionsabschnitte (kurz: Serien) +/- 2 Tage – |                    |  |                                      |
|---|--------------------|--|--------------------------------------|
| Monat   | Kalender-<br>woche | Graskultur für Metalle (1., 3., 5. Serie: grün) und PAK* | Grünkohl für Metalle und PAK         |
| Ende April–Ende <b>Mai</b>  | KW 17–21           | <b>1. Serie:</b> 27.04-25.05.2022                        |                                      |
| Ende Mai–Ende <b>Juni</b>   | KW 21–25           | <b>2. Serie:</b> 25.05-22.06.2022                        |                                      |
| Ende Juni–Ende <b>Juli</b>  | KW 25–29           | <b>3. Serie:</b> 22.06-19.07.2022                        |                                      |
| Ende Juli–Mitte <b>August</b>   | KW 29–33           | <b>4. Serie:</b> 19.07.-15.08.2022                       |                                      |
| Mi. <b>August</b> –Mi. <b>Sept.</b>   | KW 33–37           | <b>5. Serie:</b> 15.08.-14.09.2022                       |                                      |
| Mitte <b>Sept.</b> –Mitte Okt.  | KW 37–41           |  | <b>Exposition:</b> 14.09.-10.11.2022 |
| Mitte Okt.–Mitte <b>Nov.</b>  | KW 37–45           |  |                                      |

\*: für PAK-Analysen werden die Graskultur-Serien 1-3 zu Mischproben vereint, die Serien 4 und 5 einzeln untersucht

## 2.5 Analysen

Für die **Analysen auf Metalle** wird von Graskulturen die Biomasse von zwei kleinen Kulturtöpfen der Expositionsabschnitte Mai (1. Serie), Juli (3. Serie) und Mitte August bis Mitte September (5. Serie) von jedem Messpunkt verwendet. Die Graskultur-Serien Juni (2. Serie) und August (4. Serie) wurden zur Aufwands- und Kostenreduktion nicht untersucht. Von den Grünkohlexponaten wird einer der Kulturtöpfe für die Analysen auf Metalle verwendet:

Nach der Trocknung der Proben bei 30°C erfolgt eine Zerkleinerung und Homogenisierung. Die Metallgehalte werden nach Mikrowellendruckaufschluss mit Salpetersäure und Salzsäure mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) gemäß DIN EN 15763 bestimmt.

Die analytischen Bestimmungsgrenzen (BG) sind in den Ergebniskapiteln stoffweise dargestellt. Ab 2020 konnten die BG folgender Metalle nach 2017 nochmal zweifach bis vierfach abgesenkt werden: Bismut auf 0,0025 mg/kg TM (Trockenmasse), Antimon, Chrom und Vanadium auf 0,025 mg/kg TM und für Antimon in Graskultur 2022 nochmals auf 0,013 mg/kg TM, Eisen auf 0,25 mg/kg TM. Für Antimon und Vanadium unterschieden sich die Bestimmungsgrenzen für Grünkohl mit 0,02 mg/kg TM für Antimon und 0,01 mg/kg TM für Vanadium (ab 2019).

Für die **Analysen auf 16 PAK nach EPA** (16 priore Kontaminanten gemäß US Umweltbehörde EPA) wird die Biomasse von zwei großen Kulturtöpfen von jedem Messpunkt verwendet. Die PAK-Analysen erfolgen entsprechend der Vorgehensweise des BayLfU in der Mischprobe der Expositionsabschnitte Mai bis Juli (Serien 1–3) und den Einzelproben von August und September (4. und 5. Serie). Dies dient dazu

typische saisonale Effekte bei den PAK-Immissionswirkungen – bei Beginn der Heiztätigkeit im September – zu erkennen (BayLfU 2017 PAK). Von den Grünkohlexponaten werden in der Regel zwei Kulturtöpfe für die PAK-Analysen verwendet.

Zur PAK-Bestimmung wird nach Gefriertrocknung und Homogenisierung der Pflanzenproben ein aufgereinigter Extrakt hergestellt. Dieser wird angelehnt an DIN ISO 12884 mittels hochauflösender Gaschromatographie (HRGC), massenselektiver Detektion (MSD, niederauflösende Massenspektrometrie) unter Verwendung der Isotopenverdünnungsmethode (markierte interne Standards) analysiert. Dabei werden Bestimmungsgrenzen von 0,10 µg/kg TM pro Einzelverbindung erreicht (1 Mikrogramm pro Kilogramm entspricht ein Tausendstel Milligramm pro Kilogramm).

## 2.6 Maßgaben zur Auswertung und Beurteilung

Die Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse erfolgt anhand der in den entsprechenden Richtlinien und Verordnungen festgelegten Maßgaben. Für emittentenbezogenes Biomonitoring ist die überarbeitete Richtlinie VDI 3957 Blatt 10 (2023) maßgebend, in die gemäß VDI 3857 Blatt 2 (2021) Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt eingegangen sind. In diesen Richtlinien sind die erforderlichen aktuellen Kenngrößen für die Aus- und Bewertung und der Umgang mit den Messdaten festgelegt (Kap. 2.7):

- Die Trockenmasse (TM) stellt die Bezugsgröße für die Stoffgehalte dar.
- Für Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (<BG) wird deren halber Zahlenwert angegeben.
- Eine expertengestützte Ausreißerprüfung geht der Auswertung voran.
- Bei der Beurteilung von Immissionseinflüssen wird die Unsicherheit des Verfahrens berücksichtigt.

### I. Identifikation von Immissionseinflüssen mittels OmH

Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) stellen robuste Obergrenzen für Stoffgehalte der Metalle und PAK-Parameter in den Graskulturen dar, die für die gebietstypische Hintergrundsituation charakteristisch sind (VDI 3857/2 2021). Der OmH kommt zur Anwendung um zu beurteilen, ob eine über die Hintergrundbelastung hinausgehende Immissionswirkung vorliegt.

Für die neun Metalle in Graskultur wird jeweils ein metallspezifischer OmH für das Untersuchungsgebiet in der Umgebung des Flughafens München aus den Messwerten mit gebietstypischer Hintergrundsituation 2017 bis 2022 ermittelt. Dieser kann mit dem jeweiligen überregionalen OmH (VDI 3857/2 2021) und mit dem in Bayern an ländlichen Hintergrundmesspunkten ermittelten OmH (BayLfU 2022) verglichen werden (Tabelle 2.6-1). Für Antimon in Graskultur konnte kein OmH gebildet werden da mehr als 75 % der Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen.

Für die neun Metalle in Grünkohl wurden analog zu Graskultur metallspezifisch gebietstypische OmH ermittelt. Aufgrund der geringeren Datenanzahl war hier der Umgriff über die Messjahre 2011–2022 erforderlich (2020: keine Metalle in Grünkohl untersucht). Ausnahme bildet die OmH-Ermittlung für Blei: Wegen der zeitlichen Entwicklung erfolgte der Datenumgriff 2016–2022. Die OmH für Metalle in Grünkohl können mit aktuellen überregionalen OmH verglichen werden (VDI 3957/3 2023).

Tabelle 2.6-1 zeigt, dass die berechneten OmH als Schwellen für die Hintergrundbelastung im Untersuchungsgebiet um den Flughafen München für Graskultur für Blei und Chrom niedriger liegen als die Vergleichs-OmH, für die anderen Metalle in der Höhe gut mit den Vergleichs-OmH übereinstimmen und nur für Aluminium höher liegen.

Die berechneten OmH für Grünkohl sind für Aluminium wie für Antimon, Blei und Vanadium deutlich niedriger als die Vergleichs-OmH. Für die anderen Metalle stimmen sie in der Höhe relativ gut überein.

Für die drei PAK-Parameter 16PAK nach EPA, PAK4 und Benzo[a]pyren werden analog zu den Metallen OmH für das Untersuchungsgebiet ermittelt (Tabelle 2.6-1). Sie können mit überregionalen OmH (für Grünkohl: VDI 3957/3, 2023) sowie mit OmH von bayerischen Hintergrundmesspunkten (BayLfU 2017) verglichen werden. Die berechneten OmH für PAK in Graskultur und Grünkohl sind niedriger als die Vergleichs-OmH.

**Tabelle 2.6-1: Beurteilungswerte für Immissionseinflüsse – OmH für Graskultur und Grünkohl**

| Beurteilungswerte für Immissionseinflüsse |  |  |  |   |   |   |                                       |   |  |
|---|--|--|--|---|---|---|---------------------------------------|---|--|
| Metalle                                   | Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt [OmH] |  |  |   |   |   |                                       |   |  |
|   | für Graskultur bezogen auf 100% TM                           |  |  |   |   | für Grünkohl bezogen auf 100% TM                      |                                       |   |  |
|   | OmH <sub>ermittelt</sub><br>dieses Bio-<br>monitoring        | OmH<br>überregional<br>(VDI 3857/2°)   | OmH Bayern<br>ländl. Hinter-<br>grund (VDI°) | OmH Bayern<br>ländl. H.grund<br>BayLfU2012-21 | Standardun-<br>sicherheit <i>u</i> %<br>(VDI 3857/2°) | OmH <sub>ermittelt</sub><br>dieses Bio-<br>monitoring | OmH<br>überregional<br>(VDI 3957/3°°) | OmH Bayern<br>ländl. Hinter-<br>grund (VDI°°) | Standardun-<br>sicherheit <i>u</i> %<br>(VDI 3957/3°°) |
|   | [mg/kg TM]   | Milligramm pro Kilogramm T rockenmasse |  |   |   | [mg/kg TM]  | Milligramm pro kg TM                  |   |  |
| Aluminium (Al)                            | 80   | 56                                     | 45   | 40  | 33%   | 32  | 60                                    | -   | .*   |
| Antimon (Sb)                              | >75% : <0,013-<0,04  | keine Angabe                           | >75% : <0,025                                | >75% : <0,025-<0,1                            | 19%   | 0,035   | 0,094                                 | -   | .*   |
| Bismut (Bi)                               | 0,0090   | keine Angabe                           | >75% : <0,007                                | >75% : <0,02-<0,007                           | .*  | 0,026   | 0,030                                 | -   | .*   |
| Blei (Pb)                                 | 0,16   | 0,36                                   | >75% : <0,25                                 | >75% : <0,2-<0,25                             | 15%   | 0,11  | 0,23                                  | -   | .*   |
| Chrom (Cr)                                | 0,35   | 0,51                                   | >75% : <0,20                                 | >75% : <0,20                                  | 22%   | 0,35  | 0,46                                  | -   | .*   |
| Eisen (Fe)                                | 100  | 103                                    | 95   | 84  | 16%   | 166   | 154                                   | -   | .*   |
| Kupfer (Cu)                               |  |  |  |   |   | 3,4   | 3,8                                   | -   | .*   |
| Molybdän (Mo)                             | 3,7  | keine Angabe                           | keine Angabe                                 | keine Angabe                                  | .*  | 4,9   | 4,0                                   | -   | .*   |
| Nickel (Ni)                               | 5,0  | keine Angabe                           | 5,7  | 5,4   | 14%   |   |                                       | -   | .*   |
| Vanadium (V)                              | 0,14   | 0,15                                   | 0,12   | 0,091   | 20%   | 0,056   | 0,12                                  | -   | .*   |
| <b>PAK</b>                                | [µg/kg TM]   |  | **OmH Bayern<br>(2005-2014)                  | Mikrogramm/Kilogramm TM                       |   | [µg/kg TM]  | Mikrogramm/Kilogramm TM               |   |  |
| 16 PAK                                    | 26 / 28 / 40   | -                                      | **44 / 44 / 107                              | -   | .*  | 162   | 330                                   | -   | 20%  |
| 12 PAK                                    | 20 / 22 / 34   | -                                      | ** / 29 / 87                                 | -   | .*  | 156   | 304                                   | -   | 21%  |
| PAK4                                      | 2,6 / 2,1 / 4,1  | -                                      | **8,6 / 8,1 / 16                             | -   | .*  | 30  | 63                                    | -   | 35%  |
| Benz[a]pyren                              | 0,5 / 0,3 / 0,7  | -                                      | **1,8 / 0,8 / 2,1                            | -   | .*  | 2,7   | 4,6                                   | -   | 18%  |

PAK-OmH für Graskultur für: 1.-3. Serie / 4. Serie / 5. Serie

VDI 3857/2 2021 (Datenbasis 2007-2016), VDI 3957/3 2023 (Datenbasis 2010-2019)

.\*: Kann *u* nicht ermittelt werden, ist "dann ein Immissionseinfluss anzunehmen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \times$  OmH beträgt".

\*\* : OmH Bayern [2005-2014]: ländlicher Hintergrund (Quelle: BayLfU 2017)

Gemäß Richtlinie VDI 3857/2 liegt eine gegenüber der Hintergrundbelastung erhöhte Belastung, also ein Immissionseinfluss, vor, wenn ein gemessener Elementgehalt abzüglich der Standardunsicherheit für das jeweilige Element in mg/kg TM den OmH überschreitet. Falls die Standardunsicherheit [*u* in %] im ortsbezogenen Biomonitoring nicht bestimmt wurde, wird ersatzweise *u* der Richtlinien (VDI 3857/2 und VDI 3957/3) verwendet. Ist auch in den Richtlinien kein *u* angegeben, wird als „pragmatischer Ansatz“ ein Immissionseinfluss dann angenommen, wenn der gemessene Wert  $\geq 1,5 \times$  OmH beträgt (VDI 3857/2). Dies entspricht rechnerisch einer Unsicherheit von einem Drittel: 33,3%.

Um zu beurteilen, wie relevant (welcher Art) ein festgestellter Immissionseinfluss ist, wird er bezüglich der Häufigkeit des Auftretens am Wirkort (Messpunkt) für Graskulturen klassifiziert:

- Ein deutlicher Immissionseinfluss liegt an einem Messpunkt vor, wenn dort mehrheitliche OmH-Überschreitungen auftreten: 2 oder 3 von 3 Graskulturwerten pro Jahr den OmH überschreiten.
- Ein schwacher Immissionseinfluss liegt an einem Messpunkt vor, wenn dort nicht mehrheitliche OmH-Überschreitungen auftreten: z. B. 1 von 3 Messwerten pro Jahr den OmH überschreiten.
- Kein Immissionseinfluss – keine über die Hintergrundbelastung hinausgehende Immissionswirkung – liegt an einem Messpunkt vor, wenn die Messwerte den OmH nicht oder nur vereinzelt überschreiten.

Dieses Vorgehen ermöglicht zu beantworten (vgl. Kapitel 1.1):

**Sind in der Umgebung des Flughafens Immissionseinflüsse feststellbar und welcher Art?**

## II: Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Die eingangs gestellte Frage (vgl. Kapitel 1.1)

### Wie ist die zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation?

ist von Interesse, wenn deutliche Immissionseinflüsse festgestellt worden sind, für die der Flughafenbetrieb die maßgebliche Quelle ist.

Es ist dann zu prüfen, ob diese zu- oder abnehmen. Auch bei deutlichen Schwankungen von Jahr zu Jahr, oder bei Graskultur zwischen den Expositionsabschnitten, sollten mögliche Zusammenhänge mit anderen Einflussfaktoren in Betracht gezogen werden. Hierfür kommen Witterungsbedingungen wie Temperatur und hohe Niederschlagsmengen in Frage, die auf Wuchs und Stoffanreicherung Einfluss haben, sowie die vorherrschende Windrichtung während der Exposition.

Im Zeitraum 2017–2022 sind Veränderungen der allgemeinen Immissionssituation aufgrund der Coronapandemie besonders zu betrachten. Als Auswirkung der Pandemie war das Verkehrsaufkommen aller Verkehrsträger ab dem Frühjahr 2020 zurückgegangen und die Flugbewegungen 2020 und auch 2021 gegenüber den drei Vorjahren drastisch reduziert. In den Jahren 2020 und 2021 stiegen sie von Mai bis November im Jahresverlauf an, blieben aber deutlich unter denen der Vorjahre. Im Jahr 2022 lag das Flugverkehrsaufkommen höher: auf rund 70 % des Niveaus der Vor-Coronajahre 2018 und 2019 (Bild 1.3-1).

Der Vergleich der Ergebnisse im Untersuchungsgebiet mit anderen Gebieten, z. B. im ländlichen Hintergrund an bayernweiten Dauerbeobachtungsstationen (DBS) des BayLfU, kann hier ebenfalls zur Klärung beitragen (siehe auch unten: Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation).

Bei der Ergebnisinterpretation sollte stets die Unsicherheit des Verfahrens Berücksichtigung finden.

## III. Messpunktastufung und Quellenzuordnung

Um identifizierte Immissionswirkungen an Messpunkten potenziellen Emissionsquellen zuzuordnen zu können, ist zunächst eine Messpunktastufung vorzunehmen. Die Wertekollektive an den Messpunkten sind miteinander zu vergleichen. Sind stoffspezifisch Unterschiede erkennbar, wird untersucht, ob aus der Lage der Messpunkte zueinander und zu potenziellen Emissionsquellen, anhand Stoffspektren und gegebenenfalls weiteren Erkenntnissen, hervortretende Immissionswirkungen bestimmten Quellen zugeordnet werden können.

Da die Wertekollektive von Serie zu Serie schwanken und unterschiedlich hohe Streuung aufweisen, wurde ein relativer Messpunktvergleich durchgeführt, selbst wenn keine hervortretenden Immissionswirkungen vorlagen. Dieser Vergleich eliminiert serienweise Schwankungen und relativiert die Streuung. Für

den relativen Messpunktvergleich werden von den Messwerten einer Serie sogenannte Z-Werte gebildet: von jedem einzelnen Messwert wird das arithmetische Mittel aller Messwerte einer Serie subtrahiert und die Differenz durch die Standardabweichung des Wertekollektivs dieser Serie geteilt. Das arithmetische Mittel der Abweichungen über die Serien-Z-Werte eines Messpunktes im betrachteten Zeitraum ergibt so ein Maß für die relative Abweichung der Messpunkte zueinander: Z-Mittelwert.

Diese Vorgehensweise ermöglicht es die Frage zu beantworten (vgl. Kapitel 1.1):

**Können Immissionswirkungen vorhandenen Emissionsquellen zugeordnet werden?**

#### IV: Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation

Als Maßstäbe wurden in vergleichbaren Biomonitorings gemessene Wirkungen und die Ergebnisse im Untersuchungsgebiet gegenübergestellt:

- Wertebereiche im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER (Wäber und Pompe 2022a) und
- Wertebereiche im Umfeld des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022 (Wäber und Pompe 2023 in Vorbereitung) als aktuellste Vergleichsuntersuchungen für Graskultur mit identischer Durchführung;
- OmH, arithmetischer Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung von Einzelwerten ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern für Metalle in Graskulturen bis 2002–2021 (BayLfU 2022) sowie für PAK in Graskulturen und Grünkohl 2005–2014 (BayLfU 2017);
- OmH, überregional, aus den Richtlinien VDI 3857 Blatt 2 (2021; für Metalle in Graskultur) und VDI 3957 Blatt 3 (2023 für Metalle und PAK in Grünkohl).

Dies liefert eine vergleichende Einordnung für die Fragestellung (vgl. Kapitel 1.1):

**Wie hoch ist die Wirkungssituation und wie ist sie zu bewerten?**

#### V: Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Standardisierte Graskultur gilt als Repräsentant für pflanzliche Tierfuttermittel. Die Luftschadstoffgehalte in den Graskulturen können mit Beurteilungswerten aus dem europäischen Futtermittelrecht und aus VDI-Richtlinien verglichen werden, die Hinweise auf etwaige Beeinträchtigungen hinsichtlich landwirtschaftlicher Futter- und Nahrungsmittelproduktion liefern. Mit Beurteilungswerten für Blattgemüse-Lebensmittel kann orientierend abgeschätzt werden, ob ein Risiko für den Menschen gegeben wäre. Beurteilungswerte zur Gefährdungsabschätzung für Mensch und Tier über den Nahrungspfad liegen für einen Teil der untersuchten Stoffe vor (Tabelle 2.6-2).

- *Höchstgehalte gemäß Futtermittelverordnung (FuttMV)* sind für unerwünschte Stoffe festgesetzt, die in oder auf Futtermitteln eine potenzielle Gefahr für die Gesundheit von Mensch oder Tier oder für die Umwelt darstellen oder die tierische Erzeugung beeinträchtigen können. Sie sind auf Einzelmesswerte zu beziehen.
- *Maximale Immissions-Werte* gemäß Richtlinienreihe VDI 2310 haben Empfehlungscharakter und sind zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere und der Sicherung der Unbedenklichkeit der von diesen Tieren gewonnenen Lebensmittel festgesetzt. Maximale Immissions-Werte beziehen sich auf die langfristige Schadstoffaufnahme. Daher wird nicht der Einzelwert, sondern der gemittelte Schadstoffgehalt in der Graskultur verglichen.
- *Mit Lebensmittel-Höchstgehalten* kann durch den orientierenden Vergleich der festgestellten Schadstoffgehalte ansatzweise eine Gefährdung des Menschen über den Verzehr abgeschätzt werden. Für Blattkohl-Lebensmittel ist in den Fortschreibungen der Verordnung (VO) (EG) Nr. 1881/2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln

– aus den Stoffen, die für das aktuelle Biomonitoring ausgewählt sind – aktuell ein Höchstgehalt spezifisch für Blei festgelegt (VO (EU) 2015/1005 mit 2021/1317).

**Tabelle 2.6-2: Beurteilungswerte zur Gefährdungsabschätzung**

| Beurteilungswerte zur Gefährdungsabschätzung |   |   |           |  |
|--|---|---|-----------|--|
|  | für Futtermittel zum Vergleich mit Graskultur bezogen auf 100% TM |   |           | für Lebensmittel bez. 100% Frischmasse       |
|  | Höchstgehalt (FuttMV)   | Maximale Immissionswerte (VDI 2310) Rinder / Schafe |           | Höchstgehalt für Blattkohl VO (EU) 2015/1005 |
| <b>Metalle</b>                               | Milligramm pro Kilogramm Trockenmasse                             |   |           | mg/kg Frischmasse                            |
| Aluminium (Al)                               | -   | 568   | 568       | -  |
| Antimon (Sb)                                 | -   | -   | -         | -  |
| Bismut (Bi)                                  | -   | -   | -         | -  |
| Blei (Pb)                                    | 34  | 1,0 - 1,5   | 4,5 - 6,8 | 0,30   |
| Chrom (Cr)                                   | -   | 57  | 57        | -  |
| Eisen (Fe)                                   | -   | -   | -         | -  |
| Kupfer (Cu)                                  | -   | 45 - 114  | 11,4 - 23 | -  |
| Molybdän (Mo)                                | -   | 11,4  | 57        | -  |
| Nickel (Ni)                                  | -   | 57  | 57        | -  |
| Vanadium (V)                                 | -   | -   | 11,4      | -  |
| <b>PAK</b>                                   | Mikrogramm/Kilogramm Trockenmasse                                 |   |           | µg/kg Frischmasse                            |
| 16 PAK                                       | -   | -   | -         | -  |
| PAK4   | -   | -   | -         | -  |
| Benz[a]pyren                                 | -   | -   | -         | -  |

Die Beurteilungswerte für Futtermittel nach FuttMV und Richtlinienreihe VDI 2310 beziehen sich auf 88 % Trockenmasse (TM). Für den Vergleich mit den Graskulturergebnissen werden sie auf 100 % TM umgerechnet (Tabelle 2.6-2). Die Beurteilungswerte für Lebensmittel beziehen sich auf Frischmasse (FM; Tabelle 2.6-2). Für den Vergleich mit Lebensmittel-Höchstgehalten werden die Stoffgehalte im Bioindikator anhand des gemessenen Trockenmasseanteils in Frischmasse umgerechnet. Beim orientierenden Vergleich mit Lebensmittel-Höchstgehalten ist zu beachten, dass:

- Pflanzen allgemein unterschiedliche Anreicherungseigenschaften besitzen, der Bioindikator Graskultur hat somit andere Anreicherungseigenschaften als Blattgemüse-Lebensmittel;
- Graskultur und Grünkohl ungewaschen analysiert werden, während sich Höchstgehalte des Lebensmittelrechts auf verzehrfertig aufbereitete, in diesem Fall auch gewaschene Lebensmittel beziehen.

Der Vergleich der Stoffgehalte in den Bioindikatoren mit den Beurteilungswerten liefert Antworten auf die Frage: **Sind Gefährdungen von Menschen oder Tieren über die Nahrungskette zu erwarten?**

## 2.7 Kenngrößen, Messunsicherheit, Umgang mit den Messwerten

Die Stoffgehalte in den Graskultur- und Grünkohlproben sind auf die **Trockenmasse** bezogen. Sie werden gemeinsam mit dem Trockenmassegehalt (in %) bestimmt. Letzterer ermöglicht die Umrechnung auf Frischmasse (Bezug 100 % FM), wenn als Beurteilungswerte Höchstgehalte in Lebensmitteln genutzt werden (Tabelle 2.6-2). Die Gehalte von Metallen sind in mg/kg bezogen auf 100 % Trockenmasse (TM) angegeben. Die Gehalte der 16 PAK nach EPA sind in µg/kg TM angegeben: 1 Mikrogramm pro Kilogramm entspricht einem Tausendstel Milligramm pro Kilogramm, somit 1 Millionstel Gramm pro Kilogramm.

Die **Messunsicherheit** ist wichtig zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Untersuchungsverfahren, ebenso wie die Empfindlichkeit bezüglich Laboranalytik (Nachweisgrenze und Bestimmungsgrenze). Die Aussagekraft hängt zudem von Reproduzierbarkeit und Richtigkeit ab und wird durch die Einhaltung der Standardisierungsvorgaben ermöglicht (Liftinger 2017).

Jedes Messverfahren ist mit einer Messunsicherheit behaftet. Der Wert der betrachteten Messgröße kann nicht beliebig exakt bestimmt werden. Das Ergebnis einer Messung ist vielmehr stets eine Lageschätzung für den wahren Wert. Die Messunsicherheit gibt an, in welchem Wertebereich der Messwert um den wahren Wert streut (VDI 4280 Blatt 1 zu DIN V ENV 13005).

Bei allen technischen und biologischen Messungen gibt es vielfältige, teilweise schwer bestimmbare Ursachen für die Abweichung des Messwertes vom wahren Wert. Sie können in zufälligen und systematischen Fehlern liegen. Bei der Verfahrensdurchführung beim Biomonitoring wird größter Wert auf die Qualität gelegt (VDI 3957 Blatt 1 bis 3 und Blatt 10). Trotzdem lassen sich nicht alle Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit eliminieren oder eingrenzen. Die als *Standardunsicherheit des Verfahrens  $u$*  nach DIN EN ISO 20988 definierte Messunsicherheit ist spezifisch für den jeweiligen untersuchten Stoff, schon aufgrund seiner typischen Eintragsformen in die Umwelt.

Die Standardunsicherheit des Verfahrens für das Biomonitoring im Umfeld des Flughafens München kann nicht aus früheren dortigen Paralleluntersuchungen hergeleitet werden, da diese länger als zehn Jahre zurück liegen. Daher werden veröffentlichte Standardunsicherheiten  $u$  für Metalle in standardisierte Graskulturen (VDI 3857/2 2021) und für PAK in Graskultur und Grünkohl (BayLfU 2017 und VDI 3957/3 2023) herangezogen. Die stoffspezifischen Standardunsicherheiten sind in Tabelle 2.6-1 zusammen mit den Orientierungswerten für Immissionseinflüsse – OmH – dargestellt, auf die sie bezogen werden.

Im Ergebnisteil sind die Messergebnisse als Zahlenwerte (bzw. Balkenhöhen in den Abbildungen) dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden sie nicht mit der aus der Unsicherheit resultierenden Spannweite dargestellt. Im Vergleich von Messwerten und Wertebereichen zueinander oder gegenüber OmH wird bei der Aus- und Bewertung der Ergebnisse die Standardunsicherheit des Verfahrens  $u$  jedoch stets mitberücksichtigt. Ein Beispiel: Bei einer Unsicherheit  $u$  von  $\pm 30\%$  beträgt für einen Messwert von 1 mg/kg TM die Spannweite des Messwertes 0,7–1,3 mg/kg TM.

Die aktuellen analytischen **Bestimmungsgrenzen (BG)** sind in den Ergebnisdarstellungen mit angegeben. Ergebnisse kleiner Bestimmungsgrenze sind mit 50 % des Zahlenwerts der Bestimmungsgrenze in den Darstellungen enthalten. Dieses Vorgehen entspricht den einschlägigen Richtlinien für Biomonitoring (VDI 3957 Blatt 2 und Blatt 3). In den Einzelwertetabellen im Anhang sind Ergebnisse kleiner BG mit *kurssiver Schrift* gekennzeichnet. Ergebnisse kleiner BG sind mit 50 % des Zahlenwerts der BG integriert in

die Berechnungen von Mittelwerten für Metalle in Graskultur und Summen der 16 PAK aus den Einzelverbindungen nach EPA in Graskultur und Grünkohl. Ausnahme bilden die PAK-Verbindungen, die die Summe PAK4 bilden (Tabelle 2.2-1): liegen sie <BG, gehen sie mit Null in PAK4 ein.

Als **Ausreißer** darf ein Messwert nicht alleine deswegen verworfen werden, weil er auffällig abweicht, vielmehr ist er nachdem er rechnerisch als Ausreißer (rA) identifiziert wurde, expertengestützt auf Plausibilität zu prüfen (VDI 3857/2 2021). Daher wurden die Ausreißer auf dokumentierte Besonderheiten und auf systematische Häufungen untersucht, um Kontaminationen und Fehlerwerte aus dem Verfahren aufzuspüren. Als Ausreißer identifizierte Werte, für die keine Anhaltspunkte für Kontaminationen, Verfahren- oder Übertragungsfehler dokumentiert waren, wurden nicht eliminiert, da einmalige Immissionseinflüsse nicht auszuschließen sind. Mit dieser Vorgehensweise wurden folgende Daten als rechnerische Ausreißer rA identifiziert: gesamter Metall-Datensatz Graskultur 2018 Serie 5 von Messpunkt BWL eliminiert.

**Tabelle 2.7-1: Behandlung identifizierter Ausreißer (rA)**

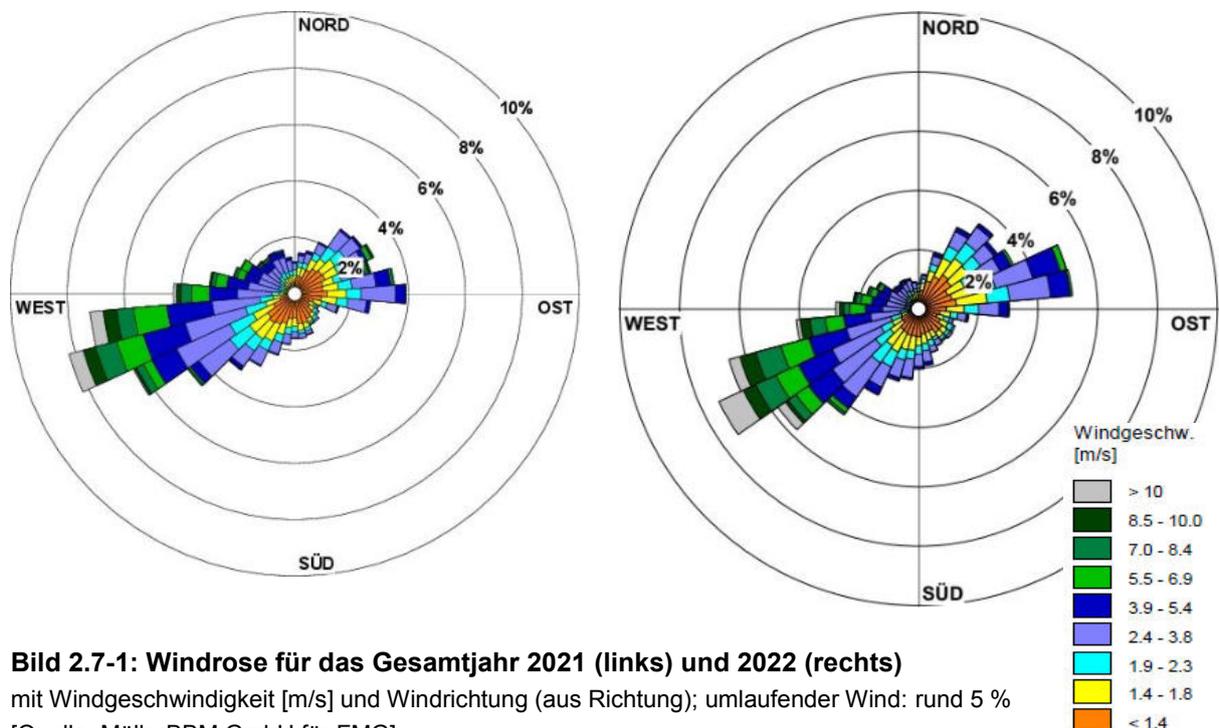
| Bioindikator und Stoff  | rA gemäß Kriterium Q.75 +/- 3*IQR  | expertengepr. Ausreißerbehandlung   |
|---|--|---|
| Graskultur für Metallanalyse 2018 Serie 5   | Messpunkt BWL:<br>Aluminium, Eisen, Vanadium   | gesamter Metall-Datensatz eliminiert da Boden-Kontamination wahrscheinlich                            |
| Graskultur für Metalle 2019 Serie 1   | Messpunkt MWF: Chrom   | nicht eliminiert, da nach Überprüfung einmaliger Immissionseinfluss möglich                           |
| Graskultur für Metalle 2017 Serie 3<br>2017 Serie 5<br>2019 Serie 1<br>2019 Serie 3<br>2019 Serie 5   | Messpunkt BIS: Nickel<br>Messpunkt MWF: Antimon<br>Messpunkt MEF: Bismut<br>Messpunkt MEF: Bismut<br>Messpunkte MEF und MWF: Antimon | nicht eliminiert, da nach Überprüfung einmaliger Immissionseinfluss möglich                           |
| Grünkohl für Metalle 2017–2022 kein Metall  |  | 2017 Messpunkt AWL Eisen erhöht, aber <rA: nicht eliminiert, da einmaliger Immissionseinfluss möglich |
| rA: rechnerischer Ausreißer $> Q.75 + 3 * IQR$ oder $< Q.25 - 3 * IQR$ , mit Q.75 (empirisches Quantil mit $p=0,75$ , d.h. mindestens drei Viertel der Messergebnisse (75 %) sind kleiner oder gleich diesem Wert), Q.25 (Quantil mit $p=0,25$ ), IQR (Interquartilsabstand $Q.75 - Q.25$ ) |  |   |

Die arithmetischen **Mittelwerte** aus den drei Messwerten von Metallen der 1., 3. und 5. Serie Graskultur pro Jahr sind in den Tabellen im Anhang ebenfalls dann kursiv gekennzeichnet, wenn mindestens ein Wert kleiner BG lag. Entsprechend der Vorgehensweise des BayLfU (BayLfU 2022) wird auch dann ein Mittelwert gebildet, wenn die Einzelwerte mehrheitlich kleiner BG liegen. Für PAK-Gehalte der Graskulturserien 1–3, 4 und 5 wird wegen saisonaler Unterschiede kein Mittelwert gebildet (vgl. Kap. 2.5).

Die Immissionssituation wird von der **Witterung** beeinflusst, vor allem von Niederschlägen sowie Windrichtung und -geschwindigkeit. Die Stoffgehalte in den Bioindikatoren schwanken von Serie zu Serie unterschiedlich stark und weisen unterschiedliche Streuungen auf. Die Bioindikatoren integrieren die Witterungseinflüsse, die auch auf die umgebende Vegetation wirken.

So kann etwa metallhaltiger Staub von der Blattoberfläche oder durch Regenwasser zum Teil abgewaschen werden. Besonders relevant sind die **Niederschläge** in der jeweils zweiten Hälfte des Expositionsabschnitts. Die Niederschlagsmengen während der Graskulturserien und Grünkohl-Exposition 2022 sind im Anhang dargestellt und beschrieben (Kap. 9.1). Insgesamt waren die Niederschlagsmengen während der Serien 1–5 von Graskulturen 2022 (Bild 9.1-1) deutlich niedriger als im Vorjahr und im Mittel der Vorjahre 2017–2021. Der Niederschlag während der Exposition von Grünkohl 2022 fiel hingegen deutlich höher aus. Deutliche Unterschiede zwischen den Expositionsabschnitten 2022, die mit dem Einfluss der Niederschlagsmengen korrespondieren würden, wurden nicht festgestellt (Kapitel 3).

Für die Betrachtung der **Windverhältnisse** hatte die FMG für die Expositionsabschnitte von Graskultur und Grünkohl 2021 Windrosen zur Verfügung gestellt. Bei den vorliegenden, unauffällig niedrigen Immissionswirkungen hatten sich daraus allerdings, je nach vorherrschenden Windlagen, keine Hinweise auf unterschiedliche Quellen ergeben (Kap. 9.1, Bild 9.1-2). Auch im Jahr 2022 lagen niedrige Immissionswirkungen vor (siehe Kapitel 3). Daher ist hier nur die aktuelle Gesamtjahreswindrose im Vergleich zum Vorjahr dargestellt. Bild 2.7-1 zeigt die Windrose (Windrichtung und -geschwindigkeit) für das Gesamtjahr 2021 im Vergleich zu 2022: in beiden Hauptwindrichtung West-Südwest (aus westlichen Richtungen) und der zweithäufigsten Windrichtung Ost-Nordost. Dies ist repräsentativ für den langjährigen Durchschnitt, rund 60 % Westwinde und 40 % Ostwinde.



### 3 Ergebnisse des Biomonitorings 2017–2022

#### 3.1 Aluminium in Graskultur und Grünkohl

Aluminium (Al) ist nach Sauerstoff und Silicium das dritthäufigste Element und es ist das häufigste Metall. Am Aufbau der Erdkruste hat es etwa 8 % Anteil. Aluminium kommt natürlicherweise fast ausschließlich in Verbindungen mit Sauerstoff vor. Aluminium kann aus dem Boden stammen, aber auch aus dem Verkehr von Brems-, Reifen- und Straßenabrieb sowie Motorverschleiß (BayLfU 2019).

Aluminium war 2017–2022 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (Bestimmungsgrenze BG: 0,25 mg/kg TM).

Die Aluminiumgehalte in Graskultur lagen 2022 mit 28–107 mg/kg TM teilweise höher als 2021 mit 13–58 mg/kg TM, aber im Wertebereich der Vorjahre seit 2017 mit 13–128 mg/kg TM (Bild 3.1-1 oben).

Die Aluminiumgehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 15–52 mg/kg TM höher als 2021 mit 6,2–19 mg/kg TM, im Bereich der Werte von 2017–2019 von 4–69 mg/kg TM (2020 keine Messung; Bild 3.1-1 unten).

##### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 80 mg/kg TM (fortgeschrieben im Zeitraum 2017–2022) und die Standardunsicherheit  $u$  33 %. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 32 mg/kg TM. Da für Grünkohl keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt, rechnerisch einer Unsicherheit von 33,3% entsprechend (Kap.2.6).

Wegen Vandalismus kam es 2018 zu einem Totalausfall an AWL in der 4. Graskulturserie. Bei den für Graskultur 2017–2022 im Untersuchungsgebiet insgesamt 134 Werten wurden nur 1 OmH-Überschreitung festgestellt: in der 1. Serie 2019 am Messpunkt RNL.

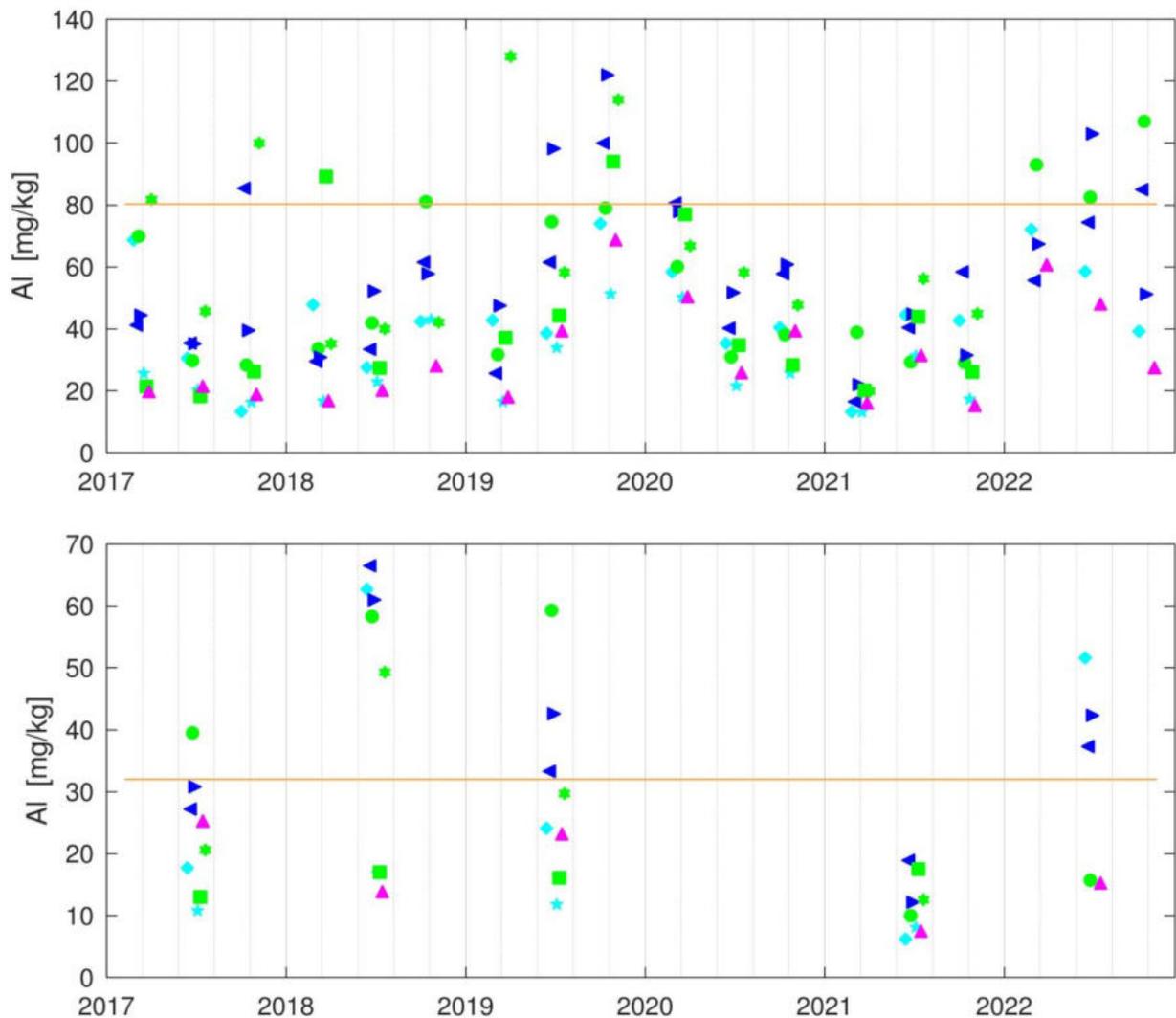
Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 37 Werten traten 7 OmH-Überschreitungen auf: 2018 an den Messpunkten FMF, MWF, AWL, MEF, RNL und 2019 am Messpunkt AWL sowie 2022 an FMF (Tabelle 3.1-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet 2018 und 2019 für Grünkohl an FMF und AWL ein schwacher, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Aluminium vor.

**Tabelle 3.1-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Aluminium zu den Messpunkten**

| Aluminium  | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 80             | 33 %                     | 18 Werte/MP | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   |
| Grünkohl   | 32             | -                        | 5 Werte/MP  | 2   | 1   | 2   | 1   | 0   | 0   | 0   | 1   |

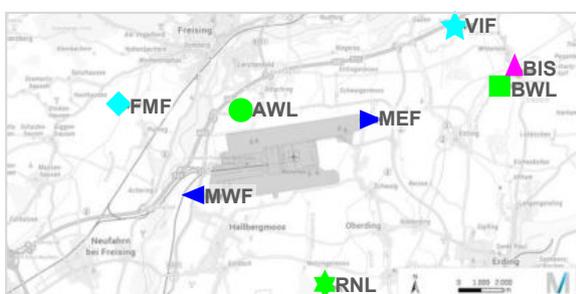
##### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Die Wertekollektive von Graskultur und Grünkohl schwanken von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf (Bild 3.1-1). Die Bioindikatoren integrieren die Witterungseinflüsse, die auch auf die Vegetation wirken. Metallhaltiger Staub kann von der Blattoberfläche vom Wind oder durch Regenwasser wieder entfernt werden. Weiterer möglicher Einflussfaktor ist bei Aluminium ein gewisses Aufnahmevermögen aus dem Substrat über die Wurzeln (Hombrecher et al. 2019). In den Jahren 2020 und 2021 traten in Graskulturen keine Werte oberhalb 80 mg/kg TM auf.



**Bild 3.1-1: Aluminiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blasse orangefarbene Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
- ★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
- ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
- ▶▶ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

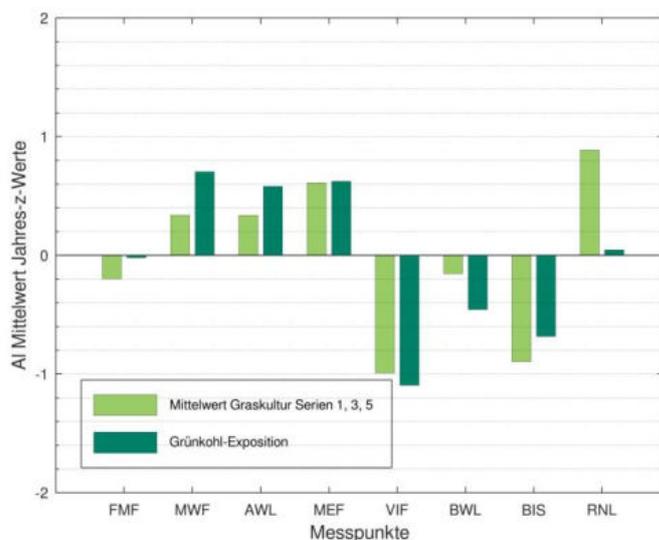
[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen 2020 und 2021 und dem erneuten Anstieg 2022 auf 70 % der Vor-Coronajahre korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden mir Graskultur-Biomonitoring nicht klar erkennbar: Auch in den Vor-Coronajahren 2017–2019 lagen temporär an allen Messpunkte Aluminiumgehalte

unter 80 mg/kg TM vor. Für Grünkohl zeigen sich 2022 wieder höhere Aluminiumgehalte in Grünkohl, allerdings nicht nur flughafennah an MWF und MEF, sondern auch naturnah an FMF (Bild 3.1-1).

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Der relative Messpunktvergleich wurde durchgeführt, obwohl die Aluminiumgehalte mit einer Ausnahme unterhalb der Schwelle für einen Immissionseinfluss, im Hintergrundbereich lagen. Durch den relativen Messpunktvergleich werden serienweise Schwankungen eliminiert, die Streuung relativiert.



**Bild 3.1-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Aluminium 2017–2022**

An den betriebsnahen Messpunkten des Flughafens könnten landwirtschaftliche Bodenbearbeitung und Erdbauarbeiten Staubverfrachtungen auf die weitflächig versiegelten Flächen des Flughafenareals bewirken. Von diesen Flächen als indirekte Quellen können aluminiumhaltige Stäube durch Wind, Verkehr und Flugverkehr wieder aufwirbeln. Die Messpunktastufungen (Bild 3.1-2) korrespondieren mit einem aktuellen Graskultur-Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt (BayLfU 2019). Es identifizierte Bodenaufwirbelung von einem nahegelegenen Acker als wesentliche Aluminiumquelle, während Straßenverkehr keine relevante direkte Quelle darstellte.

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Aktuell wird Aluminium in anderen Biomonitorings nicht untersucht. Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann aber durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1). Sie ist bezüglich Aluminium als unauffällig zu bewerten:

Der hier für Graskultur ermittelte OmH liegt mit 80 mg/kg TM noch im Bereich des überregionalen OmH 56 mg/kg TM (VDI 3857/2), aber höher als der aktuelle OmH 40 mg/kg TM für den quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern (BayLfU 2022).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 32 mg/kg TM ist hingegen niedriger als der überregionale OmH 60 mg/kg TM (VDI 3957/3).

Anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) wird eine etwaig unterschiedliche Gesamtbelastung an den Messpunkten 2017–2022 veranschaulicht (Bild 3.1-2).

Am betriebsnahen Messpunkt des Flughafens MEF und an RNL als flughafenfernem Messpunkt traten für Graskultur schwach positive (0,5 – 1), überdurchschnittliche Werte auf.

An MWF, MEF, zudem an AWL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt, nicht aber an RNL, traten für Grünkohl schwach überdurchschnittliche Werte (0,5 – 1) auf.

An BIS, innerorts, und an VIF, naturnah, traten negative (-0,5 – -1), unterdurchschnittliche Werte für beide Bioindikatoren auf.

### **Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung**

Ein Futtermittel-Höchstgehalt, der als Beurteilungswert für Aluminiumgehalte in Graskulturen herangezogen werden könnte, ist nicht festgelegt. Maximale Immissions-Werte in Rinderfuttermitteln sowie in Schaf-futtermitteln (VDI 2310/44) betragen gleichermaßen 500 mg/kg bezogen auf 88 % TM (VDI 2310/44). Dieser Beurteilungswert von 568 mg/kg umgerechnet auf 100% TM (Tabelle 2.6-2) hat Empfehlungscharakter und ist auf Graskultur-Mittelwerte über die Vegetationsperiode zu beziehen. Die Graskultur-Mittelwerte lagen weit unterhalb einer Schwelle, ab der eine Gefährdung zu vermuten wäre.

### 3.2 Antimon in Graskultur und Grünkohl

Antimon (Sb) ist als Antimontrisulfid in Bremsbelägen enthalten und wird hauptsächlich aus Abrieb aus Bremsbelägen aus dem Straßenverkehr in die Umwelt eingetragen (BayLfU 2017). Antimon wird als krebserregend für den Menschen eingestuft (Savory & Wills 1984).

Antimon lag 2017–2021 in den Grasproben bis auf wenige Ausnahmen unterhalb den Bestimmungsgrenzen (BG 0,04 mg/kg TM bis 2019; 0,025 mg/kg TM ab 2020). Im Jahr 2022, nach Absenkung der BG auf 0,013 mg/kg TM, lag Antimon an den Messpunkten FMF und BIS sämtlich unterhalb BG und an AWL einmal. Die übrigen Werte in Graskultur lagen nahe der BG (2017, 2019 und 2022 an MEF und MWF, 2021 an MWF).

In den Grünkohlproben war Antimon mehrheitlich analytisch bestimmbar (BG: 0,02 mg/kg TM): Während die Gehalte 2021 unterhalb BG lagen – mit Ausnahme von 0,041 mg/kg TM an MEF und 0,025 mg/kg TM an MWF – lagen sie 2022 nur an BIS <BG und reichten bis 0,055 mg/kg TM an MWF. Dies entspricht in etwa dem Bereich 2017–2019 von <0,02–0,096 mg/kg TM. Eine höhere Spannweite zeigten die Antimonwerte in Grünkohl 2018, analog Aluminium (Bild 3.2-1; vgl. Kapitel. 3.1).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Für Graskultur konnte kein OmH ermittelt werden, da mehr als 75% der Werte unterhalb BG lagen. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 0,035 mg/kg TM. Es ist von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt, da die Standardunsicherheit nicht bekannt ist (Kap.2.6).

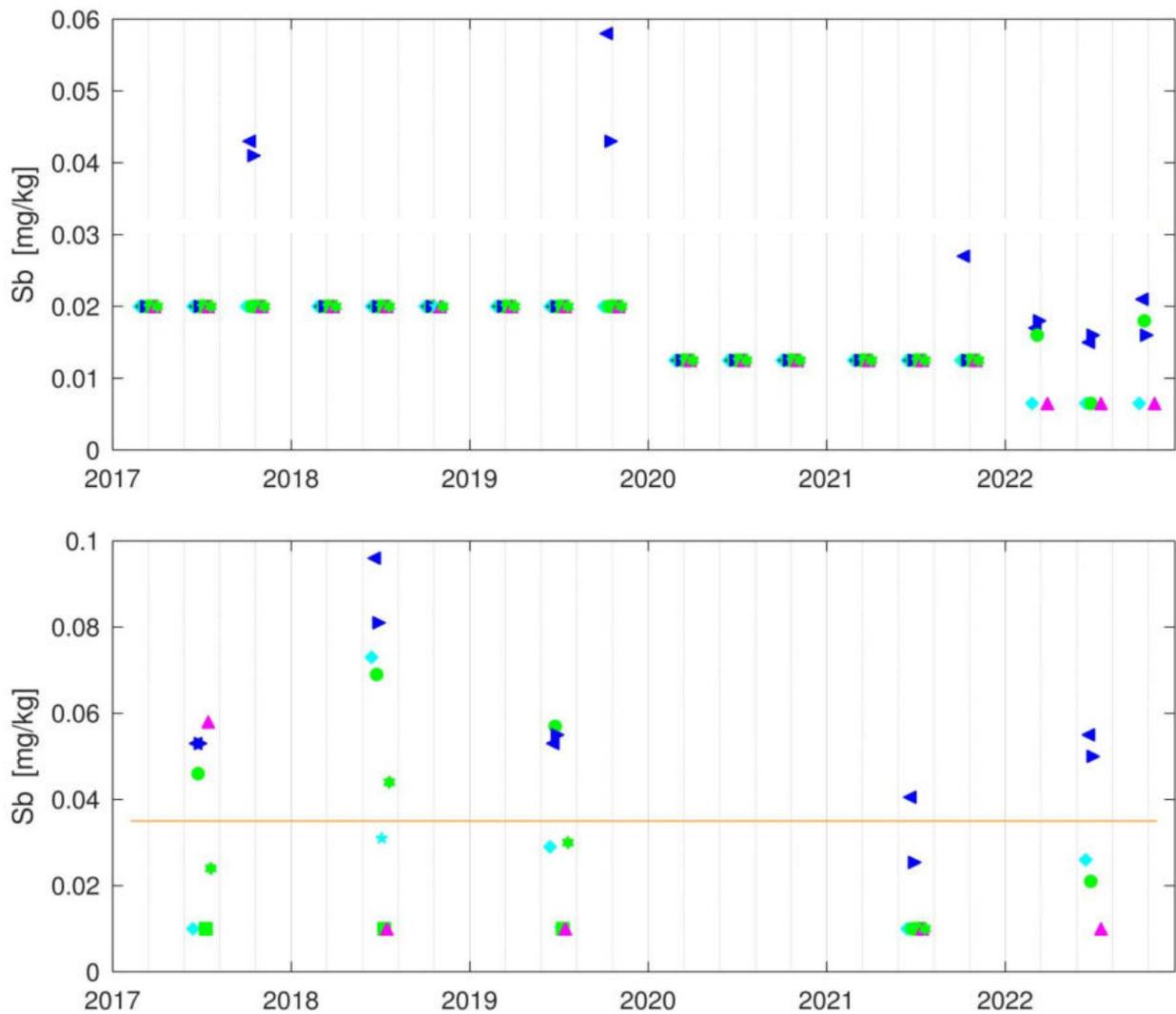
Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 37 Werten traten 11 OmH-Überschreitungen auf: 2017 an den Messpunkten BIS, MEF und MWF, 2018 an AWL, FMF, MEF und MWF, 2019 an AWL, MEF und MWF sowie 2022 an MWF (Tabelle 3.2-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet 2017–2022 für Grünkohl an MEF und MWF ein relevanter und für AWL ein schwacher Immissionseinfluss für Antimon vor.

**Tabelle 3.2-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Antimon zu den Messpunkten**

| Antimon    | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit <i>u</i> | Messpunkt  | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|-------------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | >75% Werte <BG | -                             |            |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Grünkohl   | 0,035          | -                             | 5 Werte/MP | 1   | 4   | 2   | 3   | 0   | 0   | 1   | 0   |

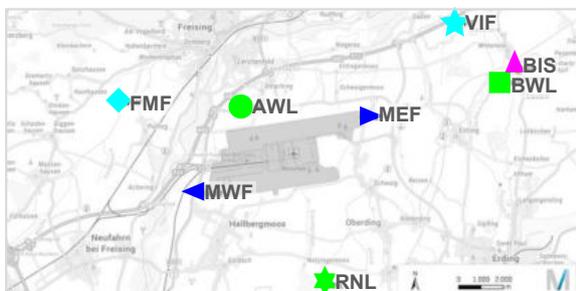
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Bild 3.2-1 zeigt, dass nur 2021 keine Antimongehalte in Grünkohl oberhalb OmH auftraten, sich aber die Wertebereiche 2017–2022 überschneiden. Ein Einfluss des Flughafenbetriebs, der aus dem Gleichlauf von Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen 2021 gegenüber 2017–2019 und dem Anstieg der Flugzahlen 2022 auf rund 70 % des Vor-Corona-Niveaus hervorginge, deutet sich für Grünkohl an, wird aber nicht deutlich. Es gilt hier die Entwicklung in den kommenden Jahren zu beobachten und soweit möglich die Bestimmungsgrenze für Antimon in Graskultur noch weiter abzusenken.



**Bild 3.2-1: Antimongehalte in Graskultur (oben) und in Grünkohl 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); für die Gehalte in Graskultur konnte kein OmH ermittelt werden, da lediglich 13 von 135 Werten oberhalb BG lagen; die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
  - ★ ● ■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
  - ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
  - ▶ ◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen
- [Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Durch den relativen Messpunktvergleich werden serienweise Schwankungen eliminiert und die Streuung, die bezüglich Antimongehalten in Grünkohl 2018 höher war als davor und danach, relativiert. Z-Mittelwerte für Graskultur wurden nicht gebildet, da von 134 Werten nur 13 oberhalb BG lagen.

Der Messpunktvergleich anhand normierter Z-Werte (Bild 3.2-2, vgl. Kapitel 2.6) für Grünkohl zeigt:



An MWF und MEF als betriebsnahen Messpunkten des Flughafens traten positive (rund 1), überdurchschnittliche Werte auf.

An BWL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt und an VIF, naturnah, traten schwach negative (-0,5 – -1), also unterdurchschnittliche Werte auf.

Die Messpunktastufungen in Bild 3.2-2 korrespondieren mit einem aktuellen Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt (BayLfU 2019) und weisen auf Bremsabrieb und Aufwirbelung von antimonhaltigen Stäuben von Straßen und versiegelten Oberflächen im Nahbereich des Flughafens hin.

**Bild 3.2-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Antimon 2017–2022**

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich für Grünkohl und anhand anderer Biomonitorings für Graskultur eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1). Sie ist bezüglich Antimon – abgesehen von den festgestellten Immissionswirkungen oberhalb OmH – als unauffällig niedrig zu bewerten:

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 0,035 mg/kg TM ist deutlich niedriger als der überregionale OmH 0,094 mg/kg TM für Antimon (VDI 3957/3).

Dass die Antimongehalte im niedrigen Hintergrundbereich liegen, bestätigen aktuelle Graskultur-Biomonitorings (Wäber und Pompe 2023 und 2022a, BayLfU 2022):

- <0,0135–058 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2022;
- <0,010–0,058 mg/kg TM im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022;
- <0,010–0,055 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER 2013, 2015, 2022;
- <0,05 mg/kg TM 2017–2020 (>75 % der Werte) und 0,0025+/-0,016 in 2021 als Mittelwert ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern 2017–2021.

### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Beurteilungswerte für eine Gefährdungsabschätzung liegen für Antimon nicht vor.

### 3.3 Bismut in Graskultur und Grünkohl

Bismut (Bi) kommt z. B. als Bestandteil von Legierungen, in Pigmenten und als Bleiersatz in Schrotpatronen vor. Bismut kann im Verkehr aus Abrieb von Bremsbelägen freigesetzt werden (Hombrecher et al 2019, BayLfU 2017, BayLfU 2019). Auf den Menschen kann es in hohen Konzentrationen toxisch – ähnlich einer Quecksilbervergiftung – wirken.

Bismut war 2017–2022 mehrheitlich analytisch bestimmbar (BG 0,005 mg/kg TM bis 2019 und 0,0025 mg/kg TM ab 2020).

Die Bismutgehalte in Graskultur lagen 2020 mit <0,0025–0,011 mg/kg TM und 2021–2022 mit <0,0025–0,013 mg/kg TM im Bereich von 2017–2019 von <0,005–0,015 mg/kg TM – wenn man die beiden Maxima am Messpunkt MEF 2019 mit 0,047 und 0,035 mg/kg TM ausnimmt (Bild 3.3-1 oben).

Die Bismutgehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 0,0028–0,012 mg/kg TM ebenfalls im Bereich der Vorjahre von 0,0039–0,055 mg/kg TM (Bild 3.3-1 unten). Eine höhere Spannweite zeigten die Bismutwerte 2018, analog Aluminium und Antimon (Bild 3.1-1 und Bild 3.2-1; vgl. Kapitel. 3.1 und 3.2).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,0090 mg/kg TM, der für Grünkohl 0,026 mg/kg TM. Da für beide keine Standardunsicherheit bekannt ist, muss der betrachtete Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  betragen, um von einem Immissionseinfluss auszugehen (Kapitel 2.6).

Bei den insgesamt 134 Graskulturwerten wurden 4 OmH-Überschreitungen festgestellt: in der 1. und 3. Serie 2019 am Messpunkt MEF, in der 5. Serie 2017 und 2019 am Messpunkt MWF (Tabelle 3.3-1). Bei den 37 Grünkohlwerten 2017–2019 und 2021–2022 trat 1 OmH-Überschreitung 2018 an MEF auf. Folglich lag im Untersuchungsgebiet 2017–2022 an MEF vereinzelt ein schwacher, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Bismut vor.

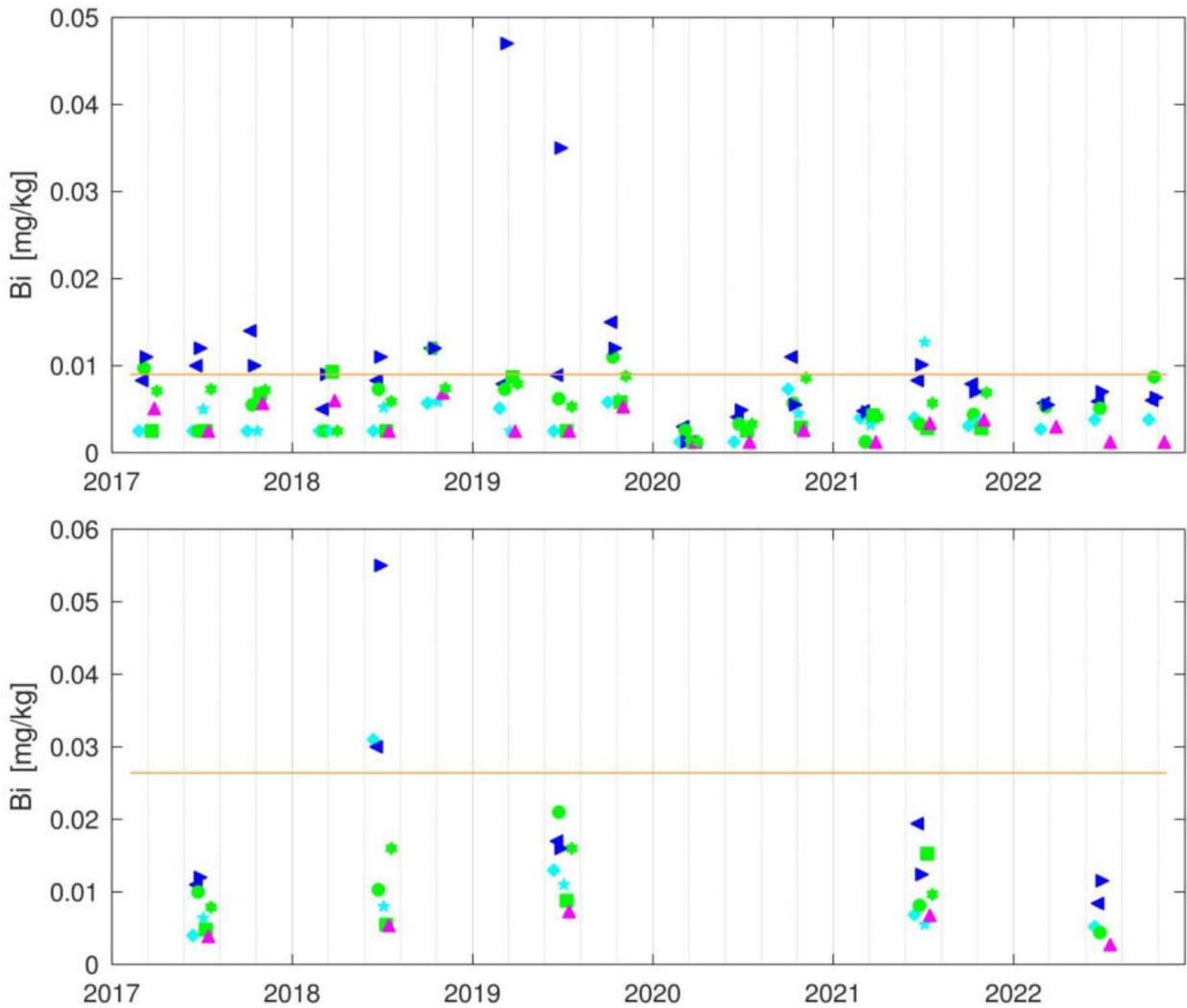
**Tabelle 3.3-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Bismut zu den Messpunkten**

| Bismut     | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit <i>u</i> | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|-------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 0,0090         | -                             | 18 Werte/MP | 0   | 2   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Grünkohl   | 0,026          | -                             | 5 Werte/MP  | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

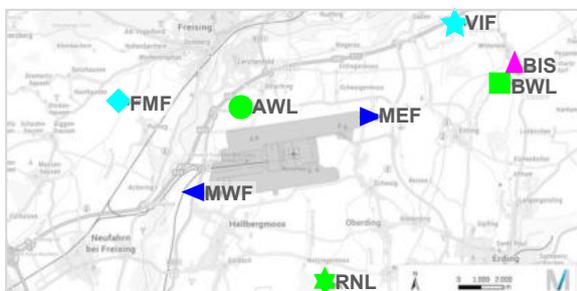
Eine vergleichsweise höhere Spannweite zeigten die Bismutgehalte in Grünkohl 2018 – analog den Aluminium- und Antimongehalten (Kapitel 2.6 und 3.2).

Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde (Bild 3.3-1, vgl. Bild 1.3-1) wird nicht deutlich – insbesondere da die Ergebnisse 2022, bei gegenüber 2020–2021 deutlich gestiegenen Flugzahlen, weiterhin in niedrigen engen Bereichen lagen, vergleichbar mit denen der beiden Coronajahre.



**Bild 3.3-1: Bismutgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



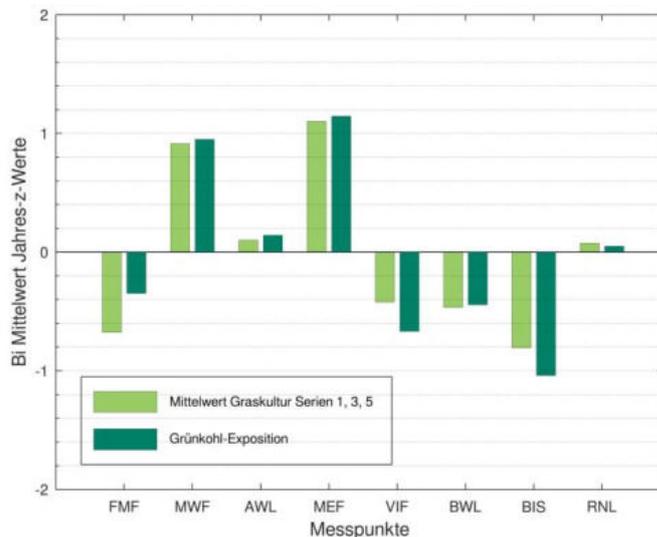
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
- ★ ● ■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
- ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
- ▶ ◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

**Messpunktastufung und Quellenzuordnung:**

Anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) wird eine etwaig unterschiedliche Gesamtbelastung an den Messpunkten in Bild 3.3-2. 2017–2022 veranschaulicht:



**Bild 3.3-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Bismut 2017–2022**

An MWF und MEF als betriebsnahen Messpunkten des Flughafens traten für Graskultur und Grünkohl positive (rund 1), überdurchschnittliche Werte auf.

An BIS, innerorts, und schwächer an FMF (für Gras) und VIF (für Grünkohl), naturnah sowie sehr schwach an BIS, innerorts, traten unterdurchschnittliche Werte (-0,5 – -1) auf.

Der relative Messpunktvergleich zeigt eine Abstufung, obwohl die Bismutgehalte mit wenigen Ausnahmen im Hintergrundbereich lagen. An den betriebsnahen Messpunkten des Flughafens kommen der Bodenbetrieb und Aufwirbelung und Abdrift bismuthaltiger Stäube von den dortigen versiegelten Oberflächen als Quellen in Frage.

#### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Der Vergleich der Hintergrundbelastung im Untersuchungsgebiet mit anderen Gebieten anhand OmH-Vergleich (Tabelle 2.6-1) zeigt, dass diese nicht als hoch zu bewerten ist:

Der für Bismut in Grünkohl ermittelte OmH von 0,026 mg/kg TM entspricht dem überregionalen OmH 0,030 mg/kg TM (VDI 3957/3).

Für den OmH für Graskultur von 0,0090 mg/kg TM liegen keine Vergleichs-OmH vor. Der Mittelwert für das Untersuchungsgebiet um den Flughafen München ohne betriebsnahe Messpunkte MEF und MWF lag mit 0,045 mg/kg TM im Bereich des mittleren quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern um 0,0037 mg/kg TM 2012–2021 (BayLfU 2022).

#### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Beurteilungswerte für eine Gefährdungsabschätzung liegen für Bismut nicht vor.

### 3.4 Blei in Graskultur und Grünkohl

Blei (Pb) gelangt aus Kohleverbrennung und vornehmlich bei der Bodenbearbeitung aus früheren Einträgen wieder in die Umwelt, sowie aus Mineraldüngern oder Klärschlamm (Rentz und Martel 1998, UBA 2014). Nach Recherche des BayLfU (2019) kann es auch aus Bremsabrieb und Motorverschleiß stammen.

Blei war 2017–2022 in mehrheitlich in den Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM).

Die Bleigehalte in Graskultur lagen 2020–2021 mit <0,05–0,13 mg/kg TM und 2022 mit <0,05–0,18 mg/kg TM im Bereich der Vorjahreswerte <0,05–0,26 mg/kg TM, die in einigen Serien höhere Spannweiten zeigten.

Während die Bleigehalte in Grünkohl 2021 nur in 2 von Fällen oberhalb und nahe BG lagen (0,055 mg/kg TM an MEF und 0,067 mg/kg TM an MWF), reichten sie 2022 von <0,050 mg/kg TM an AWL und BIS bis 0,087 mg/kg TM an MEF. Sie lagen damit im Bereich der Werte 2017–2019 von <0,05–0,21 mg/kg TM.

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,16 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  15 %. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 0,11 mg/kg TM. Da für Grünkohl keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (Kap.2.6).

Von den für Graskultur 2017–2022 im Untersuchungsgebiet ermittelten 134 Werten überschritten 8 den OmH: 2017 in der 1. Serie an den Messpunkten AWL, BIS, BWL, FMF, MEF und in der 3. Serie an MWF sowie 2019 in der 5. Serie an MEF und MWF.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 37 Werten trat 1 OmH-Überschreitung auf: 2018 am Messpunkt MEF (Tabelle 3.4-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet an MEF ein allenfalls schwacher, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Blei vor.

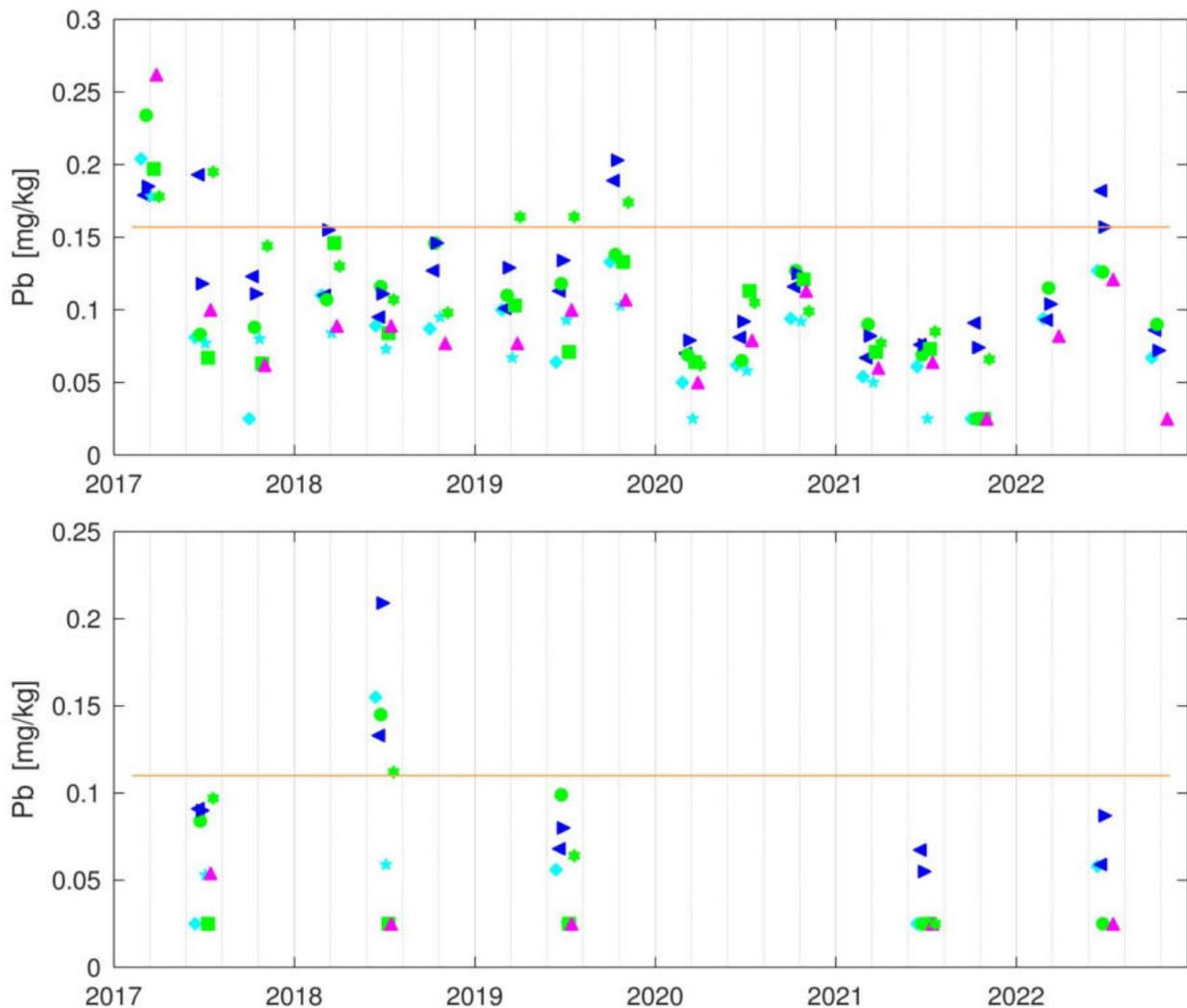
**Tabelle 3.4-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Blei zu den Messpunkten**

| Blei       | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 0,16           | 15 %                     | 18 Werte/MP | 1   | 2   | 1   | 2   | 0   | 1   | 1   | 1   |
| Grünkohl   | 0,11           | -                        | 5 Werte/MP  | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

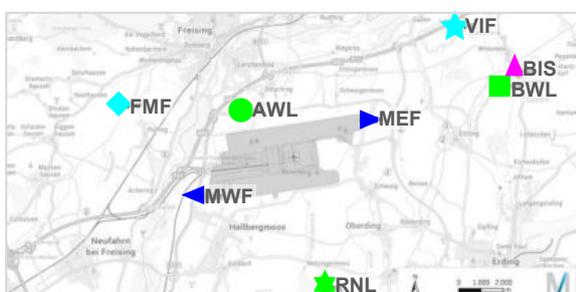
Die Wertekollektive von Graskultur und Grünkohl schwanken von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf (Bild 3.4-1). Eine vergleichsweise höhere Spannweite zeigten die Bleigehalte in Grünkohl 2018 – analog den Aluminium-, Antimon- und Bismutgehalten (Kapitel 3.1 und 3.2, 3.3).

In den Coronajahren 2020 und 2021 traten keine Werte oberhalb OmH auf. Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden allerdings nicht deutlich – insbesondere vor dem Hintergrund der niedrigen Bleigehalte in den Graskulturen der Serien 1 und 5 und in Grünkohl 2022.



**Bild 3.4-1: Bleigehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blossorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

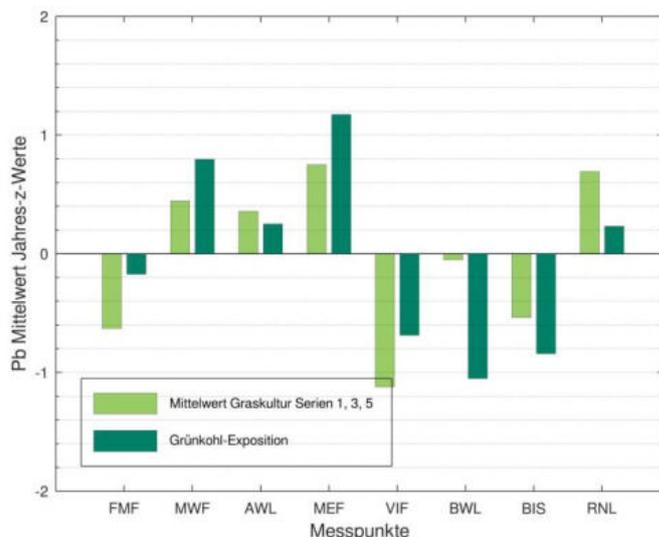
- ◆ ★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
- ★ ● ■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
- ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
- ▶ ◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Die Bleigehalte lagen mit wenigen Ausnahmen unterhalb der Schwelle für einen Immissionseinfluss, im Hintergrundbereich. Anhand normierter Z-Werte in Bild 3.4-2 (vgl. Kapitel 2.6) werden Schwankungen

eliminiert und die Streuung relativiert, um im relativen Messpunktvergleich etwaig unterschiedliche Gesamtbelastungen sichtbar zu machen. An MWF und MEF, betriebsnah am Flughafen traten überdurchschnittliche Werte (0,5–1) auf, zudem an RNL (für Graskultur) als landwirtschaftlichem Messpunkt.



**Bild 3.4-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Blei 2017–2022**

An VIF, naturnah, und BIS, innerorts, traten unterdurchschnittliche (-0,5 – -1) Werte auf. An BWL, als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt, traten für Grünkohl unterdurchschnittliche Werte sowie für FMF für Graskultur.

An den betriebsnahen Messpunkten des Flughafens könnten landwirtschaftliche Bodenbearbeitung sowie Erdbauarbeiten Staubverfrachtungen auf die versiegelten Flughafenflächen – als indirekte Quelle – bewirken.

Vermutlich werden bleihaltige Stäube durch Wind, Verkehr und Flugverkehr von dort wieder aufgewirbelt. Dieses Ergebnis fällt ähnlich zu Aluminium aus (Kapitel 3.1) und korrespondiert mit einem aktuellen Graskultur-Biomonitoring:

Dies zeigte, dass Straßenverkehr für Blei keine wesentliche direkte Quelle ist (BayLfU 2019). Vielmehr wurde Bodenaufwirbelung im Nahbereich als indirekte Quelle für Blei identifiziert.

#### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet bezüglich Blei kann anhand OmH-Vergleich für Graskultur und Grünkohl sowie anhand anderer Biomonitorings für Graskultur eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1):

Der für Graskultur ermittelte OmH von 0,16 mg/kg TM ist deutlich niedriger als der überregionale OmH 0,36 mg/kg TM der Richtlinie VDI 3857 Blatt 2.

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 0,11 mg/kg TM ist ebenfalls deutlich niedriger als der überregionale OmH 0,23 mg/kg TM der Richtlinie VDI 3957 Blatt 3.

Hintergrundbereich und Wertebereich im Umfeld des Flughafens München 2017–2022 liegen eher niedrig, im unteren Bereich von Hintergrund und Wertespannen aktueller Graskultur-Biomonitorings (Wäber und Pompe 2023 und 2022a, BayLfU 2022):

- <0,05–0,26 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2022
- 0,13–0,70 mg/kg TM im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022;
- 0,09–0,47 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER 2013, 2015, 2022;
- <0,20 mg/kg TM (>75 % der Werte) an ländlichen Hintergrundmesspunkten in Bayern 2017–2021.

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet ist bezüglich Blei als unauffällig niedrig zu bewerten.

### **Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung**

Die wichtigste Aufnahmequelle von Blei für den Menschen ist die Nahrung. Aufgrund der ökotoxischen Bedeutung und Anreicherung über die Nahrungskette (Umweltatlas Hessen 2005) ist für Blei ein Höchstgehalt von 30 mg/kg bezogen auf 88 % TM gemäß Futtermittelverordnung (FuttMV) festgesetzt. Die Richtlinie VDI 2310 Blatt 27 definiert Maximale Immissions-Werte als langfristige Empfehlungswerte. Deren Spanne in Rinderfuttermitteln reicht von 0,9 bis 1,3 mg/kg und in Schaffuttermitteln von 4 bis 6 mg/kg bezogen auf 88 % TM. Der Futtermittel-Höchstgehalt von umgerechnet 34 mg/kg TM (Tabelle 2.6-2) wurde von den Bleigehalten in Graskulturen weit unterschritten. Die mittleren Bleigehalte über die Vegetationszeit unterschritten den unteren Wert der Spanne für Maximale Immissions-Werte in Rinderfuttermitteln von umgerechnet 1,0 mg/kg TM ebenfalls. Von einer Gefährdung ist nicht auszugehen.

Orientierend kann ein Höchstgehalt nach europäischem Lebensmittelrecht herangezogen werden, der für verzehrfertig aufbereitete und damit gewaschene Blattkohl-Lebensmittel gilt (VO (EU) 2015/1005 mit 2021/1317): 0,30 mg/kg bezogen auf Frischmasse. Der höchste, im ungewaschenen Bioindikator Grünkohl gemessene Bleiwert am Messpunkt MEF beträgt umgerechnet auf Frischmasse 0,032 mg/kg FM (vgl. Messbericht 2018). Er liegt damit nur auf 11 % des Höchstgehalts für Blattkohl-Lebensmittel.

### 3.5 Chrom in Graskultur und Grünkohl

Laut Umweltbundesamt (UBA 2022) wird Chrom (Cr) überwiegend im Transport, vor allem im Straßenverkehr freigesetzt – wie Antimon aus Bremsbelägen (Peichl et al. 1994). Als Spurenelement ist Chrom lebensnotwendig. „Für die toxischen Eigenschaften sind die sechswertigen Chromverbindungen verantwortlich. Sie wirken ätzend auf Haut und Schleimhaut, können unter anderem Leber- und Nierenschäden verursachen und haben karzinogene (krebserregende) Wirkung“ (Umweltatlas Hessen 2005).

Chrom war 2017–2022 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (Bestimmungsgrenze BG: 0,025 mg/kg TM).

Die Chromgehalte in Graskultur lagen 2022 mit 0,21–0,36 mg/kg TM in einem sehr engen Bereich, im Bereich der Vorjahreswerte 0,054–0,42 mg/kg TM. Ausnahme bildet das Maximum in der 1. Graskulturserie 2019 an Messpunkt AWL, das mit 1,78 mg/kg TM deutlich höher lag. Wie die Aluminiumgehalte (Kapitel 3.1), waren die Chromgehalte in der 5. Serie Graskultur 2019 insgesamt tendenziell höher (Bild 3.5-1).

Die Chromgehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 0,10–0,23 mg/kg TM wie 2021 eher im unteren Bereich der Werte seit 2017 von 0,069–0,37 mg/kg TM (2020 keine Messung; Bild 3.5-1 unten).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,35 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  22 %.

Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt ebenfalls 0,35 mg/kg TM. Von einem Immissionseinfluss ist auszugehen, wenn der Gehalt in Grünkohl  $\geq 1,5 \cdot$  OmH beträgt, da keine Standardunsicherheit bekannt ist (Kap.2.6).

Für Graskultur trat nur 1 OmH-Überschreitung bei den insgesamt 134 Werten auf: in der 1. Serie 2019 an Messpunkt MWF der Maximalwert 1,78 mg/kg TM.

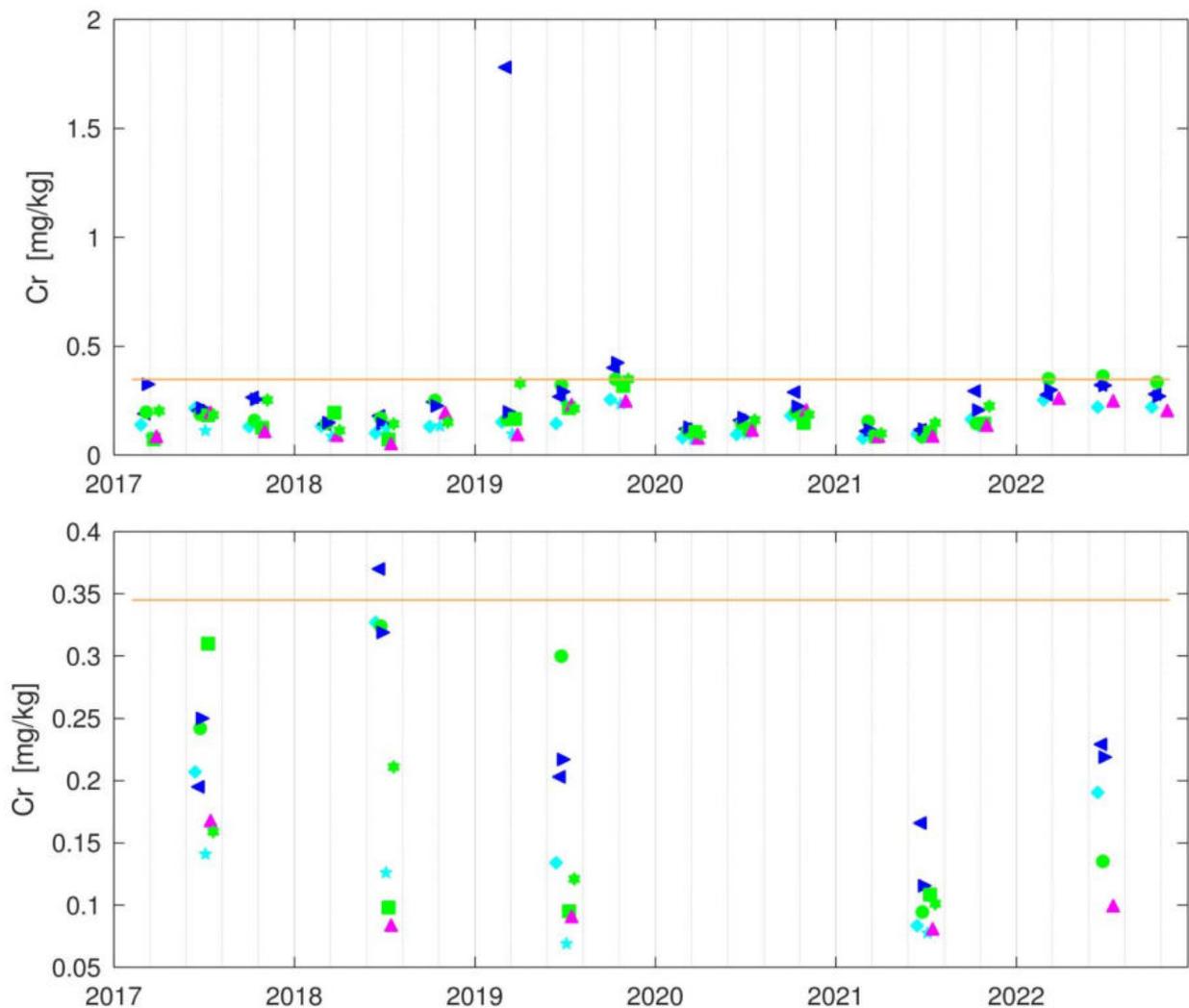
Für 37 Grünkohlwerte trat 2017–2019 und 2021–2022 keine OmH-Überschreitung auf (Tabelle 3.5-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet kein relevanter Immissionseinfluss für Chrom vor.

**Tabelle 3.5-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Chrom zu den Messpunkten**

| Chrom      | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 0,35           | 22 %                     | 18 Werte/MP | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Grünkohl   | 0,35           | -                        | 5 Werte/MP  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

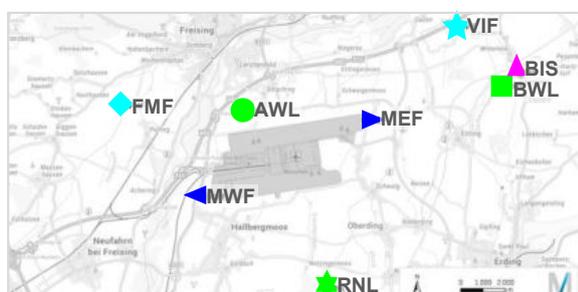
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Wie eingangs für Aluminium ausgeführt (Kapitel 3.1) schwanken die Wertekollektive der Bioindikatoren von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf, weil sie äußeren Einflüssen, z. B. der Witterung, unterliegen, die auch auf die Vegetation wirken. Für Chrom in Graskultur deutete sich bis 2021 ein saisonaler Verlauf an: mit vergleichsweise niedrigsten Gehalten in Serie 1 (Mai) und tendenziell höchsten in Serie 3 (Mitte August bis Mitte September). Die Ursache ist unbekannt. Im Jahr 2022 lagen die Chromgehalte in Graskulturen aber in den 3 Serien in etwa gleichauf.



**Bild 3.5-1: Chromgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



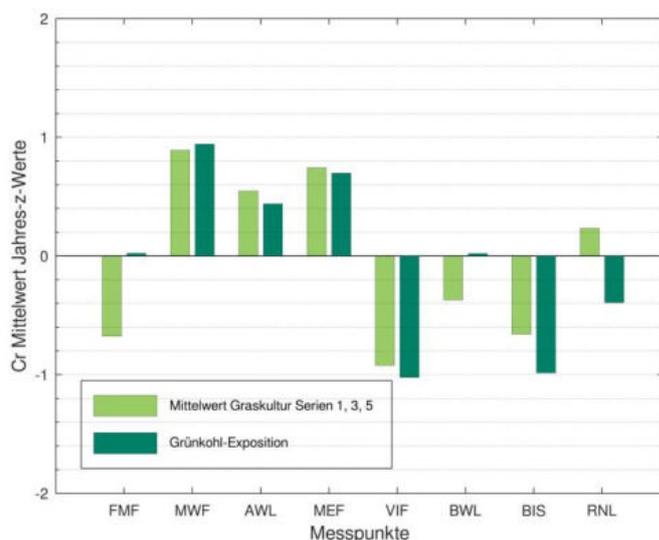
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
- ★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
- ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
- ▶▶ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen und dem Wiederanstieg 2022 auf rund 70 % des Vor-Corona-Niveaus korrespondieren würde, deutet sich für die flughafennahen Messpunkte MWF und MEF an (blaue Symbole in Bild 1.3-1), tritt aber nicht deutlich hervor. Die weitere Entwicklung gilt es daher zu beobachten.

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:



**Bild 3.5-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Chrom 2017–2022**

Obwohl die Chromgehalte mit einer Ausnahme unterhalb der Schwelle für einen Immissionseinfluss lagen, können anhand normierter Z-Werte (Bild 3.5-2; vgl. Kapitel 2.6) relative Messpunktunterschiede sichtbar gemacht werden:

An MWF und MEF als betriebsnahen Messpunkten des Flughafens traten für Graskultur und Grünkohl schwach überdurchschnittliche Werte (0,5 – 1) auf, zudem schwächer an AWL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt.

An VIF, naturnah, und an BIS, innerorts, traten für beide Bioindikatoren unterdurchschnittliche Werte auf (-0,5 – -1), sowie an FMF, naturnah, für Graskultur.

Die überdurchschnittlichen Werte an MWF und MEF lassen Verkehr und Flughafenbodenbetrieb als direkte Nahquellen vermuten, die überdurchschnittlichen Werte an AWL Bodenbearbeitung. Das Ergebnis korrespondiert mit einem Graskultur-Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt (BayLfU 2019): Straßen mit Bremsabrieb von Fahrzeugen als direkte Quelle und Staubverwehungen als indirekten Quellen wurden dort als wesentliche Ursache für Chromanreicherungen identifiziert.

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet bezüglich Chrom kann anhand OmH-Vergleich für Graskultur und Grünkohl sowie anhand anderer Biomonitorings für Graskultur eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1):

Der für Graskultur ermittelte OmH von 0,35 mg/kg TM ist niedriger als der überregionale OmH 0,51 mg/kg TM (VDI 3857/2).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 0,35 mg/kg TM ist geringfügig niedriger als der überregionale OmH 0,46 mg/kg TM (VDI 3957/3).

Hintergrundbereich und Wertebereich im Umfeld des Flughafens München 2017-2022 liegen im Bereich aktueller Graskultur-Biomonitorings (Wäber und Pompe 2023 und 2022a, BayLfU 2022):

- 0,054–0,42 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2021 (Einzelwert: 1,78 mg/kg);
- 0,10–0,65 mg/kg TM im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022 mit maximalem Einzelwert: 2,1 mg/kg;
- 0,13–0,69 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER 2013, 2015, 2022;
- <0,20 mg/kg TM an ländlichen Hintergrundmesspunkten in Bayern 2017–2021.

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet ist bezüglich Chrom als unauffällig niedrig zu bewerten.

### **Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung**

Ein Futtermittel-Höchstgehalt ist für Chrom nicht festgelegt. Maximale Immissions-Werte in Rinderfuttermitteln sowie in Schaffuttermitteln (VDI 2310/44) betragen gleichermaßen 50 mg/kg bezogen auf 88 % TM (VDI 2310/44). Dieser Beurteilungswert von 57 mg/kg umgerechnet auf 100% TM (Tabelle 2.6-2) ist auf Graskultur-Mittelwerte über die Vegetationsperiode zu beziehen. Die Graskultur-Mittelwerte lagen weit unterhalb einer Schwelle, ab der eine Gefährdung zu vermuten wäre.

### 3.6 Eisen in Graskultur und Grünkohl

Eisen (Fe) ist bezogen auf den Massenanteil, nach Sauerstoff, Silicium und Aluminium das vierthäufigste Element in der Erdkruste und das zweithäufigste Metall. Eisen gilt daher, neben Aluminium, als Indikator für geogenen Staubeintrag (aus dem Boden) und anthropogenen Staubeintrag (durch den Menschen). Es wird bei der Eisen- und Stahlerzeugung freigesetzt und kann auch aus dem Verkehr von Bremsabrieb sowie Motorverschleiß stammen (BayLfU 2019).

Eisen war 2017–2022 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,25 mg/kg TM). Die Eisengehalte in Graskultur lagen 2022 mit 67–119 mg/kg TM im Bereich der Vorjahreswerte von 43–139 mg/kg TM (Bild 3.6-1oben).

Die Eisengehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 57–109 mg/kg TM ebenfalls im Bereich der Werte seit 2017 von 44–237 mg/kg TM (2020 keine Messung; Bild 3.6-1 unten). Ein maximaler Einzelwert wurde in Grünkohl am Messpunkt AWL mit 399 mg/kg TM 2017 gemessen.

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 100 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  16 %. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 166 mg/kg TM. Da für Grünkohl keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (Kap. 2.6).

Bei den für Graskultur 2017–2022 im Untersuchungsgebiet insgesamt 126 Werten (1. Serie 2019 keine Eisenanalysen) wurden 2 OmH-Überschreitungen festgestellt: in den jeweils 5. Serien 2017 und 2019 am Messpunkt RNL.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 37 Werten trat eine OmH-Überschreitung auf: 2017 an Messpunkt AWL (Tabelle 3.6-1).

Folglich lag im Untersuchungsgebiet 2018 und 2019 für Grünkohl an RNL nur temporär ein schwacher, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Eisen vor.

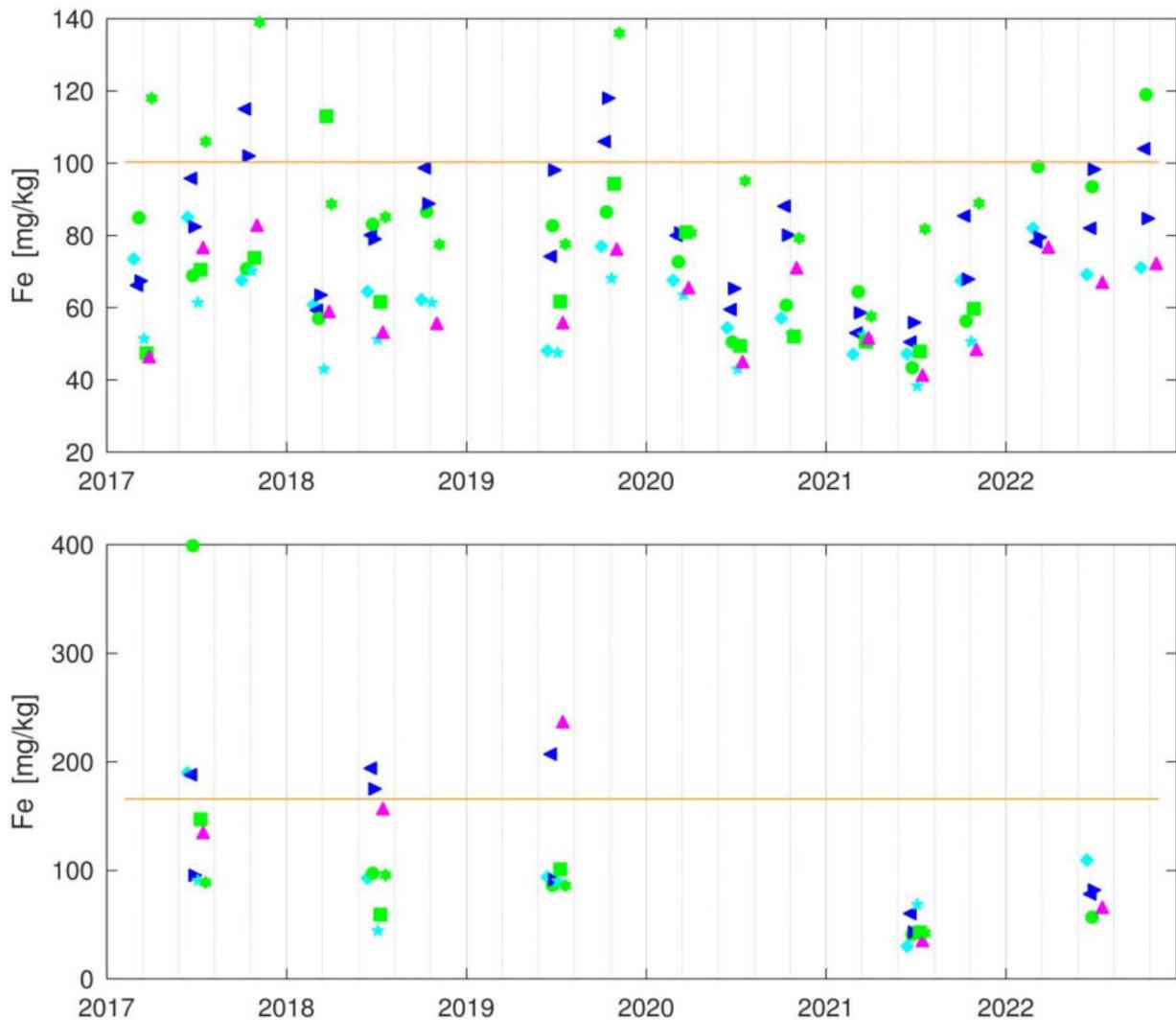
**Tabelle 3.6-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Eisen zu den Messpunkten**

| Eisen      | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 100            | 16 %                     | 17 Werte/MP | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   |
| Grünkohl   | 166            | -                        | 5 Werte/MP  | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

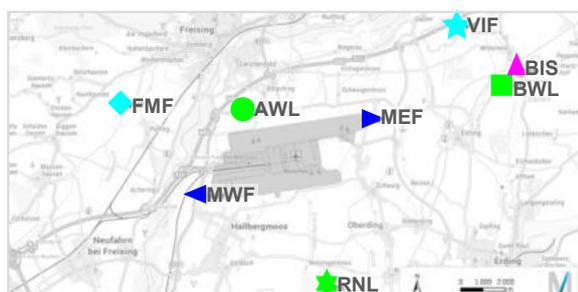
Ähnlich zu Aluminium (Kapitel 3.1) schwanken auch die Wertekollektive von Eisen in Graskultur und Grünkohl von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf. Die Bioindikatoren integrieren die Witterungseinflüsse, die auch auf die Vegetation wirken. Metallhaltiger Staub kann von der Blattoberfläche vom Wind oder durch Regenwasser wieder entfernt werden. Zudem kann bei Eisen die Witterung einzelner besonders feuchter oder trockener Expositionsserien die Aufnahme dieses Spurenelements aus dem Substrat beeinflussen (VDI 3857/2). In den Jahren 2020 und 2021 traten keine Werte oberhalb OmH auf. Die Gehalte in Graskulturen 2020 mit 43–95 mg/kg TM und 2021 mit 38–89 mg/kg TM lagen relativ eng im unteren Bereich der Werte in den

Vor-Coronajahren. Für Grünkohl lag 2021 mit 30–69 mg/kg TM ein vergleichbar niedriges enges Wertekollektive vor (Bild 3.6-1 unten). Allerdings auch in anderen Untersuchungsjahren ebenfalls niedrige enge Wertebereiche ermittelt (Messberichte 2012 und 2015, ohne Darstellung). Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden nicht deutlich. Die künftige Entwicklung bleibt zu beobachten.



**Bild 3.6-1: Eisengehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

◆ ★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld

★ ● ■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld

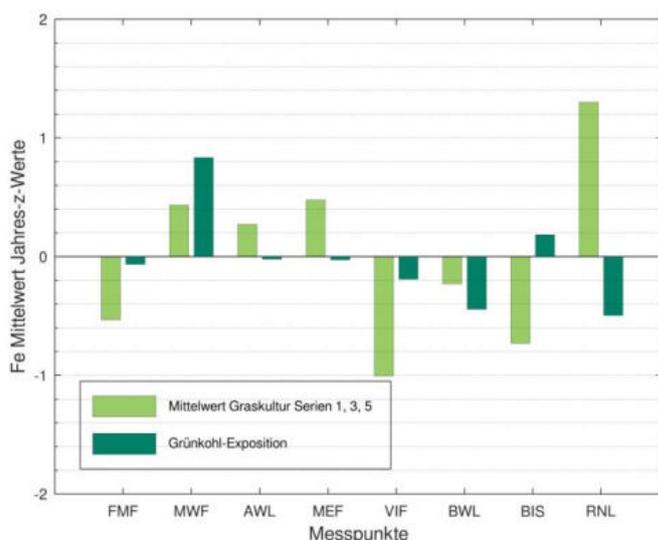
▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich

▶ ◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Der relative Messpunktvergleich ermöglicht serienweise Schwankungen zu eliminieren und die Streuung zu relativieren. Anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) wird eine etwaig unterschiedliche Gesamtbelastung an den Messpunkten 2017–2022 veranschaulicht (Bild 3.6-2).



**Bild 3.6-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Eisen 2017–2022**

An RNL als flughafenfernem, landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt traten für Graskultur positive (rund 1), überdurchschnittliche Werte auf. An MWF und MEF, betriebsnah am Flughafen, traten für Graskultur schwach (rund 0,5) überdurchschnittliche Werte auf. An MWF traten für Grünkohl überdurchschnittliche Werte auf (rund 1).

An VIF und FMF, naturnah, und an BIS, innerorts, traten unterdurchschnittliche Werte (-0,5 – -1) für Graskultur auf, zudem schwach und an RNL für Grünkohl.

Saisonale, schwache Eisenquellen im Nahbereich kommen als Ursachen für die Messpunktastufung in Frage, etwa landwirtschaftliche Bodenbearbeitung mit entsprechender Staubverwehung, auch – als indirekte Quellen – von versiegelten Verkehrsflächen.

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann zunächst durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1):

Der für Graskultur ermittelte OmH 100 mg/kg TM stimmt sowohl mit dem überregionalen OmH 103 mg/kg TM gut überein (VDI 3857/2), als auch mit dem aktuellen OmH für den quellenfernen ländlichen Hintergrund 84 mg/kg TM (BayLfU 2022).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 166 mg/kg TM stimmt ebenfalls mit dem überregionalen OmH 154 mg/kg TM (VDI 3957/3) überein.

Der Hintergrundbereich im Umfeld des Flughafens München für Graskultur 2017-2022 kann zudem mit dem Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt an quellenfernen Hintergrundmesspunkten verglichen werden (BayLfU 2022) und zeigt, die Wirkungssituation ist bezüglich Eisen unauffällig.

- 38–139 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2022;
- 43+/-7 mg/kg TM bis 68+/-17 mg/kg TM als Mittelwerte ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern 2017-2021.

### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Beurteilungswerte für eine Gefährdungsabschätzung liegen für Eisen nicht vor.

### 3.7 Kupfer in Grünkohl

Der Straßenverkehr stellt die Hauptquelle für Kupfer (Cu) dar (UBA 2022). So konnte in Depositionsuntersuchungen der Kfz-Verkehr (Bremsbelag- und Reifenabrieb) als relevante Quelle von Kupfer identifiziert werden (BayLfU 2017). Einerseits ist Kupfer als Spurenelement lebensnotwendig, andererseits hat es ökotoxische Eigenschaften.

Der Gehalt von Kupfer in Graskulturen kann über die Aufnahme aus dem Substrat in relevantem Maß beeinflusst sein (VDI 3857/2). Da dies die Eignung des Verfahrens, Kupfer über den Luftpfad zu erfassen, einschränkt, wird Kupfer in diesem Biomonitoring aktuell nicht mehr mit Graskultur untersucht.

Kupfer war 2017–2022 in allen Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM). Die Kupfergehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 0,9–1,9 mg/kg TM im Bereich der Vorjahreswerte 1,0–4,3 mg/kg (Bild 3.9-1).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 3,4 mg/kg TM. Da für Grünkohl keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (Kap. 2.6).

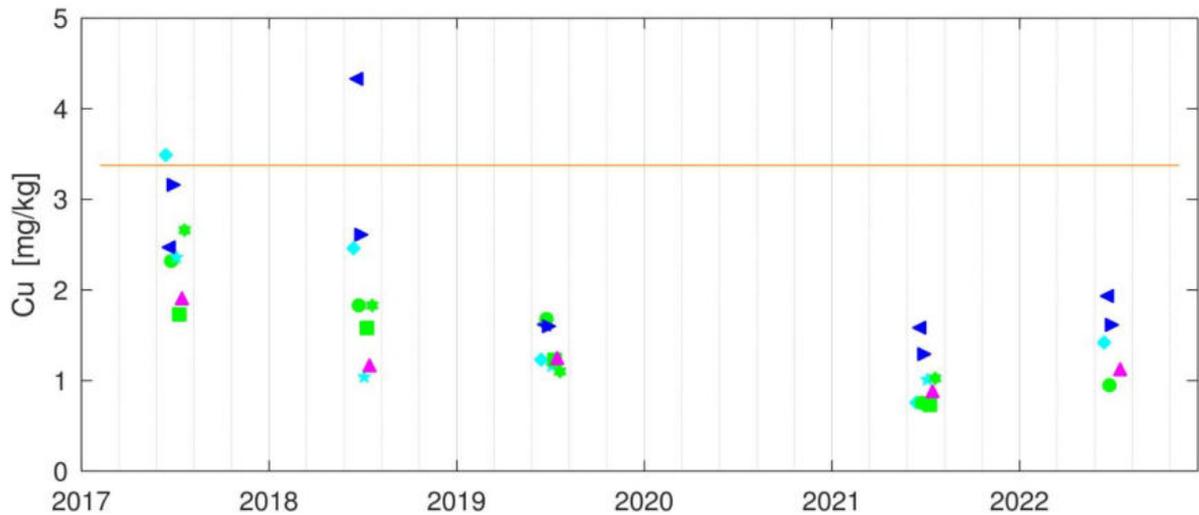
Bei den insgesamt 32 Werten traten keine OmH-Überschreitung auf (Tabelle 3.9-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet kein Immissionseinfluss für Kupfer vor.

**Tabelle 3.7-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Kupfer zu den Messpunkten**

| Kupfer   | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt  | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|----------|----------------|--------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Grünkohl | 3,4            | -                        | 5 Werte/MP | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

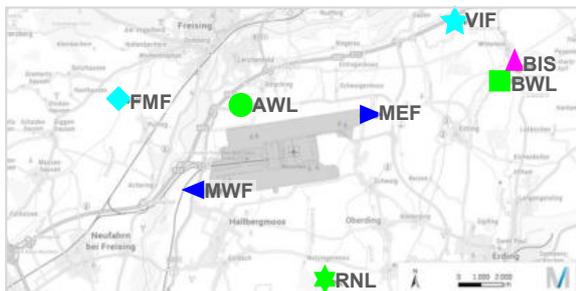
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Das Biomonitoring von Kupfer ist relevant, weil es in hohen Konzentrationen umweltschädlich wirken kann und der Flughafen-Bodenbetrieb eine potenzielle Quelle darstellen könnte. Bild 3.9-1 veranschaulicht, dass die engen Wertebereich 2019, 2021 und 2022 gut übereinstimmen, der Wertebereich 2017 tendenziell höher ist, der Wertebereich 2018 weiter streut (keine Messung in 2020). Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen im Jahr 2020 korrespondieren würde (Bild 1.3-1) und auf den Flughafenbetrieb als Quelle hindeuten würde, wird nicht erkennbar.



**Bild 3.7-1: Kupfergehalte in Grünkohl 2017–2019 und 2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
  - ★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
  - ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
  - ▶▶ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen
- [Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Durch den relativen Messpunktvergleich anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) werden Schwankungen eliminiert und die Streuung relativiert (Bild 3.7-2).

An MWF und MEF als betriebsnahen Messpunkten des Flughafens traten überdurchschnittliche Werte auf (rund 1).

An BWL, landwirtschaftlich geprägt, und BIS, innerorts, sowie schwächer an VIF, naturnah, traten unterdurchschnittliche Werte auf (-0,5– -1).

Obwohl die Kupfergehalte in Grünkohl unterhalb der Schwelle für Immissionseinflüsse lagen, werden im relativen Messpunktvergleich somit Abstufungen erkennbar: Die überdurchschnittlichen Werte an MEF und MWF lassen Verkehr, Flughafenbetrieb und Aufwirbelung kupferhaltiger Stäube von den versiegelten Oberflächen des Flughafenareals als Quellen vermuten.



Die Quellenzuweisung wird durch ein aktuelles Graskultur-Biomonitoring bestätigt (BayLfU 2019): Straßen mit Bremsabrieb von Fahrzeugen als direkte Quelle und Staubverwehungen als indirekten Quelle wurden dort als wesentliche Ursache für Kupferanreicherungen identifiziert. Die Quelleinflüsse im Untersuchungsgebiet reichten nur bis in den Nahbereich. An den nächstgelegenen landwirtschaftlichen Messpunkten AWL und BWL sowie innerorts sind niedrige Werte festzustellen.

**Bild 3.7-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Kupfer 2017–2019 und 2022**

#### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Der für Kupfer in Grünkohl ermittelte OmH von 3,4 mg/kg TM stimmt mit dem überregionalen OmH 3,8 mg/kg TM gut überein (VDI 3857/2; Tabelle 2.6-1). Weitere aktuelle Vergleichswerte liegen nicht vor.

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet ist bezüglich Kupfer als unauffällig zu bewerten.

#### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Beurteilungswerte für eine Gefährdungsabschätzung liegen für Kupfer in Grünkohl nicht vor.

### 3.8 Molybdän in Graskultur und Grünkohl

Molybdän (Mo) wird als Legierungselement zur Steigerung von Festigkeit, Korrosions- und Hitzebeständigkeit und zur Herstellung von Flugzeug- und Raketenteilen verwendet (Quelle im Internet: <https://www.chemie.de/lexikon/Molybd%C3%A4n.html>, Stand 23.01.2023). Zusammen mit Antimon, Barium, Bismut, Blei, Kupfer und Zinn ist Molybdän in hohen Konzentrationen in Bremsbelägen enthalten (BayLfU 2017). Molybdän ist ein essenzielles Spurenelement. In zu hohen Konzentrationen kann es aber z. B. toxische Wirkungen bei Rindern hervorrufen (VDI 2310/37).

Molybdän war 2017–2022 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM).

Die Molybdängehalte in Graskultur lagen 2022 mit 1,2–3,1 mg/kg TM im oberen Bereich der Vorjahreswerte 0,21–2,8 mg/kg TM (Bild 3.8-1 oben).

Die Molybdängehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 0,4–2,2 mg/kg TM hingegen im unteren Bereich der Werte seit 2017 von 0,32–11,7 mg/kg TM (2020 keine Messung; Bild 3.8-1 unten).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 3,7 mg/kg TM. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 4,9 mg/kg TM. Da für Graskultur und für Grünkohl keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (Kap. 2.6).

Bei den für Graskultur 2017–2022 im Untersuchungsgebiet insgesamt 134 Werten wurde keine OmH-Überschreitung ermittelt.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 37 Werten traten 4 OmH-Überschreitungen auf: 2019 an den Messpunkten BIS, FMF und RNL sowie 2021 an BWL (Tabelle 3.8-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet kein relevanter Immissionseinfluss für Molybdän vor.

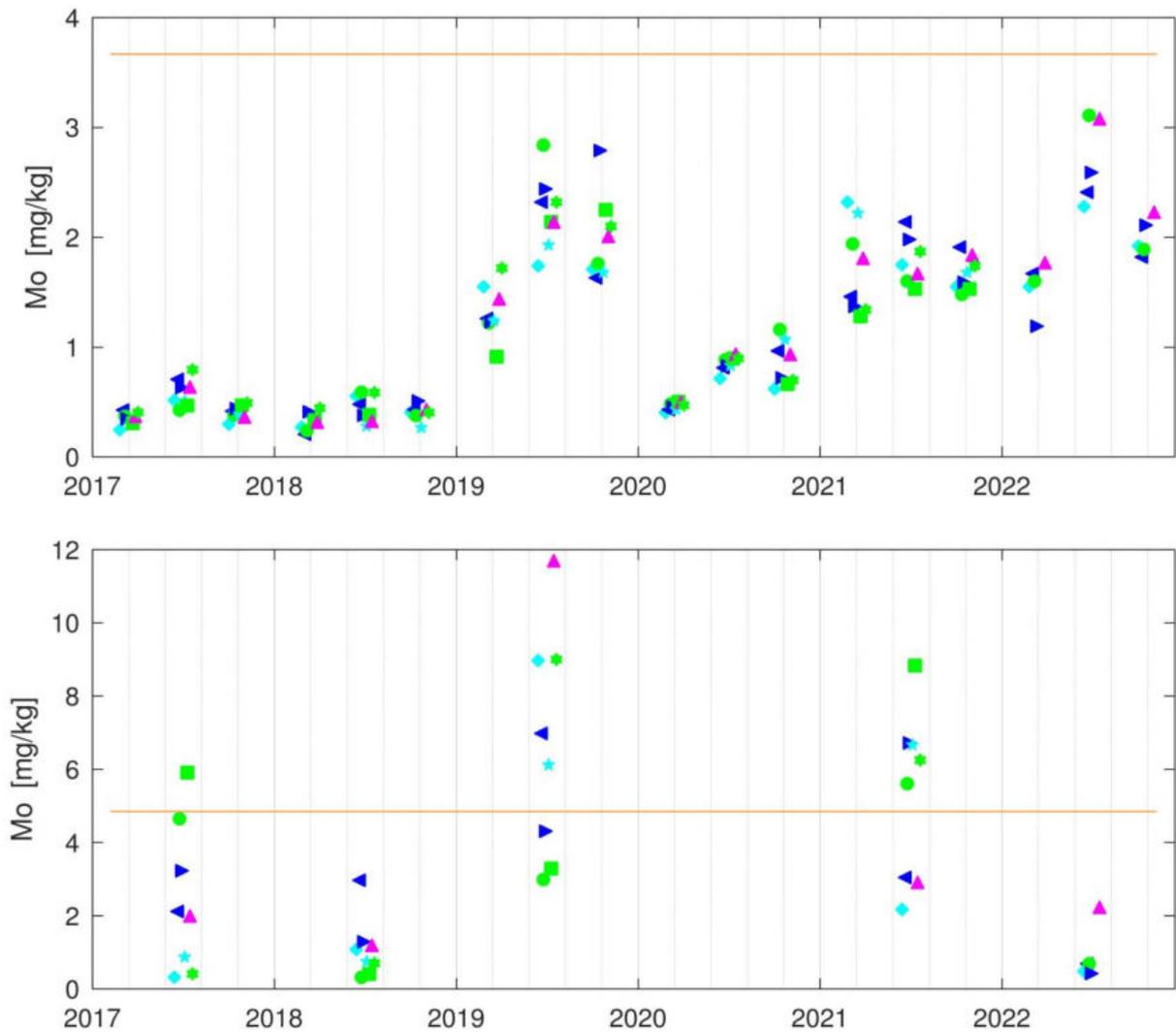
**Tabelle 3.8-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Molybdän zu den Messpunkten**

| Molybdän   | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 3,7            | -                        | 18 Werte/MP | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Grünkohl   | 4,9            | -                        | 5 Werte/MP  | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 1   |

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

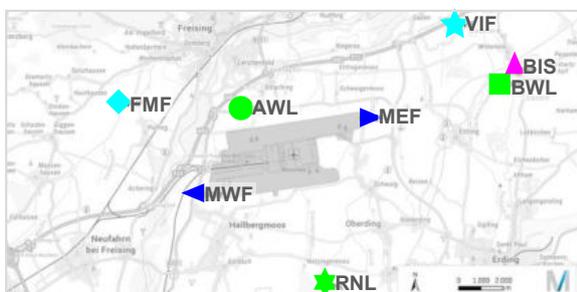
Die Wertekollektive von Molybdän in Graskultur und Grünkohl schwanken von Messjahr zu Messjahr. Als Ursache kommen Verfahrenseinflüsse in Frage: Molybdän gehört zu den Metallen, deren Gehalt in den Bioindikatoren durch die Aufnahme über das Substrat beeinflusst wird. Dies bestätigten Langzeituntersuchungen des BayLfU für Graskulturen (BayLfU 2020). Der Wertebereich in Grünkohl war 2021 relativ weit, vergleichbar mit 2019. Hierfür könnte der Einfluss des Substrats relevant sein. Anders verhielt es sich für Aluminium, Antimon, Bismut, Blei, Chrom, Eisen und Kupfer (vgl. Kap. 3.1 bis 3.7), für die sich in Grünkohl 2021 enge Wertebereiche zeigten. Der Wertebereich von Molybdän in Grünkohl war 2022 wiederum eng, wie 2018.

Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden nicht erkennbar.



**Bild 3.8-1: Molybdängehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



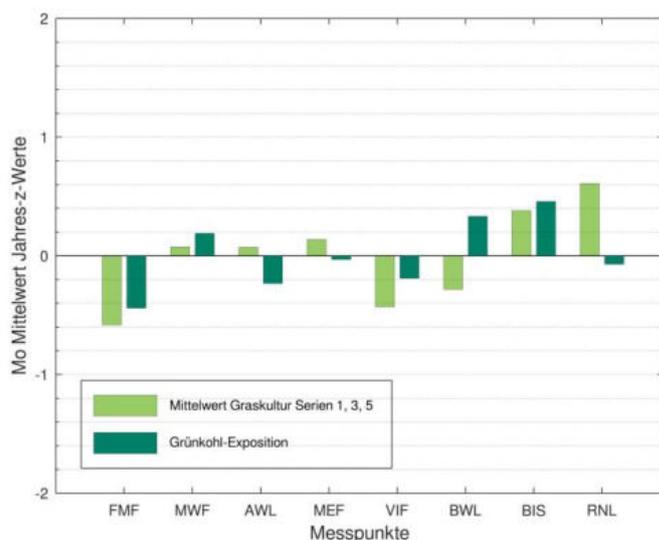
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
- ★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
- ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
- ▶▶ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) werden Schwankungen eliminiert und die Streuung relativiert.



**Bild 3.8-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Molybdän 2017–2022**

Durch den relativen Messpunktvergleich werden für Molybdän lediglich schwach überdurchschnittliche Werte (>0,5) an BIS, innerorts, und nur für Graskultur an RNL, flughafenfern landwirtschaftlich geprägt, erkennbar (Bild 3.8-2).

Schwach unterdurchschnittliche Werte traten an FMF, naturnah, auf. Ansonsten werden keine Messpunktastufungen deutlich (überdurchschnittliche Werte >0,5, oder unterdurchschnittliche Werte <-0,5).

Die Anreicherung von Molybdän aus schwachen Quellen, wie Abrieb von Bremsbelägen beim Bodenbetrieb des Flughafens, über den Luftpfad in Graskultur und Grünkohl dürfte durch die Aufnahme aus dem Substrat überlagert sein.

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich für Grünkohl eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1; keine OmH für Graskultur): Der für Grünkohl ermittelte OmH von 4,9 mg/kg TM ist mit dem überregionalen OmH 4,0 mg/kg TM relativ gut vergleichbar (VDI 3957/3).

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann somit als unauffällig bewertet werden.

### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Ein Futtermittel-Höchstgehalt, der als Beurteilungswert für Molybdängehalte in Graskulturen herangezogen werden könnte, ist nicht festgelegt. Der Maximale Immissions-Wert in Rinderfuttermitteln beträgt 10 mg/kg bezogen und der in Schaffuttermitteln beträgt 50 mg/kg, bezogen auf 88 % TM (VDI 2310/37). Der strengere Beurteilungswert von 11,4 mg/kg umgerechnet auf 100% TM ist auf Graskultur-Mittelwerte über die Vegetationsperiode anzuwenden. Diese lagen weit unterhalb einer Schwelle, ab der eine Gefährdung zu vermuten wäre.

### 3.9 Nickel in Graskultur

Laut UBA geht etwa die Hälfte des freigesetzten Nickels (Ni) von der Energiegewinnung aus und rund ein Drittel vom Straßenverkehr (UBA 2022) – aus Katalysatoren und Motorverschleiß (BayLfU 2019). Im menschlichen Organismus kommt Nickel als Spurenelement vor. In höheren Konzentrationen kann es allergische Hautreaktionen und die Reizung der Atemwege bewirken. Nickel sowie manche seiner Verbindungen sind als karzinogen (krebserzeugend) eingestuft.

Pflanzen, insbesondere Blattkohle wie Grünkohl können Nickel aus dem Substrat aufnehmen: Das nach VDI 3957/3 für Grünkohl verwendete Substrat enthält relevante Mengen Nickel, die je nach dessen Säuregrad über das Bodenwasser angereichert werden (LANUV 2016). Da dies die Eignung des Verfahrens, Nickel über den Luftpfad zu erfassen, einschränkt, wird Nickel in diesem Biomonitoring aktuell nicht mehr mit Grünkohl untersucht.

Nickel war 2017–2022 in allen Grasproben analytisch bestimmbar (BG: 0,10 mg/kg TM).

Die Nickelgehalte in Graskultur lagen 2022 mit 1,6–3,5 mg/kg TM ähnlich 2021 eher im unteren Bereich der Vorjahreswerte 1,2–8,3 mg/kg TM (Bild 3.9-1).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 5,0 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  14 %.

Bei den für Graskultur 2017–2022 insgesamt 134 Nickelwerten traten 5 OmH-Überschreitungen auf, sämtlich in der 3. Serie Graskultur 2017: an FMF, MWF, AWL, BWL und BIS (Tabelle 3.9-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet kein relevanter Immissionseinfluss für Nickel vor.

**Tabelle 3.9-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Nickel zu den Messpunkten**

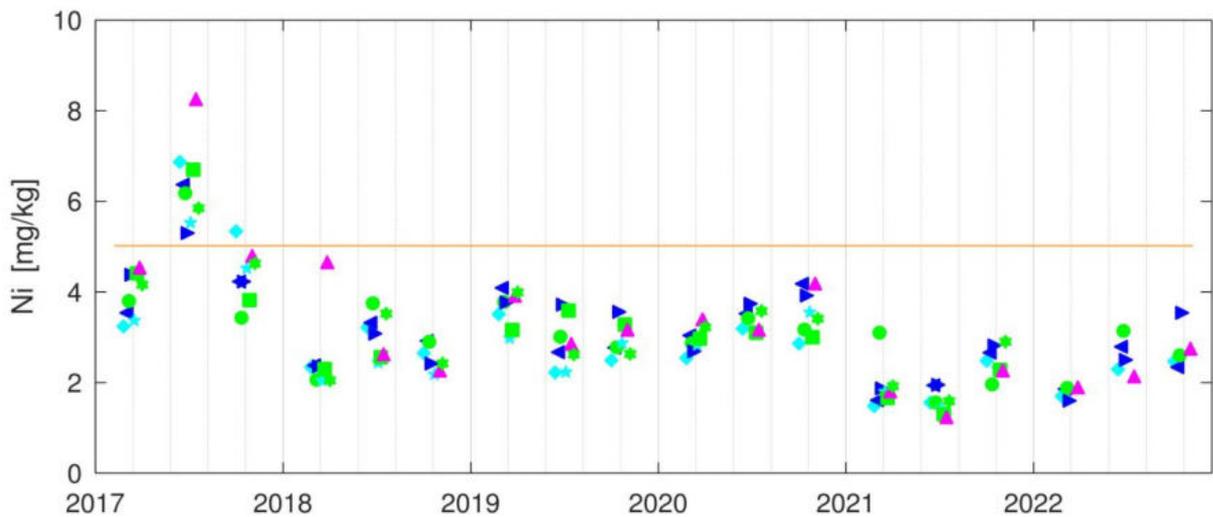
| Nickel     | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 5,0            | 15 %                     | 18 Werte/MP | 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   |

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Das Biomonitoring von Nickel ist relevant, weil es in hohen Konzentrationen umweltschädlich wirken kann und der Flughafenbetrieb eine potenzielle Quelle darstellt. Der Gehalt von Nickel in der Graskultur kann allerdings auch durch die Aufnahme über das Substrat beeinflusst werden (VDI 3857/2), was bei der Durchführung und Bewertung berücksichtigt werden muss.

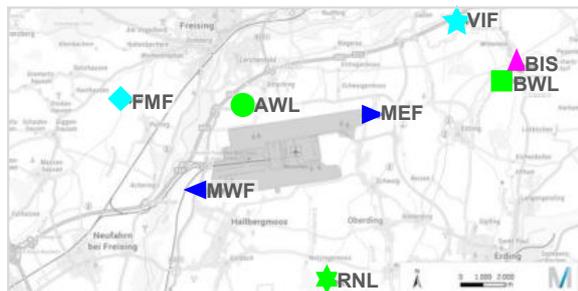
In Bild 3.9-1 wird ersichtlich, dass Schwankungen zwischen Messjahren auftreten, die durch das Substrat beeinflusst sein könnten, und zwischen Serien, durch Witterungseinflüsse. Diese Schwankungen fallen deutlicher aus als etwaige Messpunktunterschiede.

Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang und dem Anstieg der Flugzahlen 2022 auf rund 70 % des Vor-Corona-Niveaus korrespondieren würde (Bild 1.3-1), wird nicht erkennbar.



**Bild 3.9-1: Nickelgehalte in Graskultur 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).

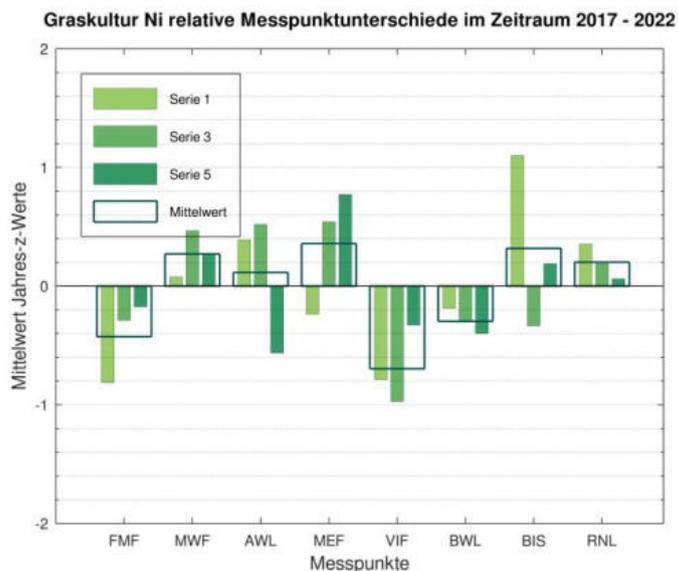


Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
  - ★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
  - ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
  - ▶◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen
- [Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

**Messpunktastufung und Quellenzuordnung:**

Durch den relativen Messpunktvergleich anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) werden Schwankungen eliminiert und die Streuung relativiert. Bild 3.9-2 veranschaulicht das Ergebnis: Es wird in diesem Fall für die Graskulturserien 1, 3 und 5 als separate Mittelwerte (grüne Balken) und – wie in den vorangegangenen Kapiteln – als Mittelwert über alle Serien pro Messpunkt (Rahmen) dargestellt.



**Bild 3.9-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Nickel 2017–2021**

An BIS, innerorts, traten in der 1. Serie Graskultur (Mai) vergleichsweise überdurchschnittliche Werte auf. Im Mittel heben sich die Werte aber nicht relevant vom Durchschnitt ab ( $<0,5$ ). An MWF und MEF als betriebsnahen Messpunkten des Flughafens lagen die Werte ebenfalls nicht relevant über dem Durchschnitt ( $<0,5$ ).

Nur an VIF, naturnah, waren die Nickelwerte schwach unterdurchschnittlich ( $-0,5$ – $-1$ ). Somit wird für Nickel keine Messpunktastufung deutlich (Bild 3.9-2).

Verkehr und Flughafenbetrieb kommen zwar als direkte, schwache Quellen für Nickel in Frage. Aber die Anreicherung über den Luftpfad ist sehr wahrscheinlich durch die Aufnahme von Nickel aus dem Substrat überlagert.

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Der für Graskultur ermittelte OmH von  $5,0 \text{ mg/kg TM}$  stimmt sowohl mit dem überregionalen OmH  $5,7 \text{ mg/kg TM}$  gut überein der Richtlinie VDI 3857 Blatt 2, als auch mit dem aktuellen OmH für den quellenfernen ländlichen Hintergrund  $5,4 \text{ mg/kg TM}$  (BayLfU 2022; Tabelle 2.6-1).

Der Wertebereich im Umfeld des Flughafens München 2017-2022 ist mit anderen aktuellen Graskultur-Biomonitorings gut vergleichbar (Wäber und Pompe 2023 und 2022a, BayLfU 2022):

- $1,2$ – $5,3 \text{ mg/kg TM}$  im Umfeld des Flughafens München 2017–2022 (ausgenommen, weil höher, die 3. Serie 2017 mit  $5,3$ – $8,3 \text{ mg/kg TM}$ );
- $1,4$ – $4,4 \text{ mg/kg TM}$  im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022;
- $1,7$ – $7,4 \text{ mg/kg TM}$  ( $>75 \%$  der Werte) im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER 2013, 2015, 2022;
- $2,9 \pm 0,7 \text{ mg/kg TM}$  bis  $4,9 \pm 0,7 \text{ mg/kg TM}$  als Mittelwerte ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern 2017-2021.

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet ist bezüglich Nickel als unauffällig zu bewerten.

### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Ein Futtermittel-Höchstgehalt ist für Nickel nicht festgelegt. Maximale Immissions-Werte, die auf Mittelwerte über die Vegetationszeit zu beziehen sind, betragen in Rinderfuttermitteln und in Schaffuttermitteln  $50 \text{ mg/kg}$  bezogen auf  $88 \%$  TM (VDI 2310/30). Der Beurteilungswert von  $57 \text{ mg/kg}$  umgerechnet auf  $100\%$  TM wurde von den Graskultur-Mittelwerten 2017–2022 deutlich unterschritten (Tabelle 2.6-2).

### 3.10 Vanadium in Graskultur und Grünkohl

Vanadium (V) kommt natürlicherweise in Böden vor. Die vermutlich wichtigste anthropogene Quelle für Vanadium in der Umwelt ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Schnorr et al. 2019). Es kann auch aus Motoröl freigesetzt werden (BayLfU 2019).

Vanadium war 2017–2022 in den Grasproben mehrheitlich analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM bis 2019, BG 0,025 mg/kg TM seit 2020). In den Grünkohlproben war es ebenfalls mehrheitlich bestimmbar (BG 0,05 mg/kg TM bis 2018, BG 0,01 mg/kg TM seit 2019).

Die Vanadiumgehalte in Graskultur lagen 2022 mit 0,069–0,20 mg/kg TM im Bereich der Vorjahreswerte <0,025–0,18 mg/kg TM. Tendenziell höher lagen die Werte der 5. Serie 2019 und das Maximum in der 1. Serie 2019 von 0,25 mg/kg TM (Bild 3.10-1 oben) – analog Aluminium und Chrom (Kapitel 3.1 und 3.5).

Die Vanadiumgehalte in Grünkohl lagen 2022 mit 0,023–0,083 mg/kg TM innerhalb der Werte seit 2017 von 0,011–0,12 mg/kg TM. Die Werte 2018 und 2019 zeigten eine höhere Spannweite (2020 keine Messung; Bild 3.10-1 unten), analog Aluminium, Antimon, Bismut und Blei (vgl. Kap. 3.1 bis 3.4).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,14 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  20 %. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 0,056 mg/kg TM. Da für Grünkohl keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (Kap.2.6).

Bei den insgesamt 134 Werten für Graskultur im Untersuchungsgebiet 2017–2022 wurden 9 OmH-Überschreitungen festgestellt: 4mal am Messpunkt RNL in der jeweils 1. und 5. Serie 2017 und 2019, sowie 2mal an AWL in der 1. und 5. Serie 2022 und 2mal an MEF in der 3. und 5. Serie 2019 sowie einmal an MWF in der 5. Serie 2019.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 37 Werten traten 5 OmH-Überschreitungen auf: 2 an Messpunkt AWL 2018 und 2019 und je 1 an FMF, MWF und MEF 2018 (Tabelle 3.10-1). Folglich lagen im Untersuchungsgebiet 2017–2019 für Grünkohl an AWL, MEF und RNL schwache Immissionseinflüsse für Vanadium vor.

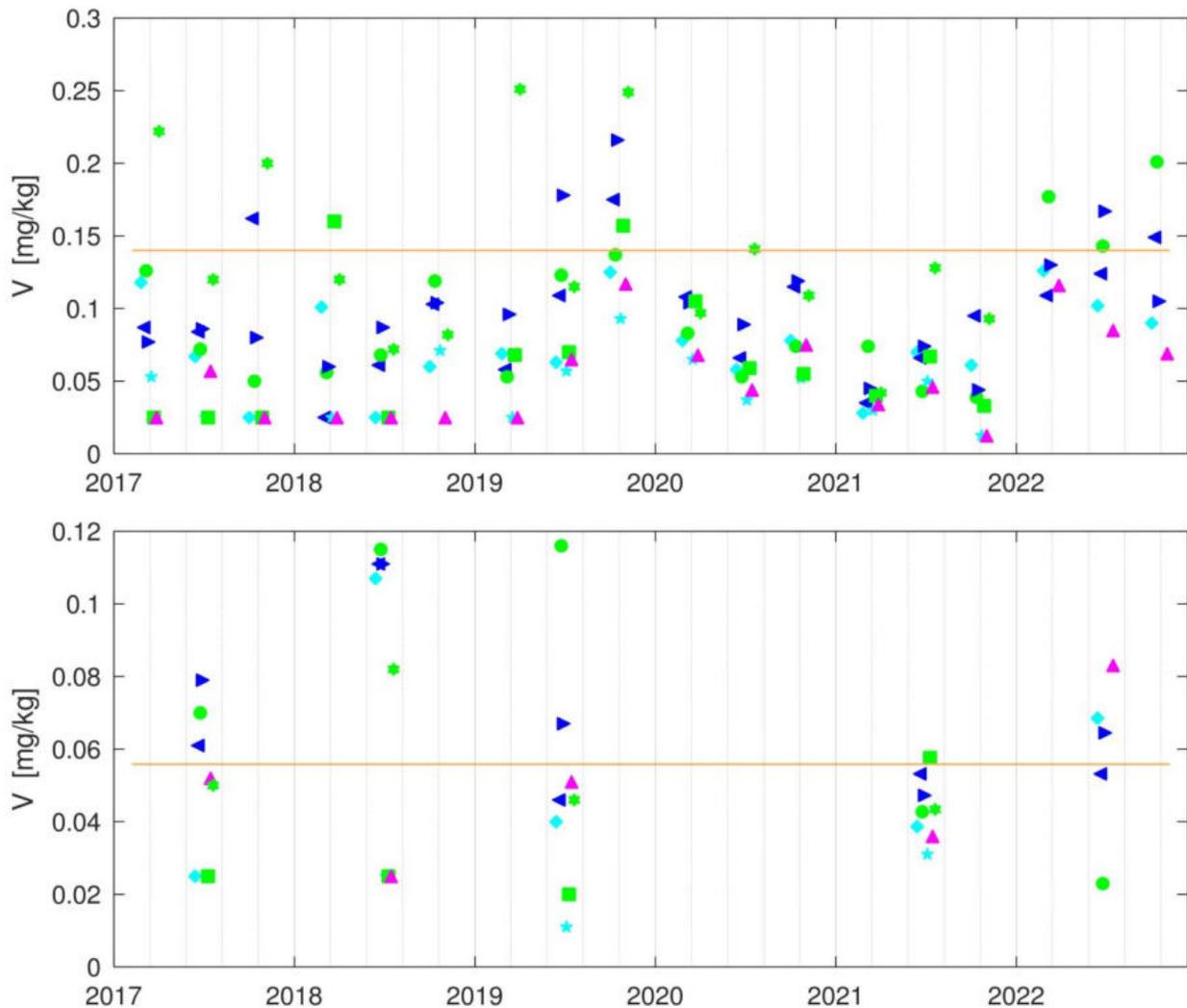
**Tabelle 3.10-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Vanadium zu den Messpunkten**

| Vanadium   | OmH [mg/kg TM] | Standardunsicherheit $u$ | Messpunkt   | FMF | MWF | AWL | MEF | VIF | BWL | BIS | RNL |
|------------|----------------|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Graskultur | 0,14           | 20 %                     | 18 Werte/MP | 0   | 1   | 2   | 2   | 0   | 0   | 0   | 4   |
| Grünkohl   | 0,056          | -                        | 5 Werte/MP  | 1   | 1   | 2   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   |

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

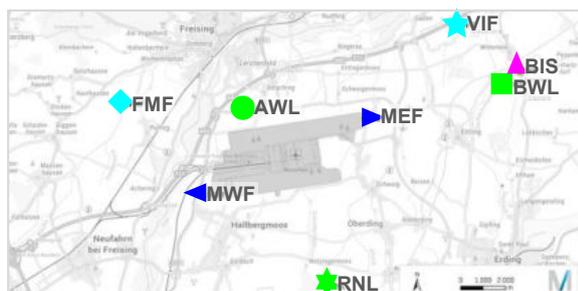
Die Wertekollektive von Graskultur und Grünkohl schwanken von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf (Bild 3.10-1). Die Bioindikatoren integrieren die Witterungseinflüsse, die auch auf die Vegetation wirken.

Die Vanadiumgehalte lagen in den Coronajahren eher in engen und niedrigen Bereichen. Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden aber nicht deutlich.



**Bild 3.10-1: Vanadiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022**

in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).

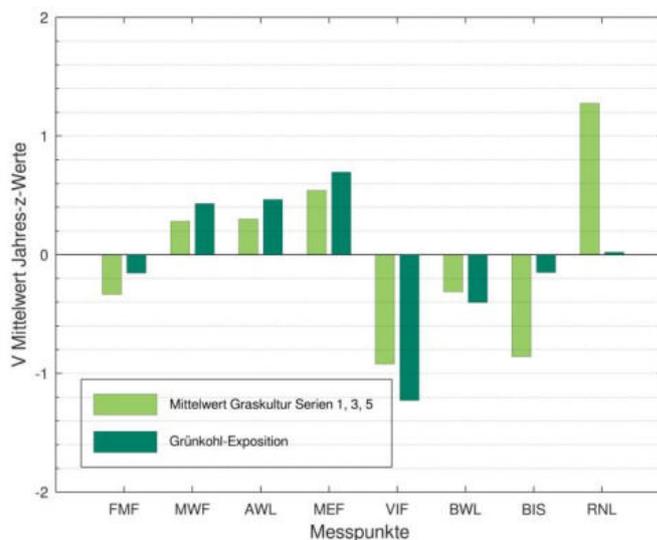


Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
  - ★ ● ■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
  - ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
  - ▶ ◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen
- [Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Der relative Messpunktvergleich anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) ermöglicht es, eine etwaig unterschiedliche Gesamtbelastung unterhalb OmH-Schwelle an den Messpunkten sichtbar zu machen.



**Bild 3.10-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Vanadium 2017–2022**

Die Messpunktastufungen deuten darauf hin, dass eher Bodenaufwirbelungen ursächlich für überdurchschnittliche Werte sein dürften, während Verkehr und Flughafenbetrieb keine relevanten direkten Vanadiumquellen darstellen. Dies korrespondiert mit einem aktuellen Graskultur-Biomonitoring (BayLfU 2019), das Bodenaufwirbelung von einem nahegelegenen Acker als wesentliche Quelle identifizierte.

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann zunächst durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1):

Der hier für Graskultur ermittelte OmH liegt mit 0,14 mg/kg TM zwischen dem aktuellen OmH 0,091 mg/kg TM für den quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern (BayLfU 2022) und dem überregionalen OmH 0,15 mg/kg TM (VDI 3857/2).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 0,056 mg/kg TM liegt niedriger als der überregionale OmH 0,12 mg/kg TM (VDI 3957/3).

Der Hintergrundbereich im Umfeld des Flughafens München für Graskultur 2017-2022 nimmt eine weitere Wertespanne ein, als die Ergebnisse des Biomonitorings an quellenfernen Hintergrundmesspunkten in Bayern (BayLfU 2022: dort Einzelwerte nicht über 0,1 mg/kg TM):

- <0,025–0,17 mg/kg TM – unterhalb OmH – im Umfeld des Flughafens München 2017–2022;
- 0,031+/-0,029 mg/kg TM bis 0,048+/-0,012 mg/kg TM als Mittelwerte ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern 2017-2021.

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet ist bezüglich Vanadium nicht als hoch zu bewerten.

Für Graskultur traten an RNL als flughafenfernem, landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt positive (rund 1), überdurchschnittliche Werte auf, ebenfalls, aber schwach an MEF für beide Bioindikatoren (rund 0,5; Bild 3.10-2).

Für Grünkohl traten an AWL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt, sowie an MEF und MWF als betriebsnahen Messpunkten am Flughafen schwach überdurchschnittliche Werte auf (rund 0,5).

An BIS, innerorts, für Graskultur, und deutlicher an VIF, naturnah, für beide Bioindikatoren, traten unterdurchschnittliche Werte auf (-0,5 —1).

### **Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung**

Ein Futtermittel-Höchstgehalt, der als Beurteilungswert für Vanadiumgehalte in Graskulturen herangezogen werden könnte, ist nicht festgelegt. Ein Maximaler Immissions-Wert in Schaffuttermitteln (VDI 2310/44) beträgt 10 mg/kg bezogen auf 88 % TM (VDI 2310/44). Dieser Beurteilungswert von 11,4 mg/kg umgerechnet auf 100% TM (Tabelle 2.6-2) hat Empfehlungscharakter und ist auf Graskultur-Mittelwerte über die Vegetationsperiode zu beziehen. Die Graskultur-Mittelwerte lagen weit unterhalb einer Schwelle, ab der eine Gefährdung zu vermuten wäre.

### 3.11 PAK in Graskultur und Grünkohl

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen in der Hauptsache bei unvollständiger Verbrennung von organischem Material. Hauptquelle (80 %) sind Kleinf Feuerungsanlagen in Haushalten (Hausbrand), nur 2 % der Emissionen stammen aus der Verkehr (UBA 2016). Verkehrsabgase und der Flughafenbetrieb stellen also direkte, kontinuierliche PAK-Quellen dar, Hausbrand eine saisonale Quelle.

Neben der Summe der 16 untersuchten EPA-PAK wird die Summe der schwerer flüchtigen 12 PAK betrachtet, die Summe PAK4 aus Benzo[a]pyren, Benzo[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthen und Chrysen, sowie Benzo[a]pyren (BaP) separat.

Wie bei den Metallen kam es 2018 wegen Vandalismus zu einem Ausfall der PAK-Untersuchungen an AWL in der 4. Graskulturserie. Von den 16 PAK-Verbindungen lagen 2017–2022 in Graskulturen nur Benzo[k]fluoranthen (in 2 von 134 Fällen), Dibenzo[ah]anthracen (in 117 von 134 Fällen) und Indenopyren (in 1 von 134 Fällen) unterhalb der Bestimmungsgrenze 0,10 µg/kg TM.

In den Grünkohlproben lag lediglich Dibenzo[ah]anthracen in 7 von 119 Fällen unterhalb BG.

Diese Ergebnisse gingen mit 0,05 µg/kg TM in die Summen der 16 PAK und 12 PAK ein. Lügen Benzo[a]pyren, Benzo[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthen und Chrysen <BG, gingen sie mit Null in PAK4 ein.

**Die Summen der 16 PAK (S16PAK)** in Graskultur (Bild 3.11-2 nachfolgende Seite oben) lagen mehrheitlich im Bereich von rund 10–30 µg/kg TM, im Jahr 2022 im engen Bereich von 18-30 µg/kg TM.. In der jeweils 5. Serie 2017 und 2018 nahmen sie einen weiteren Bereich bis rund 40 µg/kg TM ein, Die S16PAK-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 übernächste Seite oben) lagen 2022 mit 79–88 µg/kg TM in einem Bereich, der den Ergebnissen 2018–2021 entsprach – Ausnahme 173 µg/kg TM an BIS innerorts 2022. Auch 2017, 2018 und 2019 lag das jeweilige Maximum in Grünkohl an Messpunkt BIS mit dort knapp 200 µg/kg TM bis 260 µg/kg TM.

Die Ergebnisse für die **schwerer flüchtigen 12 PAK** fielen ähnlich aus (ohne grafische Darstellung):

In Graskultur lagen die Gehalte mehrheitlich im Bereich von rund 5–23 µg/kg TM, nur in der 5. Serie 2017 nahmen sie einen weiten Bereich bis rund 35 µg/kg TM ein.

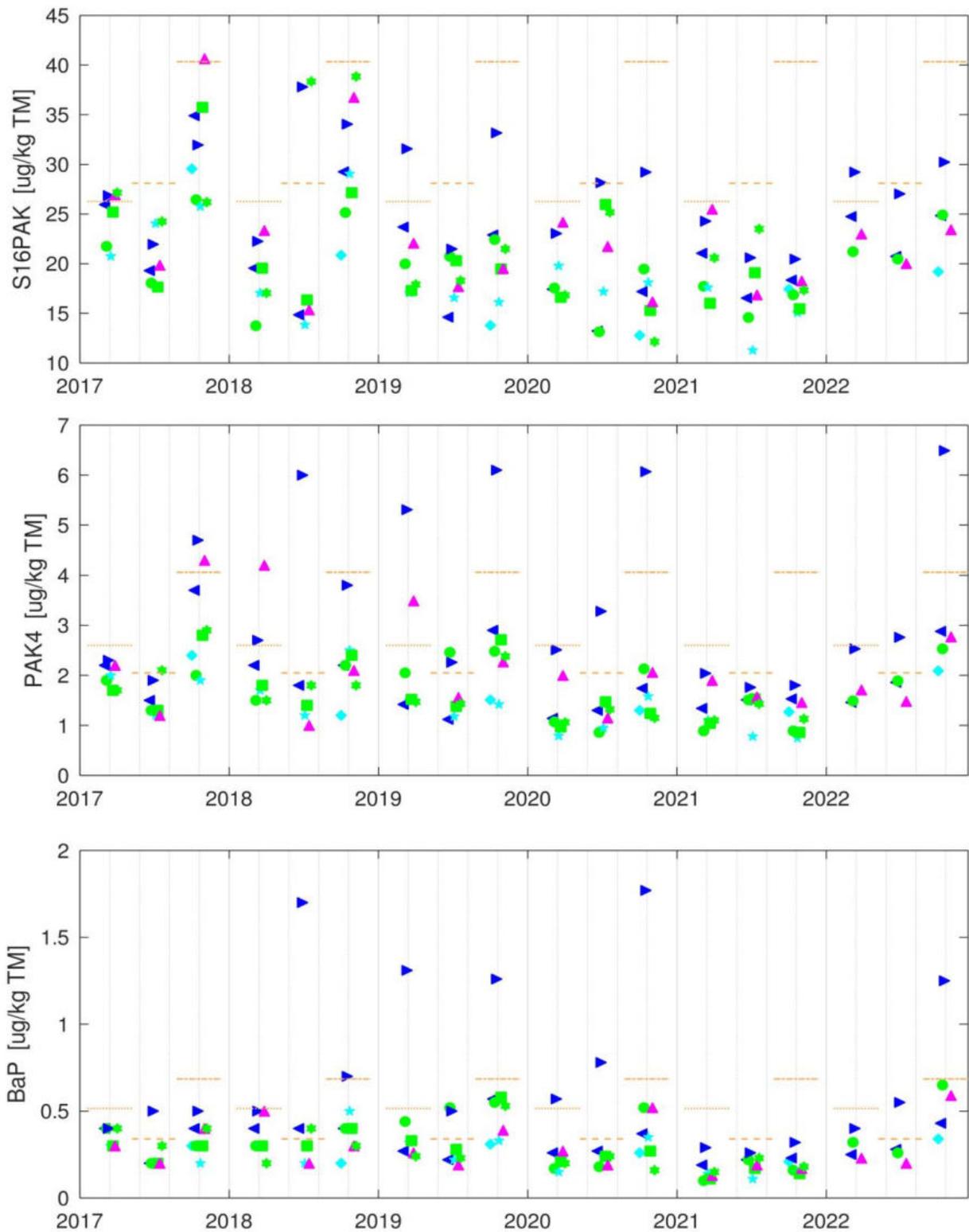
In Grünkohl waren die Wertebereiche 2018–2022 ähnlich, mit jeweils unterschiedlich weit davon abgesetzten Maxima an Messpunkt BIS. Aber 2017 traten tendenziell höhere S12PAK-Gehalte in Grünkohl im Untersuchungsgebiet auf.

**Die PAK4-Gehalte** in Graskultur (Bild 3.11-2 nachfolgende Seite Mitte) lagen 2022 wie in den Vorjahren mehrheitlich im Bereich von rund 0,8–3 µg/kg TM. In der 5. Serie 2017 war die Wertespanne mit 2–5 µg/kg TM insgesamt weiter. Davon abgesetzt lagen 2018–2020, nicht 2021, aber erneut 2022 die Maxima an den Messpunkten MEF und BIS mit bis 6,5 µg/kg TM höher.

Die PAK4-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 übernächste Seite Mitte) lagen – anders als S16PAK und S12PAK – im gesamten Betrachtungszeitraum 2017–2022 in vergleichbaren Wertebereichen von 8,9–27 µg/kg TM. Davon abgesetzt reichte das jeweilige Maximum an Messpunkt BIS von 25 µg/kg TM 2020 und 2021, über 31 µg/kg TM 2022 bis knapp 50 µg/kg TM 2019.

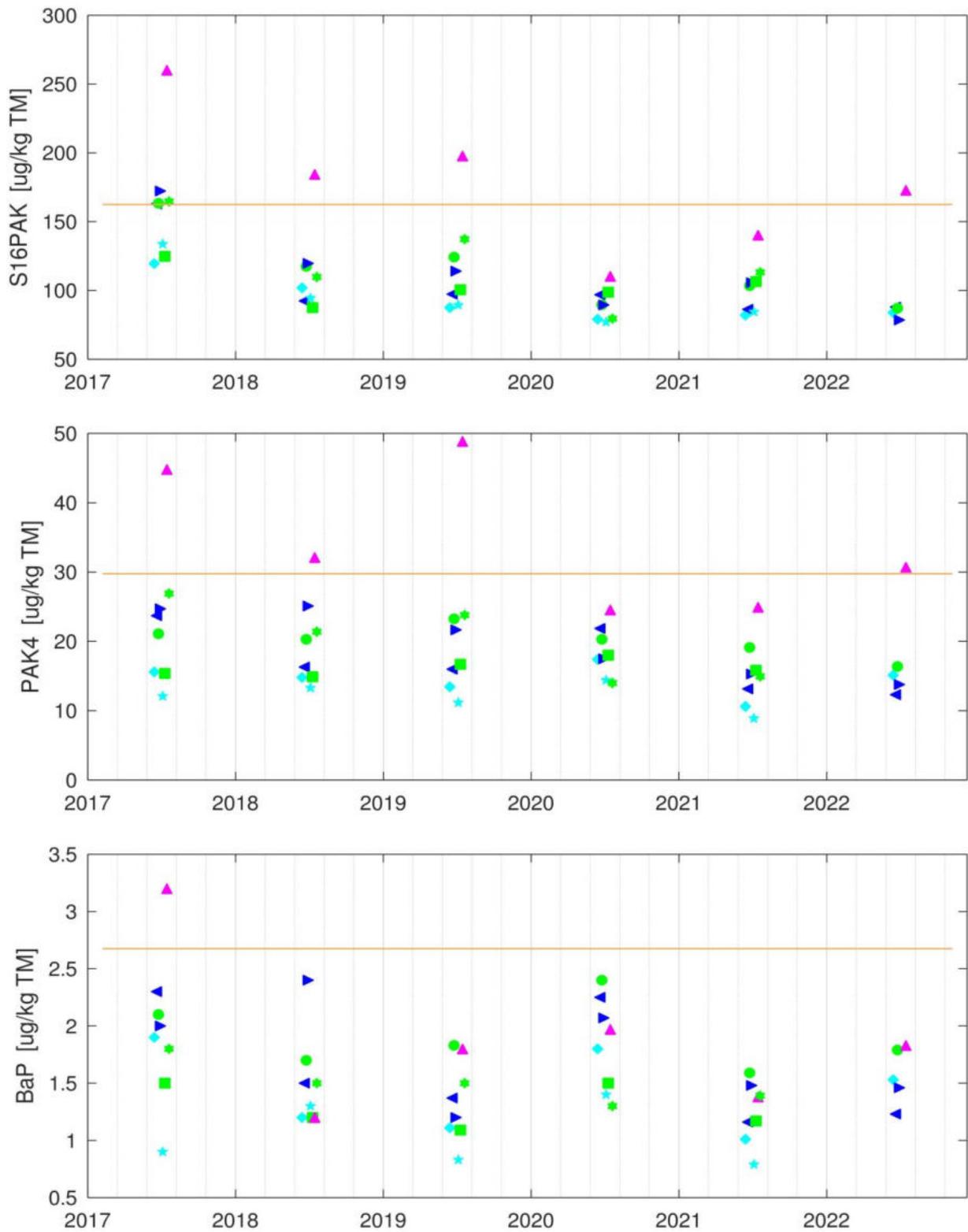
**Benzo[a]pyren (BaP)** in Graskultur (Bild 3.11-2 nachfolgende Seite unten) lag im Betrachtungszeitraum 2017–2022 in einem engen Wertebereich von rund 0,1–0,6 µg/kg TM. Wie bei PAK4 waren davon 2018–2020 und 2022 Maxima an Messpunkt MEF abgesetzt: rund 0,6–1,3 µg/kg TM.

Die BaP-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 übernächste Seite unten) nahmen wie PAK4 2017–2022 vergleichbare Wertebereiche ein: 0,8–2,4 µg/kg TM. Nur im Jahr 2017 an BIS war BaP höher: 3,2 µg/kg TM.



**Bild 3.11-1: PAK-Gehalte in Graskultur 2017–2022**

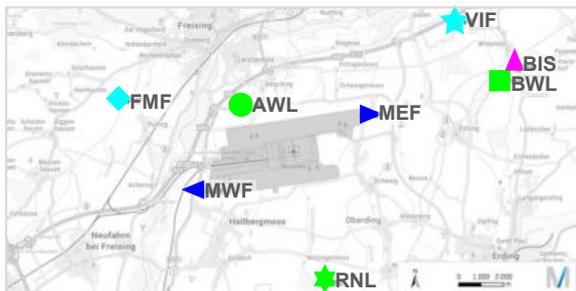
Summen 16 PAK (S16PAK oben), PAK4 (Mitte) und Benzp[a]pyren (BaP, unten) in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); OmH für Serie 1–3: gepunktete Linie, für Serie 4: gestrichelte Linie, für Serie 5: Punkt-Strich-Linie



**Bild 3.11-2: PAK-Gehalte in Grünkohl 2017–2022**

Summen 16 PAK (S16PAK, oben), PAK4 (Mitte) und Benzp[a]pyren (BaP, unten) in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OMH: blassorange Linie)

Die Karte unten stellt die Lage der Messpunkte dar (2022 ohne RNL, VIF, BWL).



Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

◆★ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld

★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld

▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich

▶◀ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen

[Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung 2/22]

### Identifikation von Immissionseinflüssen

Die vorangegangenen beiden Bildseiten stellen die Summen 16 PAK (S16PAK, jeweils oben), PAK4 (jeweils Mitte) und Benzo[a]pyren (BaP, jeweils unten) im Vergleich mit dem jeweiligen Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) 2017–2022 dar (Bild 3.11-2 für Graskultur und Bild 3.11-2 für Grünkohl).

Der OmH für Graskultur wurde aufgrund etwaiger saisonaler Einflüsse jeweils für die Expositionsabschnitte Serie 1–3, 4 und 5 separat ermittelt. Für Graskultur Serie 1–3 wurden dabei, wie für Grünkohl, die Messpunkte BIS und MEF aus dem Hintergrundwertekollektiv ausgeschlossen, weil sich dort Immissionseinflüsse zeigten (BIS: saisonal). Für Graskultur Serie 4 und Serie 5 wurden MEF und RNL aufgrund Immissionseinflüssen aus dem Hintergrundwertekollektiv ausgeschlossen. Die Höhe des jeweiligen OmH hängt zum einen von der Höhe der Hintergrundwerte ab, zum anderen von deren Spannweite.

Die für Graskultur ermittelten OmH sind der nachfolgenden Tabelle 3.11-1 zu entnehmen. Da für PAK in Graskultur keine Standardunsicherheit bekannt ist, ist dann von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (Kap.2.6).

Die OmH für S16PAK für Graskultur Serie 1–3, Serie 4 und Serie 5 wurden an keinem Messpunkt überschritten.

Die OmH für S12PAK für Serie 1–3, Serie 4 und Serie 5 wurden ebenfalls nicht überschritten.

Der OmH für PAK4 für Serie 1–3 wurde an BIS 2018 und an MEF 2019 je einmal überschritten, der OmH für Serie 4 wurde an MEF 2mal überschritten – 2018 und 2020 – und der OmH für Serie 5 wurde ebenfalls an MEF 2mal überschritten – 2019 und 2020.

Der OmH für Benzo[a]pyren für Serie 1–3 wurde an MEF 2019 einmal überschritten, der OmH für Serie 4 wurde an AWL 2019 einmal und an MEF 2017–2022 3mal überschritten. Der OmH für Serie 5 wurde ebenfalls an MEF 3mal überschritten – 2019, 2020 und 2022.

Für Graskultur 2017–2022 traten also im Untersuchungsgebiet nur OmH-Überschreitungen für PAK4 und BaP auf: je einmal an BIS und AWL, sowie in 7 von insgesamt 18 betrachteten Fällen an MEF. Folglich lagen am Messpunkt MEF für Graskultur schwache Immissionseinflüsse BaP wie für PAK4 vor.

Die für Grünkohl ermittelten OmH betragen  $162 \mu\text{g}/\text{kg TM}$  für S16PAK,  $156 \mu\text{g}/\text{kg TM}$  für S12PAK und  $30 \mu\text{g}/\text{kg TM}$  für PAK4 und wurden – unter Berücksichtigung der jeweiligen, aus Richtlinie VDI 3957/3 entnommenen Standardunsicherheit – jeweils nur einmal am Messpunkt BIS überschritten. Der OmH für Benzo[a]pyren von  $2,7 \mu\text{g}/\text{kg TM}$  wurde von keinem Messwert in Grünkohl abzüglich  $u$  18% überschritten. Somit lagen 2017–2022 für Grünkohl keine relevanten Immissionseinflüsse für PAK vor, lediglich vereinzelte innerorts an Messpunkt BIS.

**Tabelle 3.11-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für PAK zu den Messpunkten**

| Graskultur<br>S1–3 / 4 / 5 | OmH [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ]<br>(Standardunsicherheit: -)   | FMF       | MWF       | AWL       | MEF       | VIF       | BWL       | BIS       | RNL       |
|----------------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S16PAK                     | 26 / 28 / 48  | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 |
| S12PAK                     | 20 / 22 / 34  | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 |
| PAK4                       | 2,6 / 2,1 / 4,1   | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 1 / 2 / 2 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 1 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 |
| BaP                        | 0,52 / 0,34 / 0,69  | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 1 / 0 | 1 / 3 / 3 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | 0 / 1 / 0 |
| Grünkohl                   | OmH [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ]<br>(Standardunsicherheit $u$ ) | FMF       | MWF       | AWL       | MEF       | VIF       | BWL       | BIS       | RNL       |
| S16PAK                     | 162 (20 %)  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 0         |
| S12PAK                     | 156 (21 %)  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 0         |
| PAK4                       | 30 (35 %)   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 0         |
| BaP                        | 2,7 (18 %)  | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

Für Graskultur Serie 1-3, Serie 4, Serie 5 und für Grünkohl lagen jeweils 6 Werte pro Messpunkt vor;

Ausnahme stellt Messpunkt AWL für Graskultur Serie 4 dar: 5 Werte gesamt, da 2018 ausfiel;

Standardunsicherheit  $u$  [%] für Grünkohl (Richtlinie VDI 3957/3); für Graskultur ist von einem Immissionseinfluss auszugehen, wenn der Messwert  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (entspr. rechnerisch 33,3 % da die Standardunsicherheit nicht bekannt ist).

### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Die **Summen der 16 PAK (S16PAK) in Graskultur** (Bild 3.11-2 oben) zeigten 2017 und 2018 einen gewissen saisonalen Verlauf mit tendenziell niedrigeren Werten für Serien 1–3 (Mai-Juli) und Serie 4 (Ende Juli bis Mitte August) gegenüber Serie 5 (Mitte August bis Mitte September). Hier ist ein Zusammenhang mit dem zum Herbst hin überregional ansteigenden PAK-Hintergrund durch Hausbrand zu sehen. Der saisonale Verlauf war ab 2019 für S16PAK nicht mehr zu erkennen. Vielmehr lagen die Summen der 16 PAK in Graskultur in einem relativ engen niedrigen Bereich unter 30  $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ .

Die **PAK4-Gehalte in Graskultur** (Bild 3.11-2 Mitte) zeigten nur im Jahr 2017 einen tendenziell saisonalen Verlauf mit ansteigenden Werten zu Herbst hin (Serie 5). Ab 2018 lagen die Hintergrundwerte – ohne BIS und MEF – in einem relativ engen niedrigen Bereich bis 3  $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ . Die PAK4-Gehalte an den Messpunkten BIS und MEF lagen mit bis rund 6  $\mu\text{g}/\text{kg TM}$  temporär höher: ab 5. Serie 2017 bis zur 5. Serie 2020 ohne einen zeitlichen Trend. Im zweiten Jahr der Coronapandemie 2021 lagen sie an MEF im niedrigen Hintergrundbereich um 2  $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ , genauso wie 2017. Dieses Ergebnis lässt sich mit Effekten aufgrund Sperrung der Nordbahn zur deren Sanierung 2021 (Bild 1.3-1) und entsprechenden Windrichtungsverteilungen (Bild 9.1-2), oder Auswirkungen der Coronapandemie auf Verkehr und Flughafenbetrieb nicht eindeutig zur Deckung bringen. Im Jahr 2022 lagen die PAK4 in den Graskultur Serien 1–3 und 4 an MEF um 3  $\mu\text{g}/\text{kg TM}$  und in Serie 5 bei über 6  $\mu\text{g}/\text{kg TM}$  so wie im Jahr 2020.

Die **Benzo[a]pyren-Gehalte in Graskultur** (Bild 3.11-2 unten) zeigten keine saisonalen Verläufe. Sie ließen auch keine zeitliche Entwicklung erkennen, die mit den Flugzahlen und deren drastischen Rückgang ab 2020 korrespondieren würden und dem Wiederanstieg auf 70 % der Vor-Coronajahre im Jahr 2022. Für Benzo[a]pyren wie für PAK4 in Graskultur fällt vielmehr auf, dass OmH-Überschreitungen am betriebsnahen Messpunkt MEF auch im ersten Jahr der Coronapandemie 2020 auftraten, oder 2022, nicht aber 2017, bei vergleichsweise hohen Flugzahlen.

Die **S16PAK-Gehalte in Grünkohl** (Bild 3.11-2 oben) zeigten 2017 vergleichsweise höhere Werte im Untersuchungsgebiet als in den nachfolgenden Jahren. Die Werte 2020 und 2021 lagen im Bereich der

Werte 2018 und 2019. Nur am Messpunkt BIS zeigte sich 2020 und 2021 ein Rückgang der dortigen Maxima. Die Messung 2022 zeigt für BIS innerorts erwartungsgemäß ein Maximum bei  $173\mu\text{g}/\text{kg TM}$ , vergleichbar mit den Maxima 2018 und 2019, aber unerwartet niedrige S16PAK- an den anderen Messpunkten, insbesondere ein Minimum an MEF.

Die **PAK4**-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 Mitte) lagen im gesamten Betrachtungszeitraum 2017–2022 in vergleichbaren Wertebereichen – mit Ausnahme davon abgesetzt höhere PAK4-Werte von rund  $25\text{--}50\mu\text{g}/\text{kg TM}$  an BIS. Für das Jahr 2022 fällt der enge, niedrige Wertebereich von rund  $15\mu\text{g}/\text{kg TM}$  an den anderen Messpunkten auf.

Die **Benzo[a]pyren**-Gehalte in Grünkohl ließen ebenfalls keinen zeitlichen Trend erkennen (Bild 3.11-2 unten). Vielmehr schwankten die Wertekollektive von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und wiesen unterschiedlich hohe Streuungen auf. Anders als für PAK4 traten – außer im Jahr 2017 – keine BaP-Maxima an BIS auf.

Für die PAK, insbesondere in Grünkohl, hat die Hausbrandaktivität Bedeutung. Sie wird von der Witterung beeinflusst. Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Flughafenbetrieb, den Flugzahlen und deren drastischen Rückgang ab 2020 korrespondieren würde (Bild 1.3-1), wurde für PAK nicht deutlich.

#### **Messpunktastufung und Quellenzuordnung:**

Der relative Messpunktvergleich anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) ermöglicht es, eine etwaig unterschiedliche Gesamtbelastung unterhalb OmH-Schwelle an den Messpunkten sichtbar zu machen.

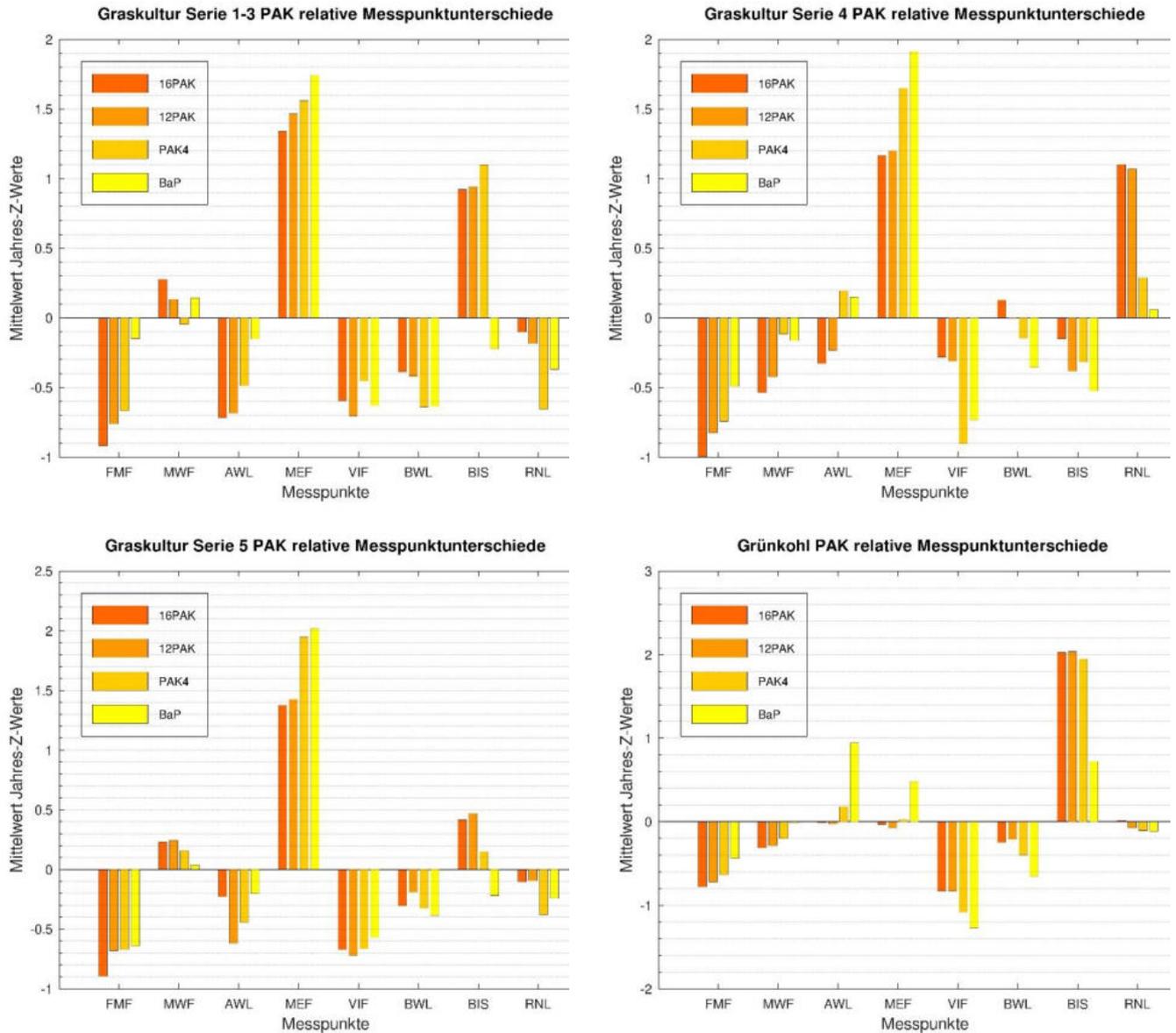
Für Graskultur Serie 1–3 im Mai (Bild 3.11-3, nachfolgende Seite, Bild links oben) traten an Messpunkt MEF betriebsnah für alle vier PAK-Parameter deutlich überdurchschnittliche Werte (um 1,5) auf. Für S16PAK, S12PAK und PAK4 traten überdurchschnittliche Werte (rund 1) auch an Messpunkt BIS auf. An den naturnahen Messpunkten FMF und VIF und den landwirtschaftlich geprägten Messpunkten AWL, BWL und für PAK4 an RNL traten für Serie 1–3 schwach unterdurchschnittliche Werte ( $-0,5$  –  $-1$ ) auf.

Für Graskultur Serie 4 Ende Juli bis Mitte August (Bild 3.11-3, nachfolgende Seite, Bild rechts oben) blieb das Ergebnis am Messpunkt MEF gleich: die vier PAK-Parameter deutlich überdurchschnittlich ( $1,2\text{--}2$ ) – vor allem PAK4 und BaP. An BIS waren die Werte durchschnittlich bis unterdurchschnittlich, während S16PAK und S12PAK am landwirtschaftlich geprägten Messpunkt RNL überdurchschnittlich ausfielen (rund 1). Für Graskultur Serie 4 zeigten die landwirtschaftlich geprägten Messpunkte AWL und BWL nicht mehr schwach unterdurchschnittliche Werte ( $-0,5$ ), sondern eher durchschnittliche. Dafür aber zeigte der betriebsnahe Messpunkt MWF unterdurchschnittliche Werte für S16PAK und S12PAK (knapp  $-0,5$ ), sowie die naturnahen Messpunkte FMF für alle vier Parameter und VIF für PAK4 und BaP.

Für Graskultur Serie 5 Mitte August bis Mitte September (Bild 3.11-3, nachfolgende Seite, Bild links unten) ähnelt das Ergebnis sehr stark dem für Graskultur Serie 1–3 im Mai: an MEF deutlich überdurchschnittliche Werte ( $1,4\text{--}2$ ), während an BIS nur schwach überdurchschnittliche Werte für S16PAK und S12PAK auftraten (rund  $0,5$ ). An den naturnahen Messpunkten FMF und VIF traten für die vier Parameter schwach unterdurchschnittliche Werte auf (rund  $-0,5$ ), an den landwirtschaftlich geprägten Messpunkten noch schwächer und nur für S12PAK, PAK4 oder BaP.

Für Grünkohl (Bild 3.11-3, Bild rechts unten) traten an Messpunkt BIS innerorts für S16PAK, S12PAK und PAK4 deutlich überdurchschnittliche Werte auf (rund 2). Für BaP traten an BIS wie an den Messpunkten AWL und MEF schwach überdurchschnittliche Werte ( $0,5\text{--}1$ ) auf.

An den naturnahen Messpunkten FMF und VIF traten für die vier PAK-Parameter in Grünkohl unterdurchschnittliche Werte ( $-0,5$  –  $-1$ ) auf, außerdem schwächer (rund  $-0,5$ ) für PAK4 und BaP an BWL.



**Bild 3.11-3: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für PAK 2017–2022**

separate Darstellung für Graskultur Serie1–3 (Mai – Juli, oben links), Serie 4 (Ende Juli – Mitte August, oben rechts) und Serie 5 (Mitte August – Mitte September, unten links) sowie für Grünkohl (unten rechts):

Summen 16 PAK (S16PAK, rote Balken), Summen 12 PAK (S12PAK, dunkelorange Balken), PAK4 (hellorange Balken) und Benzp[a]pyren (BaP, gelbe Balken)

In Expositionsabschnitten, in denen witterungsbedingt häusliche Kleinf Feuerungsanlagen aktiv sind, und somit Hausbrand die maßgebliche Quelle von PAK darstellt, traten an Messpunkt BIS innerorts überdurchschnittliche PAK-Gehalte auf. Die Ursache von leicht überdurchschnittlichen S16PAK und S12PAK-Werten an Messpunkt RNL im Hochsommer (Graskultur Serie 4) ist nicht bekannt. Die relative Messpunktastufung zeigt Messpunkt MEF am Ostende der Nordbahn des Flughafens von Mai bis September durchgängig mit überdurchschnittlichen PAK-Werten – anschließend, während der Grünkohlexposition im Herbst, nur noch für BaP. Messpunkt MWF am Westende der Südbahn des Flughafens hingegen weist

insgesamt durchschnittliche Werte auf. Was unterscheidet MEF von MWF hinsichtlich Lage zu den potenziellen Quellen Flughafenbetrieb und Kfz-Verkehr:

- Die Hauptwindrichtung ist West-Südwest (langjähriger Durchschnitt, rund 60 % West- und 40 % Ostwinde, Bild 2.7-1), von den Start-Landebahnen in Richtung Ost (weg von MWF, hin zu MEF).
- Bei Westwinden starten die Flugzeuge in Richtung West: Sie starten am Ostende der Bahn (nahe MEF) und haben beim Überflug über das Westende (nahe MWF) eine gewisse Flughöhe erreicht.
- MEF ist deutlich näher am Straßenverkehr gelegen: MEF mit knapp 50 m und MWF mit knapp 300 m Abstand zur Fahrbahn (Bild 9.2-4 und Bild 9.2-2).

### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann zunächst durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1 und Tabelle 3.11-1):

Die hier für Graskultur ermittelten OmH liegen niedriger als Vergleichs-OmH für den quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern (BayLfU 2017, Datenbasis 2005–2014; aktuellere OmH aus VDI-Richtlinien für Graskultur liegen nicht vor):

- für S16PAK in Graskultur Serien 1–3 / 4 / 5 OmH hier im Untersuchungsgebiet 26 / 28 / 40 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 44 / 44 / 107 µg/kg TM im ländlichen bayerischen Hintergrund,
- für S12PAK in Graskultur Serien 1–3 / 4 / 5 OmH hier im Untersuchungsgebiet 20 / 22 / 34 µg/kg TM gegenüber den Vergleichs-OmH von - / 29 / 87 µg/kg TM,
- für PAK4 in Graskultur Serien 1–3 / 4 / 5 hier im Untersuchungsgebiet 2,6 / 2,1 / 4,1 µg/kg TM gegenüber den Vergleichs-OmH von 8,6 / 8,1 / 16 µg/kg TM,
- für Benzo[a]pyren in Graskultur Serien 1–3 / 4 / 5 hier im Untersuchungsgebiet 0,5 / 0,3 / 0,7 µg/kg TM gegenüber den Vergleichs-OmH von 1,8 / 0,8 / 2,1 µg/kg TM.

Die für Grünkohl ermittelten OmH liegen deutlich niedriger als die aktuellen überregionalen Vergleichs-OmH (VDI 3957/3):

- für S16PAK in Grünkohl OmH hier im Untersuchungsgebiet 162 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH 330 µg/kg TM,
- für S12PAK OmH hier im Untersuchungsgebiet 156 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 304 µg/kg TM,
- für PAK4 OmH hier im Untersuchungsgebiet 30 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 63 µg/kg TM,
- für BaP OmH hier im Untersuchungsgebiet 2,7 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 4,6 µg/kg TM.

Die Wertebereiche der PAK im Umfeld des Flughafens München 2017–2022 sind mit anderen aktuellen Graskultur-Biomonitorings gut vergleichbar (Wäber und Pompe 2023 und 2022a, BayLfU 2022):

- rund 10–40 µg/kg TM S16PAK, rund 1–6,5 µg/kg TM PAK4 und 0,1–1,8 µg/kg TM BaP im Umfeld des Flughafens München 2017–2022;
- 14–42 µg/kg TM S16PAK, 2,0–6,8 µg/kg TM PAK4 und rund 0,4–1,7 µg/kg TM BaP im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022;
- 21–76 µg/kg TM S16PAK, rund 4–24 µg/kg TM PAK4 und rund 0,4–2,6 µg/kg TM BaP im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER 2013, 2015, 2022.

Die PAK-Wertebereiche in Grünkohl 2017–2022 sind niedriger als beim Grünkohl-Biomonitoring 2012 des Flughafens Berlin Schönefeld und liegen im Bereich ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern 2012–2014 – als aktuellsten publizierten Vergleichsuntersuchungen (Wäber 2016, BayLfU 2017):

- 77–260 µg/kg TM S16PAK, rund 10–50 µg/kg TM PAK4 und 0,8–3,2 µg/kg TM BaP im Umfeld des Flughafens München 2017–2022;
- 260–560 µg/kg TM S16PAK und rund 4–12 µg/kg TM BaP im Umfeld des Flughafens Berlin Schönefeld 2012 (keine Angabe zu PAK4);
- 76–322 µg/kg TM S16PAK, 9–43 µg/kg TM PAK4 und <0,1–2,7 µg/kg TM BaP im ländlichen Hintergrund in Bayern 2012–2014.

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet um den Flughafen München 2017–2022 ist bezüglich PAK somit als unauffällig niedrig zu bewerten.

### Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung

Höchstgehalte für PAK in Futtermitteln gemäß Futtermittelverordnung und als langfristige Empfehlungswerte anwendbare Maximale Immissions-Werte sind nicht festgesetzt. Auch gesetzliche Höchstgehalte für PAK in Hinblick auf den Gesundheitsschutz des Menschen für Blattgemüse-Lebensmittel wie Grünkohl liegen nicht vor (Tabelle 2.6-2). In Verordnung (EU) 2015/1933 sind Höchstgehalte für trockene pflanzliche Lebens- und Nahrungsergänzungsmittel, wie für Bananenchips und getrocknete Kräuter und Gewürze, festgelegt. Sie wurden bereits vom BayLfU hilfsweise zur Beurteilung für PAK4- und Benzo[a]pyren-Gehalten in Grünkohl beim Biomonitoring angewendet (BayLfU 2017).

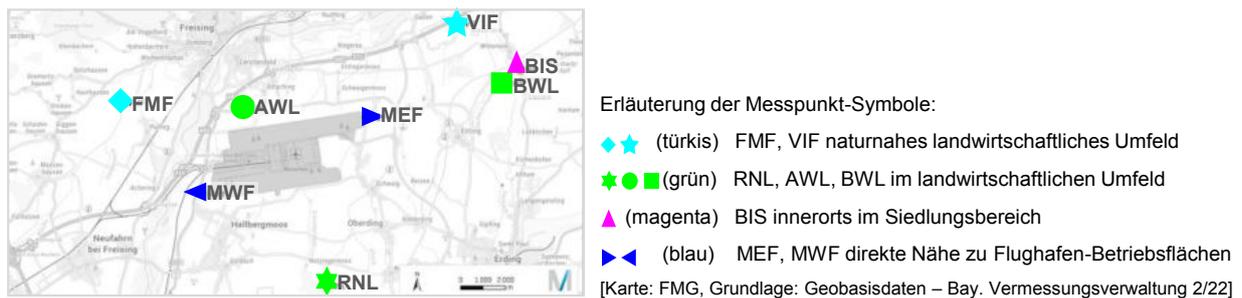
- Die Höchstgehalte für getrocknete Kräuter betragen 50 µg/kg für PAK4 und 10 µg/kg für BaP.
- Der Vergleich den Gehalten in Graskultur – rund 1–8 µg/kg TM PAK4 und 0,1–1,8 µg/kg BaP –
- und mit den Gehalten in Grünkohl – rund 10–50 µg/kg TM PAK4 und 0,8–3,2 µg/kg TM BaP –

bestätigt, dass die Ergebnisse 2017–2022 insgesamt nicht hoch waren. Von einer Gefährdung hinsichtlich PAK war im Jahr 2022, wie in den Vorjahren, an keinem der Messpunkte auszugehen. Diese Beurteilung ist nur orientierend zu sehen, da

- jede Pflanzenart individuelle Anreicherungseigenschaften besitzt,
- die Bioindikatoren Graskultur und Grünkohl ungewaschen und nicht verzehrfertig aufbereitet analysiert werden.

## 4 Messergebnisse 2022

Die Darstellung der Messwerte 2022 erfolgt wie in den Datendokumentationen der Vorjahre anhand von Säulendiagrammen. Die Einzelwerte sind im Anhang zudem tabellarisch dokumentiert. Die Säulendiagramme für Graskultur- und Grünkohl-Biomonitoring beinhalten die an den Messpunkten am Flughafen München und in seiner unmittelbaren Umgebung ermittelten Messwerte – in der Reihung der Messpunkte von West nach Ost (Bild 4.1-1). Zunächst sind die Metallergebnisse dargestellt, danach die PAK.



**Bild 4.1-1: Messpunktreihe von West nach Ost – mit RNL, VIF, BWL, die 2022 pausierten**

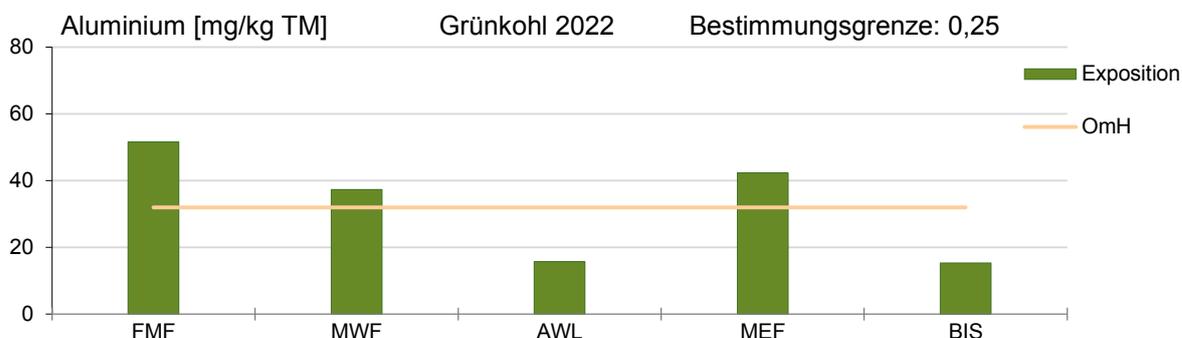
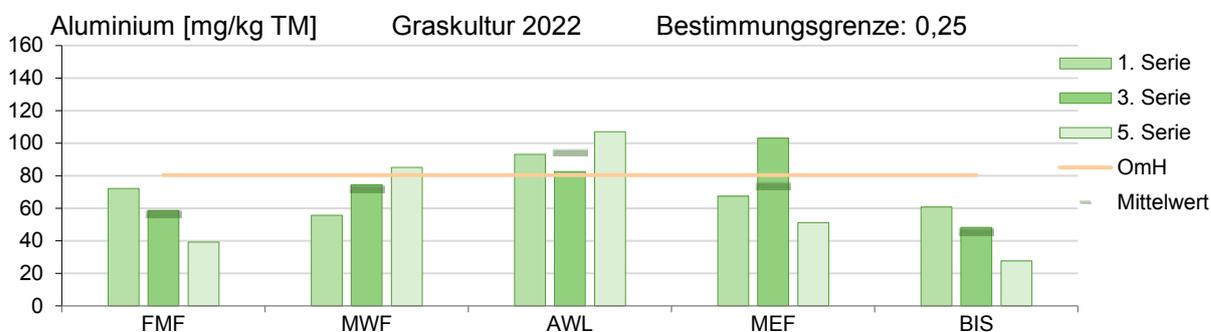
Dabei wird wie gehabt der Vergleich mit Beurteilungswerten aus Höchstmengen-Regelungen der Lebensmittel- und Futtermittelüberwachung (Tabelle 2.6-2) vorgenommen. Sind für den jeweiligen Stoff derartige Beurteilungswerte festgelegt, sind diese unter den Säulendiagrammen gelistet (blassrot unterlegt, umgerechnet bezogen auf 100 % Trockenmasse) und die Messergebnisse entsprechend bewertet. Deren Überschreitung wäre als Hinweis zu werten, dass **Gefährdungen von Menschen oder Tieren über die Nahrungskette** nicht auszuschließen sind.

Die nachfolgende Darstellung der Messergebnisse 2022 umfasst zusätzlich die stoffspezifischen Orientierungswerte OmH als Schwellen für die Hintergrundbelastung im Untersuchungsgebiet um den Flughafen München (Tabelle 2.6-1), um zu beantworten, ob in der Umgebung des Flughafens **Immissionseinflüsse feststellbar** sind. Die OmH sind in den Säulendiagrammen als Linie eingezeichnet (blassorange) und unterhalb der grafischen Darstellungen gelistet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein gemessener Stoffgehalt abzüglich der Standardunsicherheit [ $u$  in %] den OmH überschreiten muss, um als Immissionseinfluss gewertet zu werden. Falls  $u$  nicht bekannt ist, muss der gemessene Wert  $\geq 1,5 \cdot OmH$  betragen (Kap.2.6).

Die Bewertung der Untersuchungsdaten 2022 erfolgte darüber hinaus umfangreicher und im Umgriff über die letzten fünf Jahre, um die weiteren zentralen Fragestellungen des Biomonitorings zu beantworten: **ob Immissionswirkungen vorhandenen Emissionsquellen zugeordnet werden können, wie die Wirkungssituation in der zeitlichen Entwicklung 2017–2022 verläuft und wie sie zu bewerten ist.**

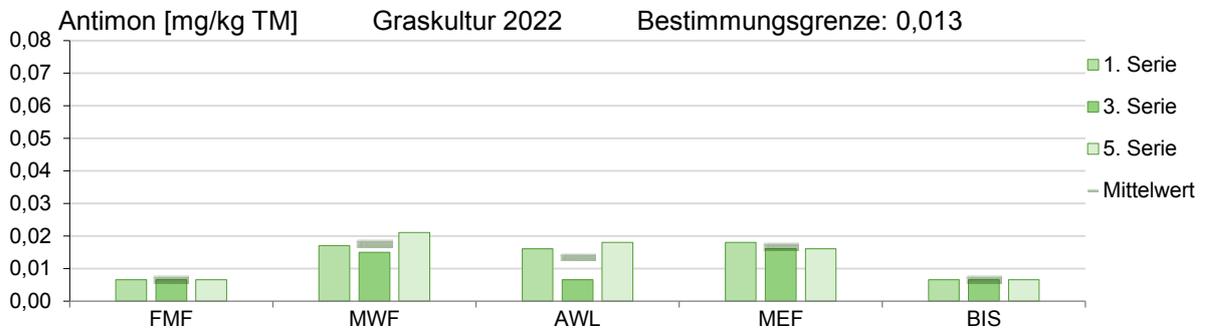
Die Bewertung der Ergebnisse 2017–2022 ist in Kapitel 3 dargestellt und wird in Kapitel 5 zusammengefasst.

## 4.1 Aluminium 2022



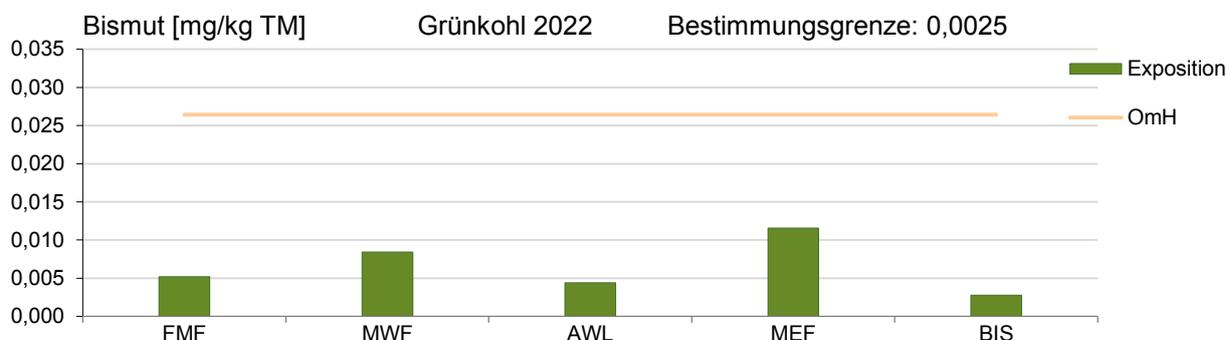
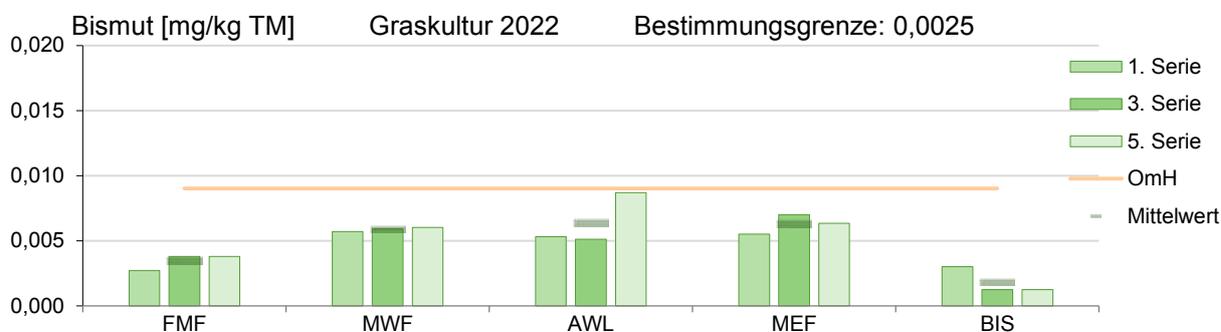
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)            | Untersuchungen 2022  |
|--|--|
| Futtermittel-Empfehlungswerte:<br>Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>568 mg/kg TM</b><br>(Rinder / Schafe) | Die Aluminiumgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.  |
| OmH für Aluminium in Graskultur: <b>80 mg/kg TM</b>  | Die Aluminiumgehalte in Graskultur unterschritten den OmH. Die Werte abzüglich Standardunsicherheit $\pm 33\%$ für Aluminium lagen unterhalb OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.                        |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –   | Aluminiumgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)  |
| OmH für Aluminium in Grünkohl: <b>32 mg/kg TM</b>  | Die Aluminiumgehalte in Grünkohl unterschritten den OmH – mit einer Ausnahme: Am Messpunkt FMF lag der Aluminiumgehalt in Grünkohl über dem 1,5fachen des OmH. Dort lag folglich ein Immissionseinfluss vor. |

## 4.2 Antimon 2022



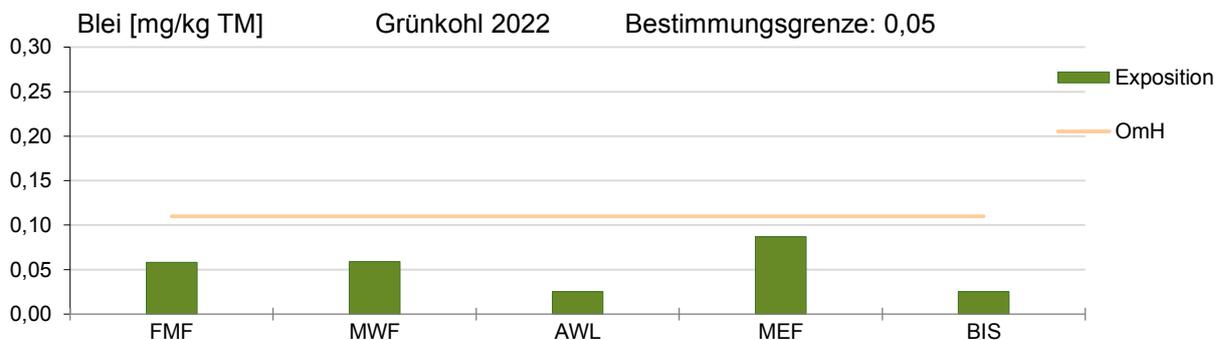
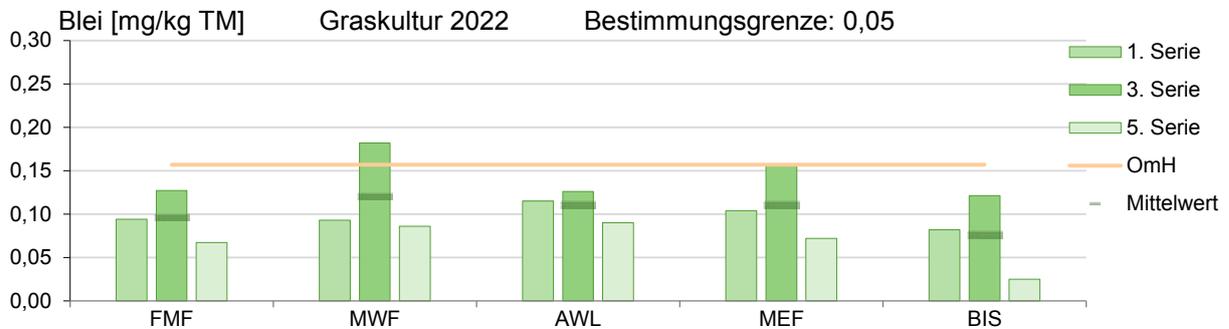
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH) | Untersuchungen 2022  |
|---|--|
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Antimongehalte in Graskultur (Bild oben)   |
| OmH für Antimon in Graskultur: – (>75% Werte <BG)   | Die Antimongehalte in Graskultur lagen an den Messpunkten FMF und BIS unterhalb der Bestimmungsgrenze: <0,025 mg/kg TM sowie einmal an AWL.  |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Antimongehalte in Grünkohl (Bild Mitte)  |
| OmH für Antimon in Grünkohl: <b>0,035 mg/kg TM</b>  | Der Antimongehalt in Grünkohl lag an Messpunkt BIS unterhalb Bestimmungsgrenze: <0,02 mg/kg TM. Die Antimongehalte unterschritten den OmH – mit einer Ausnahme: Am Messpunkt MWF lag der Antimongehalt in Grünkohl $\geq 1,5 \cdot$ OmH. Dort lag folglich ein Immissionseinfluss vor. |

### 4.3 Bismut 2022



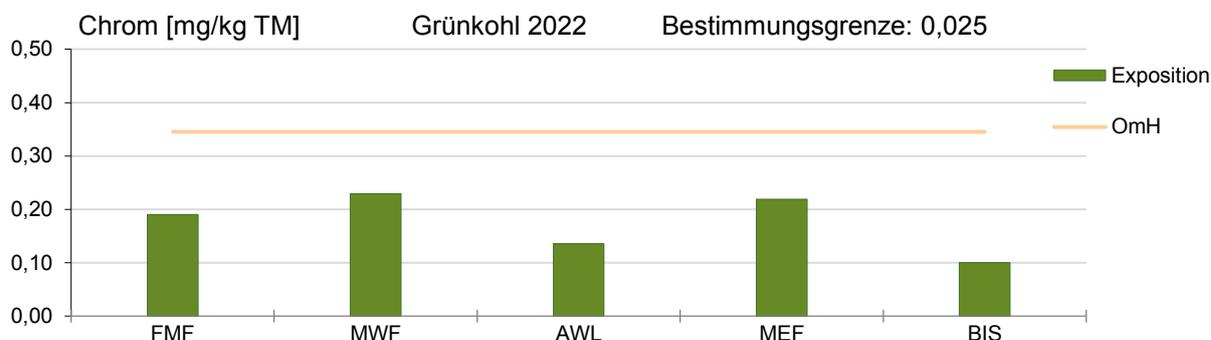
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH) | Untersuchungen 2022   |
|---|---|
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Bismutgehalte in Graskultur (Bild oben)   |
| OmH für Bismut in Graskultur: <b>0,090 mg/kg TM</b>   | Die Bismutgehalte in Graskultur lagen an Messpunkt BIS zweimal unterhalb der Bestimmungsgrenze: <0,0025 mg/kg TM. Sie unterschritten den OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Bismutgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)  |
| OmH für Bismut in Grünkohl: <b>0,026 mg/kg TM</b>   | Die Bismutgehalte in Grünkohl unterschritten den OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.   |

#### 4.4 Blei 2022



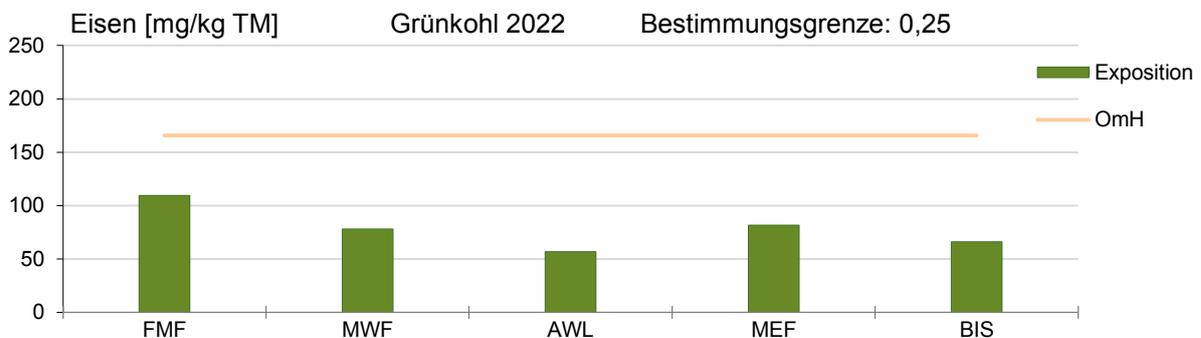
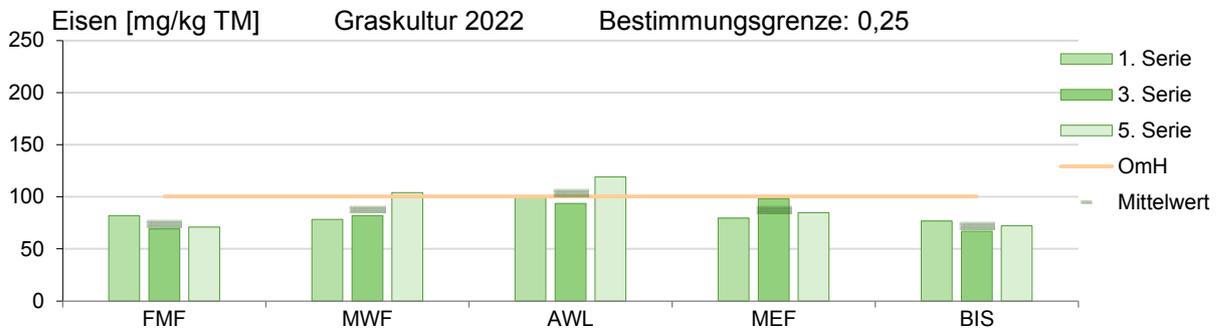
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)  | Untersuchungen 2022   |
|--|---|
| Futtermittel-Höchstgehalt (FuttMV): <b>34 mg/kg TM</b><br>Futtermittel-Empfehlungswerte:<br>Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>1-1,5 mg/kg TM</b> (Rinder), <b>4,5-6,8 mg/kg TM</b> (Schafe) | Die Bleigehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten den Futtermittel-Höchstgehalt und die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.  |
| OmH für Blei in Graskultur: <b>0,16 mg/kg TM</b>   | Der Bleigehalt in Graskultur an Messpunkt BIS lag einmal unterhalb der Bestimmungsgrenze: <0,050 mg/kg TM. Die Werte abzüglich Standardunsicherheit $u$ 15 % lagen unterhalb OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor. |
| Höchstgehalt für Blattkohl-Lebensmittel (Verordnung (EU) 2015/1005): <b>0,30 mg/kg FM (Frischmasse)</b>  | Die Bleigehalte in Grünkohl (Bild Mitte), umgerechnet 0,004 (<BG) bis 0,017 mg/kg FM, unterschritten Lebensmittel-Höchstgehalt deutlich.  |
| OmH für Blei in Grünkohl: <b>0,11 mg/kg TM</b>   | Die Bleigehalte in Grünkohl lagen in zwei Fällen unterhalb der Bestimmungsgrenze: <0,05 mg/kg TM (AWL, BIS). Sie unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.  |

## 4.5 Chrom 2022



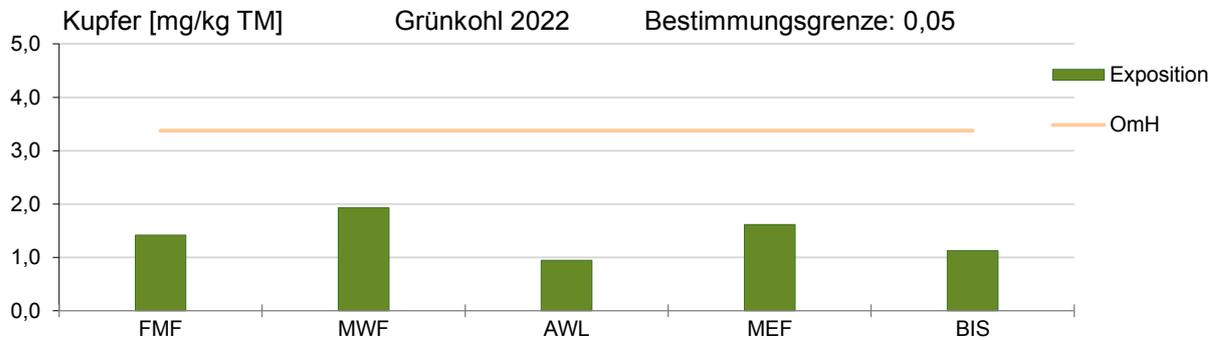
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)           | Untersuchungen 2022   |
|---|---|
| Futtermittel-Empfehlungswerte:<br>Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>57 mg/kg TM</b><br>(Rinder / Schafe) | Die Chromgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.   |
| OmH für Chrom in Graskultur: <b>0,35 mg/kg TM</b>   | Die Chromgehalte in Graskultur unterschritten den OmH: Da auch der Messwert 0,36 mg/kg TM am Messpunkt AWL abzüglich Standardunsicherheit $u$ von 22 % unterhalb OmH lag. Es lag kein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Chromgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)   |
| OmH für Chrom in Grünkohl: <b>0,35 mg/kg TM</b>   | Die Chromgehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.  |

## 4.6 Eisen 2022



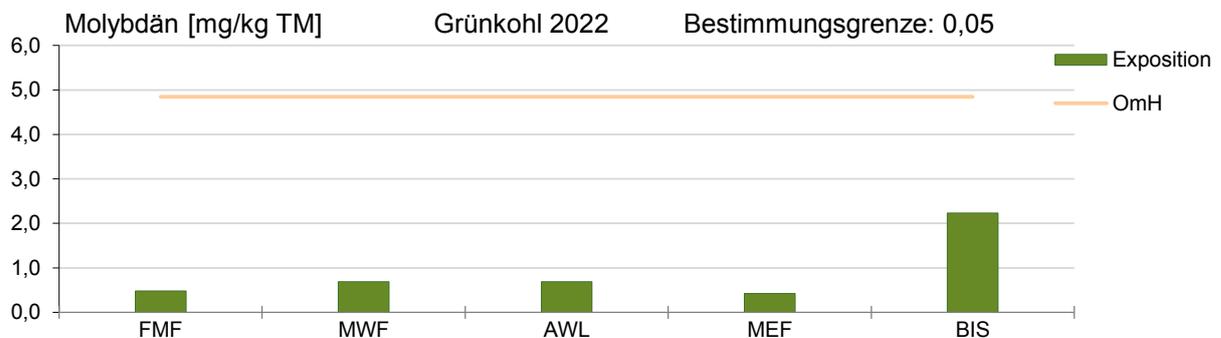
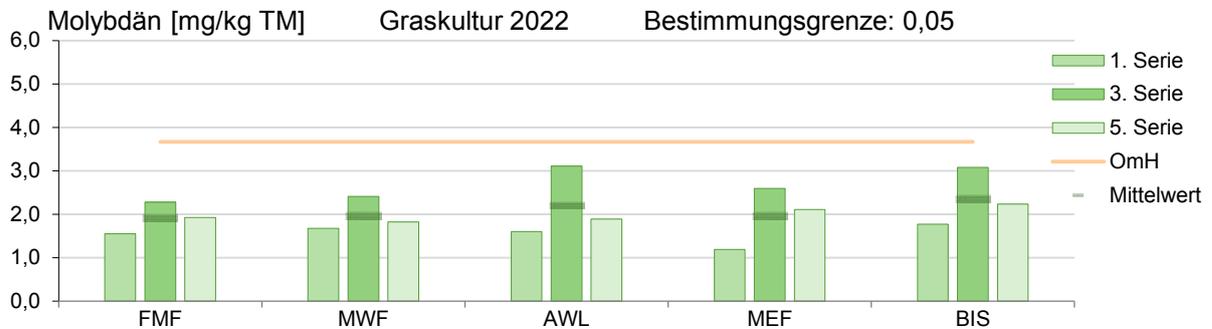
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH) | Untersuchungen 2022   |
|---|---|
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Eisengehalte in Graskultur (Bild oben)  |
| OmH für Eisen in Graskultur: <b>100 mg/kg TM</b>  | Die Eisengehalte in Graskultur unterschritten den OmH: Da auch der Messwert 119 mg/kg TM am Messpunkt AWL abzüglich Standardunsicherheit $u$ von 16 % unterhalb OmH lag, lag kein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Eisengehalte in Grünkohl (Bild Mitte)   |
| OmH für Eisen in Grünkohl: <b>166 mg/kg TM</b>  | Die Eisengehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.  |

## 4.7 Kupfer 2022



| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH) | Untersuchungen 2022  |
|---|--|
|   | Kupfer wurde in Graskultur nicht analysiert, da Anreicherungseffekte über die Wurzel aus dem Substrat auftreten können (VDI 3957/2, 2020). |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Kupfergehalte in Grünkohl (Bild oben)  |
| OmH für Kupfer in Grünkohl: <b>3,4 mg/kg TM</b>   | Die Kupfergehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.  |

## 4.8 Molybdän 2022



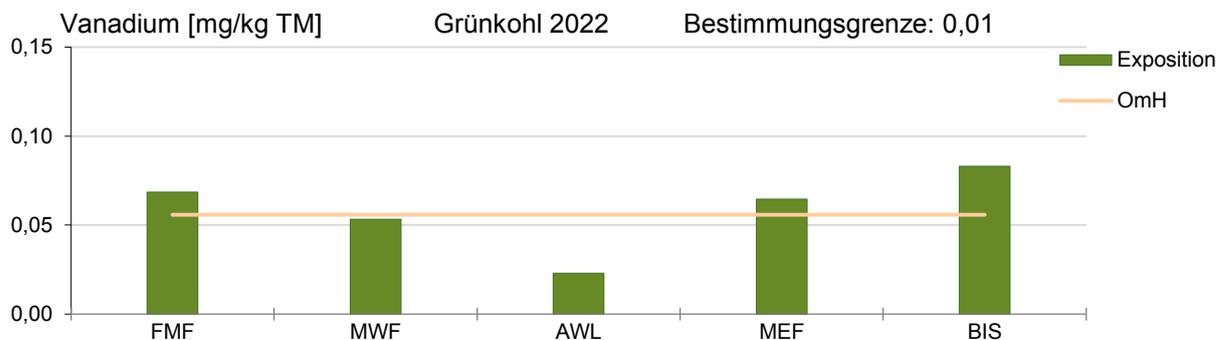
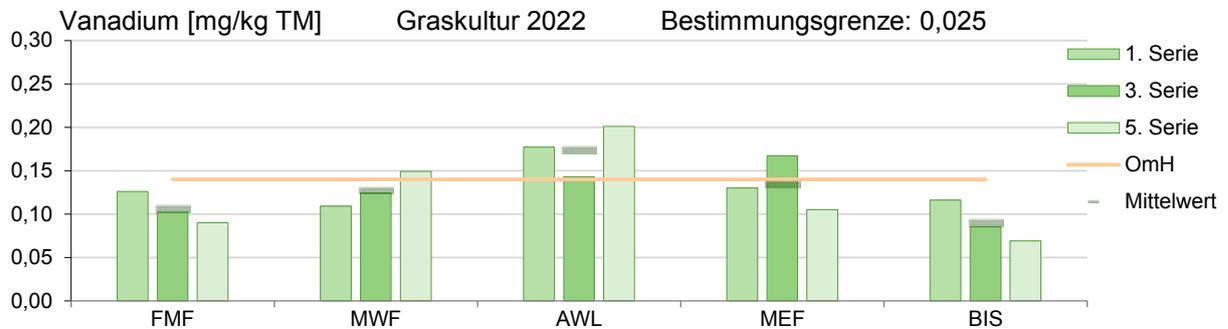
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)                              | Untersuchungen 2022  |
|--|--|
| Futtermittel-Empfehlungswerte:<br>Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>11,4 mg/kg TM</b> (Rinder), <b>57 mg/kg TM</b> (Schafe) | Die Molybdängehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich. |
| OmH für Molybdän in Graskultur: <b>3,7 mg/kg TM</b>  | Die Molybdängehalte in Graskultur unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.            |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –   | Molybdängehalte in Grünkohl (Bild Mitte)   |
| OmH für Molybdän in Grünkohl: <b>4,9 mg/kg TM</b>  | Die Molybdängehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.              |

## 4.9 Nickel 2022



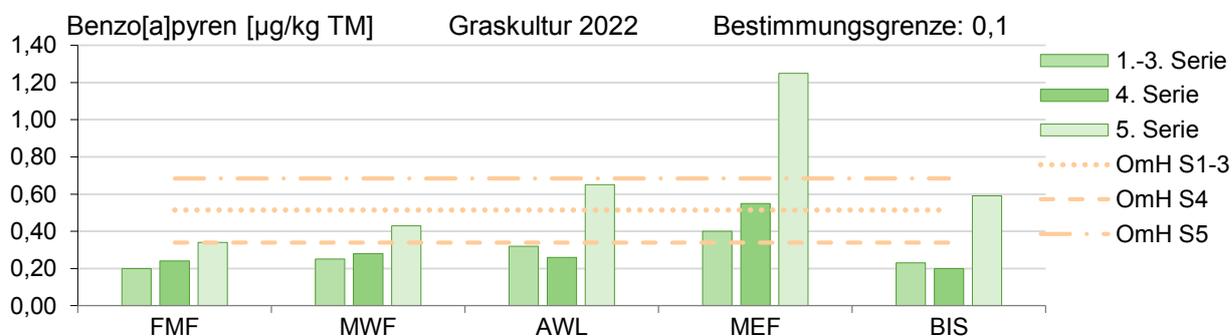
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)           | Untersuchungen 2022   |
|---|---|
| Futtermittel-Empfehlungswerte:<br>Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>57 mg/kg TM</b><br>(Rinder / Schafe) | Die Nickelgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.                            |
| OmH für Nickel in Graskultur: <b>5,0 mg/kg TM</b>   | Die Nickelgehalte in Graskultur unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.                                       |
|   | Nickel wurde in Grünkohl nicht analysiert, da Grünkohl Nickel in erhöhtem Maß aus dem Substrat aufnehmen kann (VDI 3957/3, 2022). |

## 4.10 Vanadium 2022



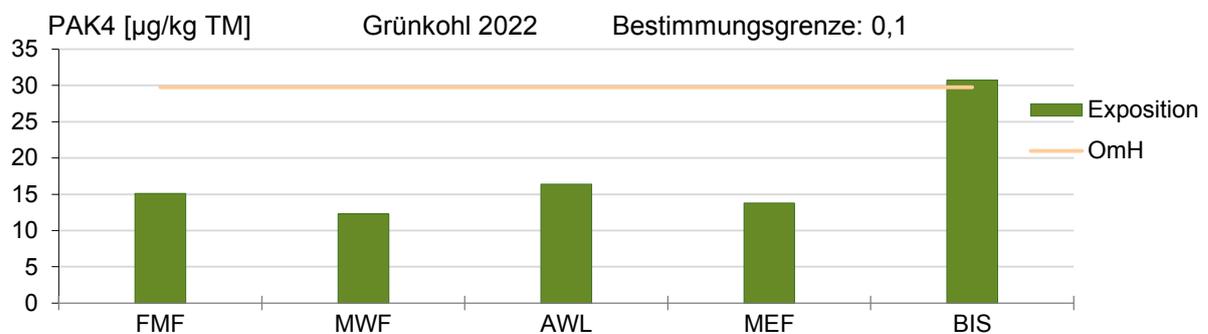
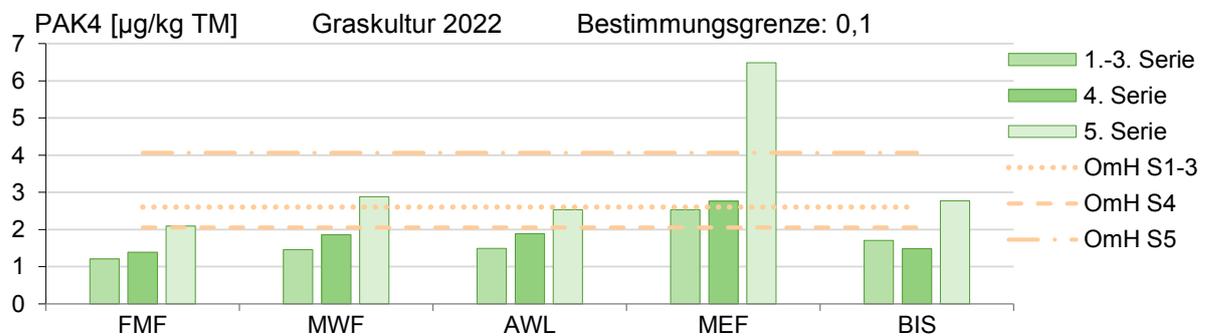
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH) | Untersuchungen 2022   |
|---|---|
| Futtermittel-Empfehlungswert:<br>Max. Immissions-Wert (VDI 2310): <b>11,4 mg/kg TM</b> (Schafe)   | Die Vanadiumgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten den Futtermittel-Empfehlungswert deutlich.   |
| OmH für Vanadium in Graskultur: <b>0,14 mg/kg TM</b>  | Die Vanadiumgehalte in Graskultur abzüglich Standardunsicherheit $\pm 20\%$ überschritten in zwei Fällen den OmH: An Messpunkt AWL in der 1. und 3. Serie 2022 lag dort ein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  | Vanadiumgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)  |
| OmH für Vanadium in Grünkohl: <b>0,056 mg/kg TM</b>   | Die Vanadiumgehalte in Grünkohl unterschritten den OmH, da alle Messwerte nicht $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$ betragen. Es lag kein Immissionseinfluss vor.   |

### 4.11 Benzo[a]pyren 2022



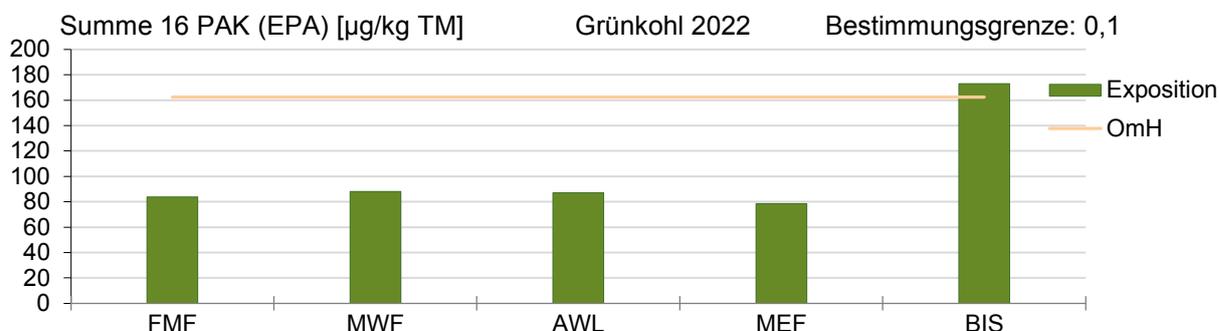
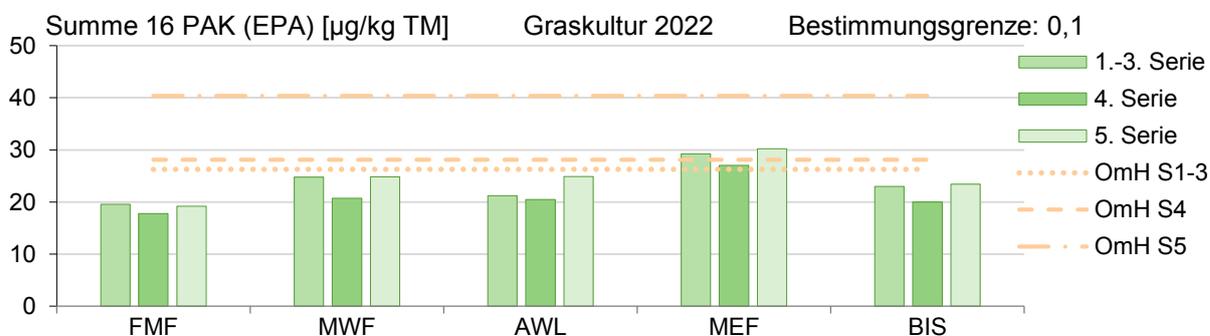
| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)   |  | Untersuchungen 2022  |
|---|--|--|
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  |  | Benzo[a]pyren-Gehalte in Graskultur (Bild oben)  |
| OmH für Benzo[a]pyren in Graskultur<br>Serie 1–3 (gepunktete Linie): <b>0,52 µg/kg TM</b> ,<br>Serie 4 (gestrichelte Linie): <b>0,34 µg/kg TM</b> ,<br>Serie 5 (Punkt-Strich-Linie): <b>0,69 µg/kg TM</b> |  | Die Benzo[a]pyren-Gehalte in Graskultur unterschritten die für die Expositionsabschnitte (Serien 1–3, 4, 5) separat ermittelten OmH – mit zwei Ausnahmen: An Messpunkt MEF betragen die BaP-Gehalte in Gras Serie 4 und 5 $\geq 1,5 \cdot$ OmH. Dort lag ein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –  |  | Benzo[a]pyren-Gehalte in Grünkohl (Bild Mitte)   |
| OmH für Benzo[a]pyren in Grünkohl: <b>2,7 µg/kg TM</b>  |  | Die Benzo[a]pyren-Gehalte in Grünkohl zuzüglich Standardunsicherheit $u$ 18% unterschritten den OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.   |

## 4.12 PAK4 2022



| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)  |  | Untersuchungen 2022  |
|--|--|--|
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –   |  | PAK4-Gehalte in Graskultur (Bild oben)   |
| OmH für PAK4 in Graskultur<br>Serie 1–3 (gepunktete Linie): <b>2,6 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> ,<br>Serie 4 (gestrichelte Linie): <b>2,1 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> ,<br>Serie 5 (Punkt-Strich-Linie): <b>4,1 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> |  | Die PAK4-Gehalte in Graskultur unterschritten die für die Expositionsabschnitte (Serien 1–3, 4, 5) separat ermittelten OmH, da alle Messwerte bis auf eine Ausnahme nicht $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$ betragen. Die Ausnahme: An Messpunkt MEF lag in Gras Serie 5 ein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –   |  | PAK4-Gehalte in Grünkohl (Bild Mitte)  |
| OmH für PAK4 in Grünkohl: <b>29,8 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b>  |  | Die PAK4-Gehalte in Grünkohl zuzüglich Standardunsicherheit $u$ 35% unterschritten den OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.  |

### 4.13 Summe 16 PAK (EPA) 2022



| Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)  | Untersuchungen 2022  |
|--|--|
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –   | S16PAK-Gehalte in Graskultur (Bild oben)   |
| OmH für Summe der 16 PAK (S16PAK) in Graskultur<br>Serie 1–3 (gepunktete Linie): <b>26 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> ,<br>Serie 4 (gestrichelte Linie): <b>28 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> ,<br>Serie 5 (Punkt-Strich-Linie): <b>40 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> | Die S16PAK-Gehalte in Graskultur unterschritten die für die Expositionsabschnitte (Serien 1–3, 4, 5) separat ermittelten OmH, da alle Messwerte nicht $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$ betragen.<br>Es lag kein Immissionseinfluss vor. |
| Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –   | S16PAK-Gehalte in Grünkohl (Bild Mitte)  |
| OmH für S16PAK in Grünkohl: <b>162 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b>   | Die S16PAK-Gehalte in Grünkohl zuzüglich Standardunsicherheit $\pm 20\%$ unterschritten den OmH.<br>Es lag kein Immissionseinfluss vor.  |

## 5 Zusammenfassende Bewertung

In der Umgebung des Flughafens München wird seit 2006 ein Biomonitoring von Immissionswirkungen mittels standardisierter Graskultur und Grünkohl-Exposition (VDI 3957 Blatt 2 und Blatt 3) durchgeführt. Das Messnetz (Kap. 2.1) wurde im Berichtsjahr 2022 nochmals um drei der seit 2020 verbliebenen acht Messpunkte reduziert. Im Jahr 2023 wird das kontinuierliche Biomonitoring wieder an den acht repräsentativen Messpunkten durchgeführt werden.

Es wurden zehn Metalle und 16 polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) untersucht: Stoffe, die für die Emissionsquelle Flughafenbetrieb charakteristisch sind und aufgrund ihrer Persistenz in der Umwelt und der Nahrungskette angereichert werden können.

Der hier vorgelegte Bericht geht wie der Vorjahresbericht über die frühere, jährliche Dokumentation der Untersuchungsdaten hinaus und erweitert den Umgriff auf die Jahre 2017–2022 (Kapitel 3). Ziel ist es, die zentralen Fragestellungen des Biomonitorings der Richtlinie VDI 3957 Blatt 10 zu beantworten:

- Sind in der Umgebung des Flughafens Immissionseinflüsse feststellbar?
- Können Immissionswirkungen vorhandenen Emissionsquellen zugeordnet werden?
- Wie ist die zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation?
- Wie hoch ist die Wirkungssituation und wie ist sie zu bewerten?
- Sind Gefährdungen von Menschen oder Tieren über die Nahrungskette zu erwarten?

### Identifikation von Immissionseinflüssen

Gemäß Richtlinie VDI 3857/2 liegt eine gegenüber der Hintergrundbelastung erhöhte Belastung, also ein Immissionseinfluss, vor, wenn ein gemessener Stoffgehalt abzüglich der Standardunsicherheit den Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) überschreitet.

Die Gehalte der Metalle Chrom, Eisen, Kupfer (aktuell nur in Grünkohl analysiert), Molybdän und Nickel (aktuell nur in Graskultur analysiert) unterschritten die stoffspezifischen Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte im Betrachtungszeitraum 2017–2022 mit vereinzelt Ausnahmen (kein relevanter Immissionseinfluss). Die Summen der 16 PAK und die Teilsumme der schwerer flüchtigen 12 PAK lagen ebenfalls unterhalb dieser Schwellen. Für diese Stoffe lag somit an allen Messpunkten 2017–2022 nur die Hintergrundbelastung vor.

Relevante Immissionseinflüsse – mit mehrheitlichen OmH-Überschreitungen – wurden nur für Antimon in Grünkohl an MEF und MWF als betriebsnahen Messpunkten am Flughafen festgestellt.

Schwache Immissionseinflüsse – mit teilweisen nicht mehrheitlichen OmH-Überschreitungen – traten auf:

- an AWL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt für Aluminium und Antimon nur in Grünkohl sowie für Vanadium,
- an BIS als Messpunkt innerorts für PAK saisonal, in Grünkohl,
- an MEF als betriebsnahe Messpunkt am Flughafen für Bismut, Blei, Vanadium und PAK4 mit Benzo[a]pyren als Leitparametern der PAK,
- an RNL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt für Vanadium,
- an FMF als naturnaher Messpunkt für Aluminium nur in Grünkohl.

### **Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation**

Die Bioindikatoren integrieren die natürlichen Witterungseinflüsse, die auch auf die Vegetation wirken. Daher schwanken die Wertekollektive von Graskultur und Grünkohl von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf. So kann etwa Staub von der Blattoberfläche vom Wind oder durch Regenwasser wieder entfernt werden und bei einigen Metallen, die als Spurenelemente fungieren, besteht ein gewisses Aufnahmevermögen aus dem Substrat über die Wurzeln.

So war etwa die Spannbreite der Antimon-, Bismut- und Bleigehalte in Grünkohl im Jahr 2018 im 5-Jahresvergleich am höchsten – höher als 2019, dem Jahr mit dem bislang höchsten Flugverkehrsaufkommen am Flughafen München. Für Aluminium, Antimon, Blei und Eisen traten 2020 und 2021 keine OmH-Überschreitungen auf und die Spannbreite der Werte war somit enger. Allerdings traten auch Jahr 2022, in dem das Flugverkehrsaufkommen auf rund 70 % des Niveaus der Vor-Coronajahre 2018 und 2019 zurückgekehrt war, keine OmH-Überschreitungen für Blei und Eisen auf, für Aluminium nur an FMF. Enge niedrige Wertebereiche z. B. für Eisen kamen auch in früheren Untersuchungsjahren vor (Messberichte 2012 und 2015, ohne Darstellung). Es gilt daher die weitere Entwicklung in den kommenden Jahren zu beobachten, insbesondere von Antimon, das hauptsächlich aus Abrieb aus Bremsbelägen aus dem Verkehr in die Umwelt eingetragen (BayLfU 2017), und von PAK als Verbrennungsrückständen.

An Messpunkt BIS, an dem im Herbst in Grünkohl überdurchschnittliche PAK-Gehalte auftraten (siehe auch nachfolgender Abschnitt), gingen die Summenwerte der 16 PAK und PAK4 2017–2021 zurück, stiegen aber 2022 wieder an.

Insgesamt wurde kein deutlicher Einfluss des Flughafenbetriebs oder eine zeitliche Entwicklung festgestellt, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen 2020 und 2021 korrespondieren würde (Bild 1.3-1).

### **Messpunktastufung und Quellenzuordnung**

Im relativen Messpunktvergleich (anhand normierter Z-Werte, Kapitel 2.6) werden serienweise Schwankungen eliminiert und die Streuung relativiert. Das ermöglicht, überdurchschnittliche und unterdurchschnittliche Gesamtbelastungen an den Messpunkten zu veranschaulichen – auch unterhalb OmH als Schwelle für Immissionseinflüsse.

Für Molybdän ergab sich keine Messpunktastufung. Die Anreicherung über den Luftpfad aus schwachen Quellen, wie Abrieb von Bremsbelägen beim Bodenbetrieb des Flughafens, dürfte durch die Aufnahme von Molybdän aus dem Substrat überlagert sein.

Für die anderen Metalle traten schwach überdurchschnittliche Werte an den betriebsnahen Messpunkten MWF und MEF am Flughafen auf, für einige der Metalle zudem an AWL und RNL als landwirtschaftlich geprägten Messpunkten abseits des Flughafens. An MWF und MEF könnten landwirtschaftliche Bodenbearbeitung und Erdbauarbeiten Staubverfrachtungen auf die weitflächig versiegelten Flächen des Flughafenareals bewirken. Von diesen Flächen als indirekte Quellen können metallhaltige Stäube durch Wind, Verkehr und Flugverkehr wieder aufwirbeln. Dies korrespondiert mit einem aktuellen Graskultur-Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt (BayLfU 2019), das Bodenaufwirbelung von einem nahegelegenen Acker als wesentliche Quelle für die meisten Metalle darstellt. Bremsabrieb und Aufwirbelung von Stäuben von Straßen und versiegelten Oberflächen im Nahbereich des Flughafens als relevante direkte Quelle kommt hingegen nur für Antimon und Chrom in Frage.

Mehr als 80 % der PAK-Emissionen in Deutschland stammen von Kleinfeuerungsanlagen in Haushalten (Hausbrand) als saisonaler Quelle, 2 % stammen aus der kontinuierlichen Quelle Verkehr (UBA 2016). In Expositionsabschnitten, in denen witterungsbedingt häusliche Kleinfeuerungsanlagen aktiv sind, traten an Messpunkt BIS innerorts überdurchschnittliche PAK-Gehalte in Graskultur und Grünkohl auf. Messpunkt MEF, betriebsnah am Ostende der Nordbahn des Flughafens, trat durchgängig mit überdurchschnittlichen PAK-Werten hervor, Messpunkt MWF am Westende der Südbahn des Flughafens hingegen nicht. Dieses Ergebnis kann sowohl mit den windrichtungsabhängigen Starts und entsprechender Verdriftung der Flugzeugabgase im Zusammenhang stehen, als auch mit der Nähe der beiden Messpunkte zum Straßenverkehr.

Unterdurchschnittliche Metallwerte in beiden Bioindikatoren traten an BIS, innerorts, und an den naturnahen Messpunkten VIF und FMF (dort teilweise) auf. Eine Ausnahme bei den Metallen bildete Nickel in Graskultur (saisonal, in der ersten Serie im Mai) an BIS, dessen Ursache nicht bekannt ist.

Aus dem relativen Messpunktvergleich gingen die Messpunkte FMF und VIF von Mai bis September in Graskultur und von September bis November in Grünkohl mit unterdurchschnittlichen PAK-Werten hervor. An BIS waren die PAK-Werte außerhalb der Hausbrandsaison, im Hochsommer, ebenfalls unterdurchschnittlich.

### **Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation**

Die Hintergrundsituation im Untersuchungsgebiet (unterhalb OmH als Schwelle für einen Immissionseinfluss) ist hinsichtlich der untersuchten Luftverunreinigungen im Betrachtungszeitraum 2017–2022 unauffällig niedrig. Dies zeigt sich im Vergleich mit OmH und Vergleichswerten anderer Biomonitorings.

Von den Metallen liegen Bismut, Eisen und Nickel in Graskultur sogar im Bereich des aktuellen quellenfernen ländlichen Hintergrunds in Bayern. Das Bayerische Landesamt für Umwelt ermittelt die Hintergrundbelastung als „Grundbelastung an Orten, die keinem direkten Einfluss einer Schadstoffquelle unterliegen“ an naturnahen und landwirtschaftsnahen Dauerbeobachtungsstationen (BayLfU 2022).

Die aktuellen Schwellen für den PAK-Hintergrund in Graskultur sind niedriger als Vergleichs-OmH für den quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern (BayLfU 2017, Datenbasis 2005–2014). Die für Grünkohl ermittelten OmH sind sogar deutlich niedriger als die aktuellen überregionalen Vergleichs-OmH (VDI 3957/3).

### **Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung**

Aluminium, Blei, Chrom, Kupfer, Molybdän, Nickel, und Zink lagen deutlich unterhalb Beurteilungswerten für Futter- und Lebensmittel. Für Antimon, Bismut, Eisen und die PAK sind keine derartigen Beurteilungswerte definiert.

Im hilfsweisen Vergleich mit Höchstgehalten für trockene pflanzliche Lebens- und Nahrungsergänzungsmittel (Verordnung (EU) 2015/1933) lagen die Leitparameter PAK4 und Benzo[a]pyren in Graskultur und Grünkohl unterhalb dieser Beurteilungswerte. Der Vergleich ist orientierend zu sehen, da die Bioindikatoren ungewaschen und nicht verzehrfertig aufbereitet analysiert werden.

Alle Ergebnisse lagen damit, teilweise weit, unterhalb der Schwellen, ab der Gefährdungen zu vermuten wären.

### Fazit

Der Flughafenbetrieb hat keine deutliche Auswirkung auf die Metall- und PAK-Gehalte in den Bioindikatoren in seinem Umfeld. Alle untersuchten Stoffgehalte waren unauffällig und niedrig. Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde, zeigte sich nicht. Dennoch konnte der Flughafenbetrieb als direkte Nahquelle von Antimon und PAK4 mit Benzo[a]pyren identifiziert und von anderen Quellen wie Hausbrand differenziert werden.

Das Biomonitoring wird kontinuierlich und 2023 wieder an den acht repräsentativen Messpunkten fortgeführt werden, um für die Flughafen-Nachbarn in der Umgebung weiterhin zuverlässige und belastbare Aussagen zur Entwicklung der Umwelteinwirkungen der Luftgütesituation treffen zu können.

## 6 Abkürzungen

|        |  |
|--------|--|
| Al     | Aluminium  |
| BaP    | Benzo[a]pyren  |
| BG     | analytische Bestimmungsgrenze  |
| Bi     | Bismut   |
| BayLfU | Bayerisches Landesamt für Umwelt   |
| Cr     | Chrom  |
| Cu     | Kupfer   |
| DBS    | Dauerbeobachtungsstation(en)   |
| EPA    | US Environmental Protection Agency                                       |
| Fe     | Eisen  |
| FBB    | Flughafen Berlin Brandenburg GmbH  |
| FM     | Frischmasse  |
| FMG    | Flughafen München GmbH   |
| FuttMV | Futtermittelverordnung   |
| GPC    | Gelpermeationschromatographie  |
| HRGC   | hochauflösender Gaschromatograph   |
| HRMS   | hochauflösendes Massenspektrometer                                       |
| ICP    | induktiv gekoppeltes Plasma  |
| KW     | Kalenderwoche  |
| LANUV  | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen |
| Mo     | Molybdän   |
| MP     | Messpunkt  |
| MS     | Massenspektrometer   |
| MSD    | massenselektiver Detektor  |
| Ni     | Nickel   |
| OmH    | Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (VDI 3857/2)       |
| PAK    | polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe                             |
| Pb     | Blei   |
| Q      | Quantil  |
| rA     | rechnerischer Ausreißer  |
| Sb     | Antimon  |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| TM                      | Trockenmasse   |
| $u$                     | Standardunsicherheit des Verfahrens  |
| V                       | Vanadium   |
| VDI                     | Verein Deutscher Ingenieure  |
| VO                      | Verordnung   |
| $\mu\text{g}/\text{kg}$ | 1 Mikrogramm pro Kilogramm entspricht einem Tausendstel Milligramm pro Kilogramm, somit 1 Millionstel Gramm pro Kilogramm. |

## 7 Glossar

alphabetisch; Begriffe nach VDI Richtlinie 3857 Blatt 2 und Richtlinienreihe 3957 sowie weitere Begriffe

### **Akkumulationsindikator:**

-> Bioindikator, der auf Stoffgehalte analysiert wird; reichert Stoffe meist ohne erkennbare Schädigung an und ist daher besonders geeignet -> Immissionswirkungen anzuzeigen

### **Ausreißer:**

Messwert aus einer Grundgesamtheit, der sich deutlich von der Verteilung der übrigen Messwerte unterscheidet (potenziell verursacht durch z. B. singuläre, nicht repräsentative Immissionseinflüsse, Artefakte oder Übertragungsfehler)

### **Beurteilungswert:**

Bewertungsmaßstab, der zur Beurteilung der Stoffgehalte in -> Akkumulationsindikatoren herangezogen wird, z.B. -> Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH), -> Maximale Immissionswerte -> Höchstgehalte

### **Bioindikator:**

Organismus oder ein Teil davon oder eine Organismengemeinschaft (Biozönose), der/die Umwelteinflüsse dokumentiert. (DIN EN 16413)

### **Biomonitoring:**

Einsatz biologischer Systeme (Organismen und Organismengemeinschaften) zur räumlichen und/oder zeitlichen Überwachung von Umweltveränderungen (DIN EN 16413); es wird zwischen passivem und aktivem Biomonitoring unterschieden:

- **passives Biomonitoring:** Bioindikatoren werden in ihrem natürlichen Lebensraum untersucht oder beprobt
- **aktives Biomonitoring:** Bioindikatoren werden für einen bestimmten Zeitraum den zu bewertenden Umweltbedingungen gezielt ausgesetzt und danach auf deren -> Wirkungen hin untersucht

### **Emission:**

Emissionen sind von der betrachteten Emissionsquelle freigesetzte Luftverunreinigungen

### **Expositionsabschnitt, hier kurz: Serie:**

Zeitabschnitt, während dessen hier die standardisierte Graskultur am Expositionsort aufgestellt ist (lt. Richtlinie VDI 3957 Blatt 2:  $28 \pm 2$  Tage)

### **Hintergrund(-bereich/-gehalt):**

Stoffgehalt – hier in Graskulturen – unter den gegebenen Witterungsbedingungen während der Exposition durch die Aufnahme aus dem Substrat und aus der Hintergrundimmission am -> Hintergrundmesspunkt zustande kommt

### **Hintergrundmesspunkt:**

Messpunkt an einem Standort ohne unmittelbaren Einfluss lokaler -> Emissionen hinsichtlich des betrachteten Stoffs

### **Höchstgehalt:**

für Graskultur: Höchstgehalte von -> Kontaminanten in Futtermitteln, also unerwünschter Stoffe gemäß Futtermittelverordnung (FuttMV in der jeweilig aktuellen Fassung);

indirekt anwendbar: Höchstgehalte von Kontaminanten in Lebensmitteln, um „einen wirksamen Schutz der öffentlichen Gesundheit sicherzustellen“, z. B. nach Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 ff.

**immissionsbeeinflusst:**

Messwerte abzüglich -> Standardunsicherheit des Verfahrens  $u$ , die den -> Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt überschreiten, sind als -> immissionsbeeinflusst zu werten

**Immissionswirkung:**

durch luftgetragene Stoffe verursachte -> Wirkungen

**Kontaminant:**

jeder Stoff, der einem Futter- oder Lebensmittel unbeabsichtigt hinzugefügt wird, aber als Rückstand z. B. bei der Gewinnung, Fertigung, oder als Verunreinigung durch die Umwelt darin vorhanden ist

**Maximaler Immissions-Wert:**

empfohlener Richtwert für unerwünschte Stoffe in Futtermitteln gemäß Richtlinienreihe VDI 2310 zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und zur Sicherung der gesundheitlichen Unbedenklichkeit der von diesen Tieren gewonnenen Lebensmittel; hier auf Mittelwerte über die Vegetation anwendbar

**Messpunkt:**

ausgewählter Expositionsort an einem Standort

**Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH):**

statistisch abgeleiteter Wert, der die robuste Obergrenze der Stoffgehalte in einem Akkumulations(bio-)indikator unter Hintergrundbedingungen, das heißt ohne direkten Emittenteneinfluss, beschreibt; Überschreitungen des OmH weisen einen -> Immissionseinfluss nach und deuten damit auf eine verursachende Emissionsquelle hin

**PAK4:**

Summe der vier polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen Benzo[a]pyren, Benzo[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthren und Chrysen; bewertet -> Kontaminanten in Lebensmitteln gemäß VO (EU) Nr. 835/2011 ff.

**Trockenmasse (TM):**

Bezugsgröße für Konzentrationsangaben von Stoffgehalten – hier in Graskulturen – ermittelt durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz unter Angabe der Trocknungstemperatur

**Unsicherheit des Verfahrens  $u$ :**

Für den OmH als Beurteilungswert, bei dessen Überschreitung ein Immissionseinfluss nachgewiesen wird, sind die verfahrensbedingten Datenabweichungen zu berücksichtigen; die Unsicherheit  $u$  des Verfahrens kann beispielsweise nach DIN EN ISO 20988 (Anhang B.8 Doppelbestimmungen mit zwei identischen Messeinrichtungen) für jedes Element einzeln bestimmt werden, oder hilfsweise aus Vergleichsuntersuchungen herangezogen werden (z. B. Richtlinie VDI 3857 Blatt 2).

**Untersuchungsgebiet:**

das im Einwirkungsbereich der Emissionsquellen liegende geographische Gebiet, in dem die Untersuchung durchgeführt wird

**Wirkung:**

Reaktion von Organismen, Teilen von Organismen oder von Organismengemeinschaften (Biozöosen) auf stoffliche und physikalische Umwelteinflüsse sowie deren Veränderung in ihrer chemischen Zusammensetzung (-> Akkumulation)

**Z-Werte:**

Die Stoffgehalte in den Bioindikatoren können von Messserie zu Messserie schwanken und unterschiedlich hohe Streuung aufweisen. Mit Hilfe eines relativen Messpunktvergleichs werden serienweise Schwankungen eliminiert und die Streuung relativiert. Dabei werden von den Messwerten einer Serie sogenannte Z-Werte gebildet: von jedem einzelnen Messwert wird das arithmetische Mittel aller Messwerte einer Serie subtrahiert und die Differenz durch die Standardabweichung des Wertekollektivs dieser Serie geteilt. Das arithmetische Mittel der Abweichungen über die Serien-Z-Werte eines Messpunktes im betrachteten Zeitraum ergibt so ein Maß für die relative Abweichung der Messpunkte zueinander: Z-Mittelwert.

## 8 Literatur

### 8.1 Gesetze und Verordnungen

BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 12 Absatz 3 des Gesetzes vom 8. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1726) geändert worden ist.

FuttMV: Futtermittelverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 29. August 2016 (BGBl. I S. 2004), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juli 2020 (BGBl. I S. 1700) geändert worden ist.

RHmV: Verordnung über die Höchstmengen an Rückständen von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln, Düngemitteln und sonstigen Mitteln in oder auf Lebensmitteln und Tabakerzeugnissen – Rückstands-Höchstmengenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Oktober 1999 (BGBl. I S. 2082; 2002 I S. 1004), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 19. März 2010 (BGBl. I S. 286) geändert worden ist.

TA Luft: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021 (GMBI 2021 Nr. 48-54, S. 1050).

UVPG: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), neugefasst durch B. v. 24.02.2010 BGBl. I S. 94, das durch Artikel 14 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist.

VO (EG) 1881/2006: Verordnung zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln vom 19. Dezember 2006, Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 364, S.5 vom 20.12.2006.

VO (EU) Nr. 835/2011: VERORDNUNG (EU) DER KOMMISSION vom 19. August 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 im Hinblick auf Höchstgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Lebensmitteln, Amtsblatt der Europäischen Union: L 215/4.

VO (EU) 2015/1005: VERORDNUNG (EU) DER KOMMISSION vom 25. Juni 2015 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 bezüglich der Höchstgehalte für Blei in bestimmten Lebensmitteln, Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 161, S. 9 vom 25.6.2015.

VO (EU) 2015/1933: VERORDNUNG 2015/1933 DER KOMMISSION vom 27. Oktober 2015 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 hinsichtlich der Höchstgehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in Kakaofasern, Bananenchips, Nahrungsergänzungsmitteln, getrockneten Kräutern und getrockneten Gewürzen, ABl. Nr. L 282, S. 11.

VO (EU) 2021/1317: VERORDNUNG (EU) 2021/1317 DER KOMMISSION vom 9. August 2021 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 hinsichtlich der Höchstgehalte an Blei in bestimmten Lebensmitteln. Amtsblatt der Europäischen Union L286, S. 1-4.

## 8.2 Normen und Richtlinien

DIN EN 15763:2010-04: Lebensmittel - Bestimmung von Elementspuren - Bestimmung von Arsen, Cadmium, Quecksilber und Blei in Lebensmitteln mit induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) nach Druckaufschluss; Deutsche Fassung EN 15763:2009.

DIN EN 16413:2014-08: Außenluft - Biomonitoring mit Flechten - Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten; Deutsche Fassung EN 16413:2014.

DIN ISO 12884:2000-12 Außenluft – Bestimmung der Summe gasförmiger und partikelgebundener polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe – Probenahme auf Filtern mit nachgeschalteten Sorbenzien und anschließender gaschromatographischer / massenspektrometrischer Analyse.

DIN V ENV 13005:2000-07: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen: Deutsche Fassung ENV 13005:1999.

DIN EN ISO 20988:2007-09 Luftbeschaffenheit; Leitlinien zur Schätzung der Messunsicherheit (ISO 20988:2007); Deutsche Fassung EN ISO 20988:2007

VDI 2310 Blatt 1:2010-12: Maximale Immissions-Werte – Zielsetzung und Bedeutung der Richtlinienreihe 2310. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 27:1998-09: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Blei zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 30: 2005-01: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Nickel zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 34:2018-12: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Vanadium zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere und der von ihnen stammenden Lebensmittel. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 37:2015-11 Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Molybdän zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 38:2008-12: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Kupfer zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere und der von ihnen stammenden Lebensmittel. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 39:2011-08: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Chrom zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere und der von ihnen stammenden Lebensmittel. Berlin, Beuth.

VDI 2310 Blatt 44:2006-11: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Aluminium zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere. Berlin, Beuth.

VDI 3857 Blatt 2:2021-07: Beurteilungswerte für immissionsbedingte Stoffanreicherungen in standardisierten Graskulturen; Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte ausgewählter anorganischer Luftverunreinigungen. Berlin: Beuth.

VDI 3957 Blatt 1:2020-02: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Grundlagen und Zielsetzung. Berlin: Beuth.

VDI 3957 Blatt 2:2020-08: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Verfahren der standardisierten Graskultur. Berlin, Beuth.

VDI 3957 Blatt 3:2023-02: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl. Berlin, Beuth.

VDI 3957 Blatt 10:2023-02: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Einsatz aktiver Biomonitoringverfahren im Bereich von Emissionsquellen. Berlin, Beuth.

VDI 4280 Blatt 1:2014-10: Planung von Immissionsmessungen - Allgemeine Regeln für Untersuchungen der Luftbeschaffenheit. Berlin, Beuth.

### 8.3 Literaturquellen

BayLfU (2017): PAK-Immissionswirkungen in Bayern – Langzeituntersuchung polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe mit Biomonitoring-Verfahren. UmweltSpezial, Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 86 S.

BayLfU (2019): Biomonitoring persistenter Schadstoffe – Immissionsökologisches Monitoring persistenter organischer und anorganischer Schadstoffe im Hintergrund und bei quellenspezifischer Belastung. UmweltSpezial, Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 138 S.

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, April 2019, S. 128-136.

Hüffmeyer, N. (2007): Modellierung von Zink in der Ruhr – Emissionspfade und Belastungsanalyse. Matthies, M. (Hrsg.) Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück Nr. 42.

Krapp, M., L. Peichl (2015): Antimony deposition and accumulation in biomonitoring plants at a traffic affected site compared to rural sites in Bavaria / Germany. 3rd International Workshop on Antimony in the Environment, 6.-9.10.2015, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig.

Liftinger G. (2017): Moderne Analyseverfahren in der Elementanalytik von Pflanzenproben und ihre Kenn-  
daten. Workshop Biomonitoring – Risikokommunikation, Oberösterreichische Landesregierung, 6.-7.  
März 2017, Linz (A), 17 S., Quelle im Internet (Stand Februar 2020): <https://www.ooe-umweltanwaltschaft.at/Mediendateien/Liftinger.pdf>.

Meek .E., P.K.L. Chan, S. Bartlett (1994): Polycyclic aromatic hydrocarbons: Evaluation of risks to health from environmental exposure in Canada. Environ. Carcinogen. & Ecotox. Rev. C12 (2), S. 443-452.

Merian, E. (Hrsg.) (1984): Metalle in der Umwelt. Verlag Chemie, Weinheim.

Moratorium (2018): Moratorium für den Bau der dritten Start- und Landebahn am Flughafen München in der Legislaturperiode 2018–2023, Koalitionsvertrag zwischen CSU und Freien Wählern vom 04.11.2018, S. 51.

Peichl L., M. Wäber, W. Reifenhäuser (1994): Schwermetallmonitoring mit der standardisierten Graskultur im Untersuchungsgebiet München - Kfz-Verkehr als Antimonquelle? UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 6 (2), S. 63-69.

- Rentz, O., C. Martel (1998): Analyse der Schwermetallströme in Steinkohlefeuerungen – Einfluss der Kohlesorte und des Lastzustandes. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung und Universität Karlsruhe (Hrsg.), Karlsruhe, 254 S.
- Savory, J., R. Wills (1984): Arsen. Metalle in der Umwelt (E. MERIAN, Hrsg.), Verlag Chemie, Weinheim, S. 319-334.
- Siewers, U., U. Herpin (1998): Schwermetalleinträge in Deutschland – Moos-Monitoring 1995/96. Geologisches Jahrbuch Sonderhefte, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart.
- Streit, B. (1991): Lexikon Ökotoxikologie. VCH Weinheim.
- Umweltatlas Hessen (2005). Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.).
- VDI (2016): Agenda Biomonitoring – VDI-Richtlinien zur Zielerreichung. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL (Hrsg.) 2016, Düsseldorf, VDI, ISBN 978-3-931384-85-2, 12 S.
- Wäber, M. (2016): Biomonitoring der Auswirkungen von Emittenten – Abgrenzung zu technischen Emissions- und Immissionsmessungen, aktuelle Normungsaktivitäten und Anwendungen im Anlagenumfeld. In: Anlagenbezogenes Monitoring, VDI-Berichte 2280, ISSN 0083-5560, S. 23-36.
- Wäber, M.; Pompe, F. (2018): Biomonitoring von Luftverunreinigungen an Flughäfen im deutschsprachigen Raum. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, April 2018, S. 166-170.
- Wäber, M., C. Dietl, J. Köhler, L. Peichl (1998): Bioakkumulation und Deposition von Antimon, Blei und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff-Immissionen. UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 10 (5), S. 276-280.
- Wäber, M., S. Aust, K. Johannsen, F. Pompe, J. Heimberg (2015): Biomonitoring mit Grünkohl und Graskultur im Umfeld des zukünftigen Flughafens Berlin Brandenburg – Langfristige Untersuchung möglicher Umweltwirkungen von Luftverkehr und Flughafenbetrieb. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 75 (2015) Nr. 4, S. 137-142.

## 8.4 Quellen im Internet

- BayLfU (2022): Anreicherung von Metallen in Graskulturen – Hintergrundwerte; Jahresmittelwerte 2002 – 2021. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 21 S., Stand 17.01.2023: [https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe\\_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/metalle\\_in\\_graskultur.pdf](https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/metalle_in_graskultur.pdf)
- FMG Verkehrsbericht 2021: Verkehrsbericht. Flughafen München GmbH (Hrsg.), Stand 17.01.2023: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000012702451bb61e013b6/vb-2021-4.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000012702451bb61e013b6/vb-2021-4.pdf)
- FMG Verkehrsbericht 2022: Verkehrsbericht. Flughafen München GmbH (Hrsg.), Stand 17.01.2023: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000016026443bb63bd8d25/Verkehrsbericht-20225.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000016026443bb63bd8d25/Verkehrsbericht-20225.pdf)
- UBA (2014): Umweltbelastungen der Landwirtschaft: Düngemittel. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, Stand 14.04.2020: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/duengemittel#duengemittel-was-ist-das>

UBA (2016): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe – Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, Quelle im Internet, Stand 09.04.2018: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische\\_aromatische\\_kohlenwasserstoffe.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische_aromatische_kohlenwasserstoffe.pdf)

UBA (2022): Emissionsentwicklung 1990 - 2020 für Schwermetalle. Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, Umweltbundesamt (Hrsg.), Stand 17.01.2023: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>

Wäber, M. (2016): Biomonitoring im Umfeld des Flughafens Berlin Schönefeld mit standardisierten Graskulturen 2015. Quelle im Internet, Stand 23.04.2022: <https://corporate.berlin-airport.de/content/dam/corporate/de/umwelt/luft/Biomonitoring-Bericht-2011-2015.pdf>

Wäber, M., Pompe, F. (2020): Biomonitoring und Depositionsuntersuchungen in der Umgebung des Flughafens München – Zusammenfassende Dokumentation 2019. Quelle im Internet, Stand 24.10.2022: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000009555400bb5f33e76e/biomonitoring-deposition-191.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000009555400bb5f33e76e/biomonitoring-deposition-191.pdf)

Wäber, M., Pompe, F. (2022): Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2021 mit Einordnung der Wirkungssituation 2017–2021. Quelle im Internet, Stand 24.10.2022: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000013564209bb6284e7ef/biomonitoring-2021.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000013564209bb6284e7ef/biomonitoring-2021.pdf)

Wäber, M., Pompe, F. (2022a): Graskultur-Biomonitoring im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg 2022 – mit Einordnung der Wirkungssituation 2013 und 2015. Flughafen Berlin Brandenburg GmbH (Hrsg.), Quelle im Internet, Stand 12.12.2022: <https://corporate.berlin-airport.de/content/dam/corporate/de/umwelt/luft/2022-11-28-biomber.pdf>

Wäber, M., Pompe, F. (2023 in Vorbereitung): Biomonitoring von Luftverunreinigungen mit standardisierten Graskulturen im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022. Flughafen Leipzig/Halle GmbH (Hrsg.), Quelle in Internet, Stand 27.01.2023: <https://www.mdf-ag.com/unternehmen/umwelt/flughafen-leipzig/halle-gmbh/biomonitoring/>

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Bild 1.2-1: Schadstoffe gelangen über die Luft in die Umwelt.....   | 8  |
| Bild 1.3-1: Flugbewegungen 2020 bis 2022 im Vergleich zu den Vorjahren .....  | 10 |
| Bild 2.1-1: Lage der Messpunkte am Flughafen München und in seiner Umgebung .....   | 12 |
| Bild 2.3-1: Graskulturen für die Analysen auf Metalle (2 kleine Kulturtöpfe, hinten) und auf PAK (2 große Kulturtöpfe, vorne) ..... | 15 |
| Bild 2.4-1: Grünkohlexponat und Grünkohlernte für die Analysen auf Metalle (1 Kulturtopf) und auf PAK (2 Kulturtöpfe) .....         | 16 |
| Bild 2.7-1: Windrose für das Gesamtjahr 2021 (links) und 2022 (rechts) .....  | 25 |
| Bild 3.1-1: Aluminiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022 .....  | 27 |
| Bild 3.1-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Aluminium 2017–2022 .....  | 28 |
| Bild 3.2-1: Antimonergehalte in Graskultur (oben) und in Grünkohl 2017–2022.....  | 31 |
| Bild 3.2-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Antimon 2017–2022 .....  | 32 |
| Bild 3.3-1: Bismutgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022 .....   | 34 |
| Bild 3.3-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Bismut 2017–2022.....  | 35 |
| Bild 3.4-1: Bleigehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022 .....   | 37 |
| Bild 3.4-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Blei 2017–2022.....  | 38 |
| Bild 3.5-1: Chromgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022 .....  | 41 |
| Bild 3.5-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Chrom 2017–2022 .....  | 42 |
| Bild 3.6-1: Eisengehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022 .....  | 45 |
| Bild 3.6-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Eisen 2017–2022.....   | 46 |
| Bild 3.7-1: Kupfergehalte in Grünkohl 2017–2019 und 2022 .....  | 48 |
| Bild 3.7-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Kupfer 2017–2019 und 2022 .....                                  | 49 |
| Bild 3.8-1: Molybdängehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022.....  | 51 |
| Bild 3.8-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Molybdän 2017–2022 .....   | 52 |
| Bild 3.9-1: Nickelgehalte in Graskultur 2017–2022 .....   | 54 |
| Bild 3.9-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Nickel 2017–2021 .....   | 55 |
| Bild 3.10-1: Vanadiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2022 .....  | 57 |
| Bild 3.10-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Vanadium 2017–2022 .....  | 58 |
| Bild 3.11-1: PAK-Gehalte in Graskultur 2017–2022.....   | 61 |
| Bild 3.11-2: PAK-Gehalte in Grünkohl 2017–2022.....   | 62 |
| Bild 3.11-3: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für PAK 2017–2022 .....   | 66 |

|   |     |
|---|-----|
| Bild 4.1-1: Messpunktreihe von West nach Ost – mit RNL, VIF, BWL, die 2022 pausierten .....           | 69  |
| Bild 9.1-1: Niederschlagsmengen in mm während der Graskulturserien und Grünkohl-Exposition 2022 ..... | 100 |
| Bild 9.1-2: Doppelseite - Windgeschwindigkeit und Windrichtung (aus Richtung) 2021 .....              | 102 |
| Bild 9.2-1: FMF Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 103 |
| Bild 9.2-2: MWF Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 104 |
| Bild 9.2-3: AWL Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 105 |
| Bild 9.2-4: MEF Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 106 |
| Bild 9.2-5: VIF Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 107 |
| Bild 9.2-6: BWL Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 108 |
| Bild 9.2-7: BIS Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 109 |
| Bild 9.2-8: RNL Karte (oben) und Foto (unten) .....   | 110 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 2.1-1: Übersicht über die Messpunkte 2021 (in Grau) und 2022 (in Schwarz) .....          | 13 |
| Tabelle 2.2-1: Übersicht Stoffspektrum beim Biomonitoring 2022 .....                             | 14 |
| Tabelle 2.4-1: Expositionsabschnitte 2022 .....  | 17 |
| Tabelle 2.6-1: Beurteilungswerte für Immissionseinflüsse – OmH für Graskultur und Grünkohl ..... | 19 |
| Tabelle 2.6-2: Beurteilungswerte zur Gefährdungsabschätzung .....                                | 22 |
| Tabelle 2.7-1: Behandlung identifizierter Ausreißer (rA) .....                                   | 24 |
| Tabelle 3.1-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Aluminium zu den Messpunkten .....         | 26 |
| Tabelle 3.2-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Antimon zu den Messpunkten .....           | 30 |
| Tabelle 3.3-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Bismut zu den Messpunkten .....            | 33 |
| Tabelle 3.4-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Blei zu den Messpunkten .....              | 36 |
| Tabelle 3.5-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Chrom zu den Messpunkten .....             | 40 |
| Tabelle 3.6-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Eisen zu den Messpunkten .....             | 44 |
| Tabelle 3.7-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Kupfer zu den Messpunkten .....            | 47 |
| Tabelle 3.8-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Molybdän zu den Messpunkten .....          | 50 |
| Tabelle 3.9-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Nickel zu den Messpunkten .....            | 53 |
| Tabelle 3.10-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Vanadium zu den Messpunkten .....         | 56 |
| Tabelle 3.11-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für PAK zu den Messpunkten .....              | 64 |

## 9 Anhang

Kapitel 9.1: Witterungseinflüsse 2021

Kapitel 9.2: Messnetz Biomonitoring und Deposition – Messpunktbeschreibungen (Bild 9.2-1 – Bild 9.2-8)

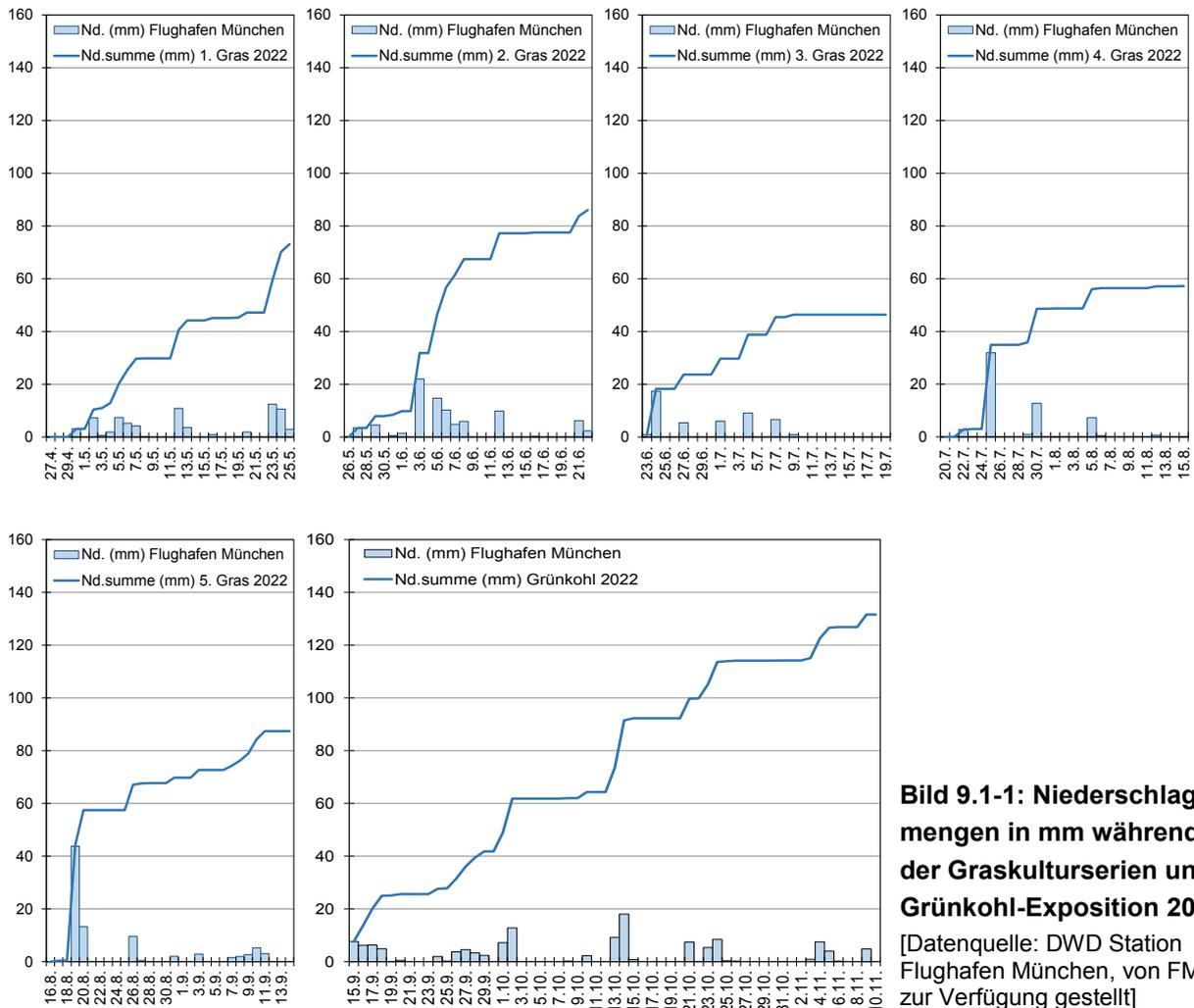
Kapitel 9.3: Metalle in Graskultur

Kapitel 9.4: Metalle in Grünkohl

Kapitel 9.5: PAK in Graskultur (16 PAK nach EPA)

Kapitel 9.6: PAK in Grünkohl (16 PAK nach EPA)

## 9.1 Witterungseinflüsse 2022

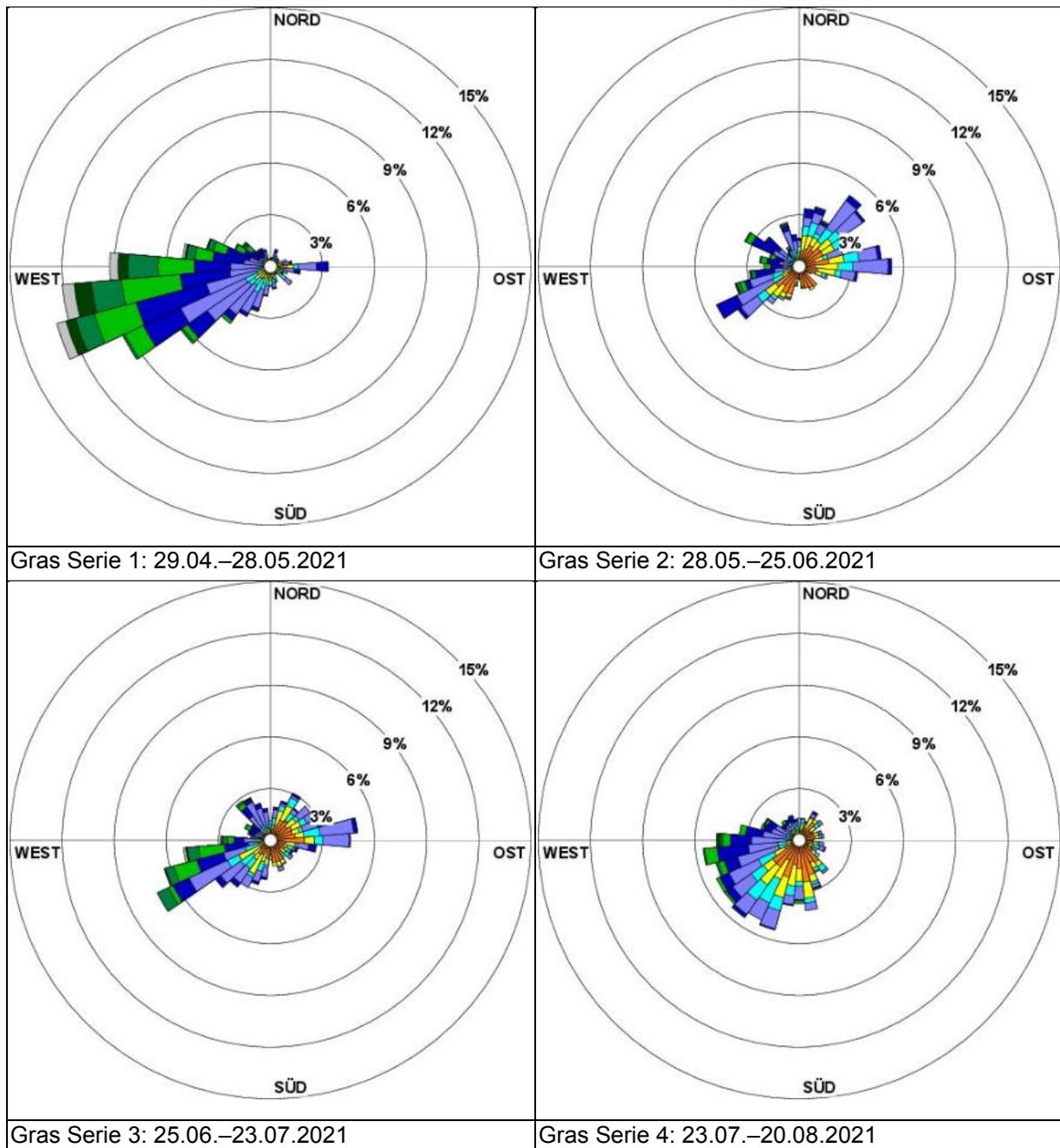


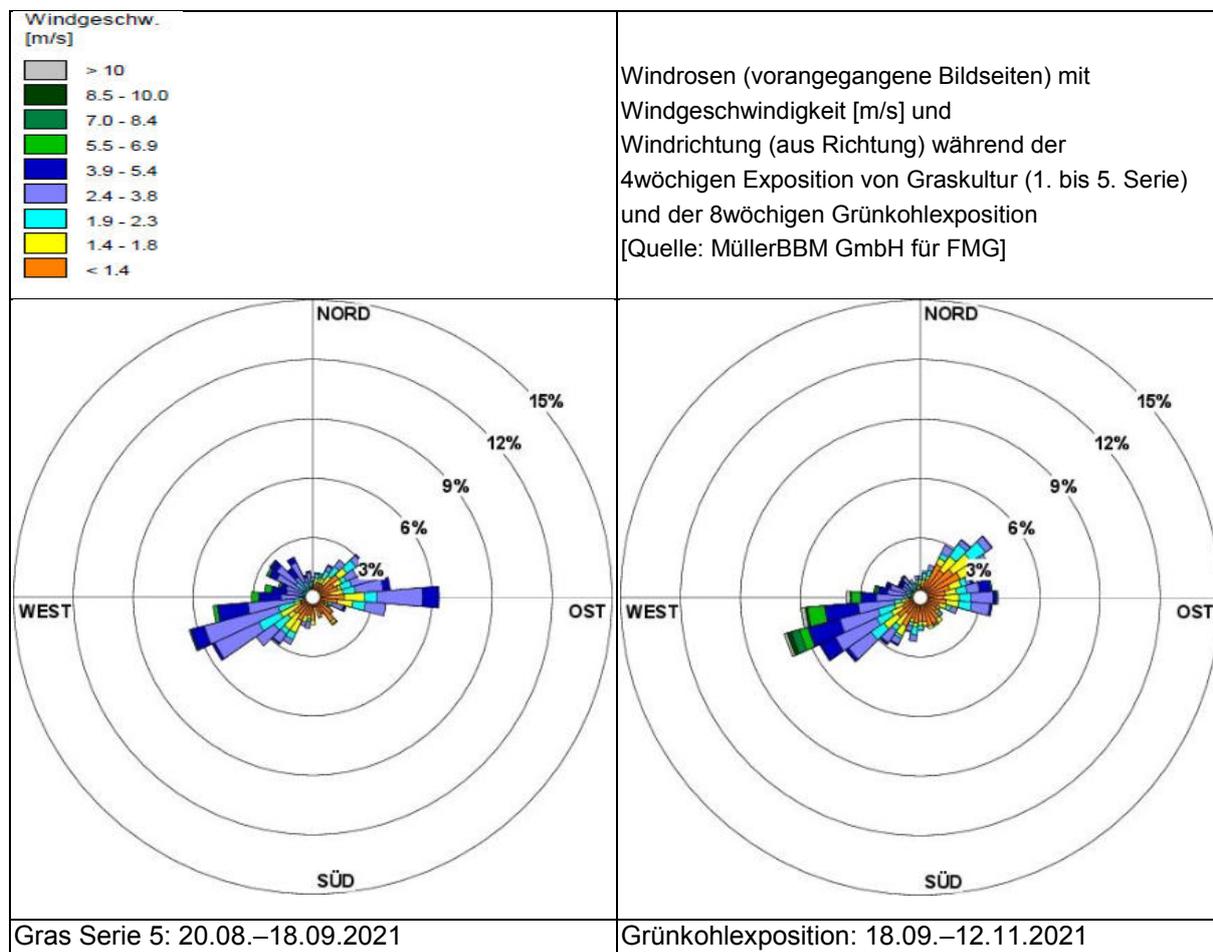
**Bild 9.1-1: Niederschlagsmengen in mm während der Graskulturerien und Grünkohl-Exposition 2022**  
 [Datenquelle: DWD Station Flughafen München, von FMG zur Verfügung gestellt]

Die Skalierung der Niederschlagsdarstellungen 2022 in Bild 9.1-1 sind so gewählt wie 2021, als jeweils rund 80–150 mm Niederschlag während der Graskulturexpositionen fielen. Im Jahr 2022 regnete es während der Graskulturexpositionen weniger, während der Grünkohlexposition aber mehr als doppelt so viel:

- In der 1. Serie Graskultur im Mai 2022 fiel von den 73 mm Niederschlag rund ein Drittel (26 mm) in den letzten drei Tagen der vierwöchigen Exposition – und könnte auflagernde Luftverunreinigungen teilweise vor der Ernte der Graskulturen abgewaschen haben.
- In der 2. Serie Graskultur im Juni betrug die Niederschlagsmenge mit rund 86 mm etwas mehr als in der 1. Serie, aber in der letzten Expositionswoche regnete es mit 9 mm kaum noch.
- In der 3. Serie im Juli und der 4. Serie bis Mitte August regnete es mit 46 mm und 57 mm weniger als in den Serien davor, vor allem in den letzten 10 Expositionstagen fiel (fast) kein Niederschlag.
- In der 5. Serie Graskultur fielen 58 mm von 87 mm insgesamt in der ersten Expositionswoche, während es in der letzten Woche mit 13 mm wenig regnete.
- Während der achtwöchigen Grünkohlexposition von Mitte September bis Mitte November war die Niederschlagsmenge mit 132 mm saisonal durchschnittlich und relativ gleichmäßig verteilt.

Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten beeinflussen die Verdriftung von direkten Immissionen oder auch den Abdrift von Bodestaub von Oberflächen. Die nachfolgenden beiden Bildseiten zeigen die Windrosen – Windgeschwindigkeit und Windrichtung (aus Richtung) – für Graskultur- und Grünkohlexpositionen beispielhaft für das Jahr 2021 (Bild 9.1-2).





**Bild 9.1-2: Doppelseite - Windgeschwindigkeit und Windrichtung (aus Richtung) 2021**

- In der 1. Serie Graskultur im Mai 2021 traten fast ausschließlich Winde aus West bis West-Südwest auf. Auffällig war dabei der hohe Anteil hoher Windgeschwindigkeiten (Bild 9.1-2).
- In der 2. Serie Graskultur war der Anteil von Winden aus östlichen bis nordöstlichen Richtungen etwas höher als aus westlichen Richtungen.
- In der 3. Serie Graskulturen im Juli 2021 überwogen Winde aus westlichen Richtungen, mit teilweise hohen Windgeschwindigkeiten, während der geringere Anteil an Winden aus Ost bis Nord-Ost geringere Geschwindigkeiten aufwies.
- In der 4. Serie bis Mitte August 2021 traten fast ausschließlich Wind aus West bis Süd auf, mit teilweise hohen Windgeschwindigkeiten, aus West und vergleichsweise geringeren aus Süd.
- In der 5. Serie bis Mitte September überwogen Winde aus westlichen Richtungen, der Anteil an Winden aus Ost bis Nord-Ost war geringer.
- Während der Grünkohlexposition von Mitte September bis Mitte November überwogen Winde aus westlichen Richtungen, mit teilweise hohen Windgeschwindigkeiten, während der geringere Anteil an Winden aus Ost bis Nord-Ost geringere Geschwindigkeiten aufwies.

## 9.2 Messnetz Biomonitoring und Deposition – Messpunktbeschreibungen

### Messpunkt FMF

Der Messpunkt FMF befindet sich etwa 1 km nordwestlich von Pulling im Landschaftsschutzgebiet Freisinger Moos. Die Entfernung zum Flughafen beträgt etwa 7 km. Der Messpunkt liegt in einem überwiegend landwirtschaftlich geprägten Umfeld, im Flugrouten-Bereich (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1).

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4477192, Hochwert 5360000, Höhe ü. NN 448 m



**Bild 9.2-1: FMF Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

### Messpunkt MWF

Der Messpunkt MWF befindet sich am Westende der südlichen Start- und Landebahn, unter Überflug (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1). Die Entfernung zur Staatsstraße 301 und zu kleineren Gehöften beträgt etwa 300 m, zum nächsten Gewerbegebiet von Hallbergmoos etwa 500 m.

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4480556, Hochwert 5355776, Höhe ü. NN 453 m



**Bild 9.2-2: MWF Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

[Foto: Bernhard Huber für Flughafen München GmbH]

### Messpunkt AWL

Der Messpunkt AWL befindet sich etwa 500 m westlich von Attaching in überwiegend landwirtschaftlich genutztem Umfeld. Er liegt etwa 500 m westlich des Ortsrands von Attaching und etwa 1,2 km nordwestlich der nördlichen Start- und Landebahn des Flughafens entfernt (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1).

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4482642, Hochwert 5359557, Höhe ü. NN 443 m



**Bild 9.2-3: AWL Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

### Messpunkt MEF

Der Messpunkt MEF befindet sich am Ostende des nördlichen Start- und Landebahn, unter Überflug (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1). Die Entfernung zur Verbindungsstraße ED5 beträgt etwa 50 m. Ein Recyclingbetrieb liegt etwa 1,5 km östlich, das nächste Gewerbegebiet etwa 1,5 km südlich. Der Messpunkt grenzt an ein landwirtschaftlich geprägtes Umfeld.

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4487938, Hochwert 5358930, Höhe ü. NN 441 m



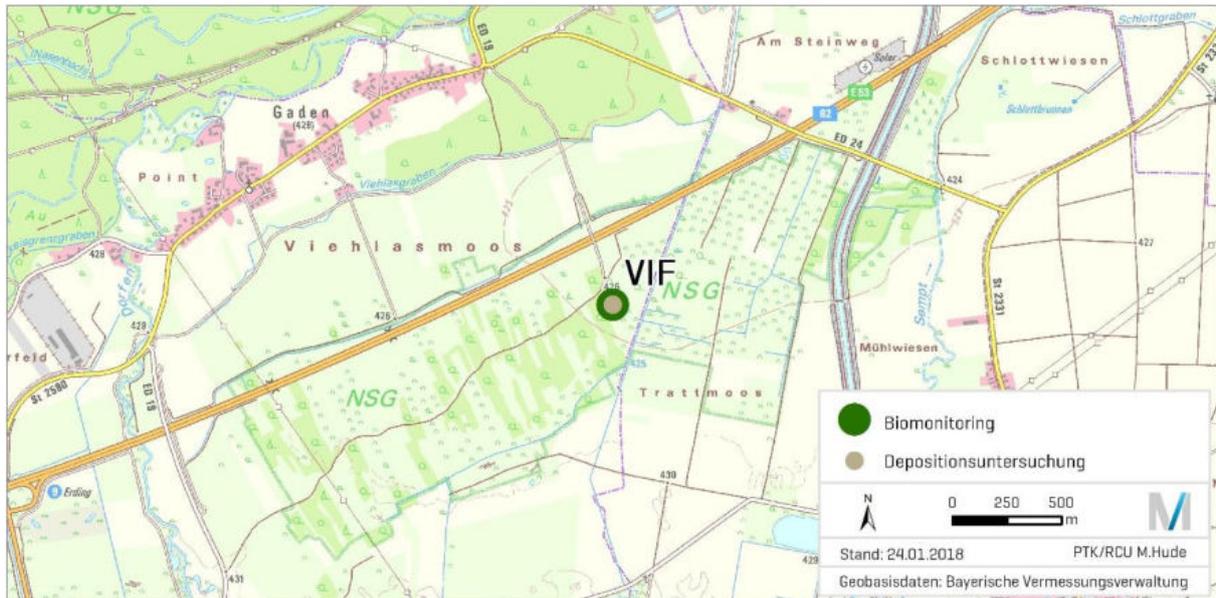
**Bild 9.2-4: MEF Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

### Messpunkt VIF – pausierte 2022

Der Messpunkt VIF befindet sich im Naturschutzgebiet Viehlaßmoos, etwa 250 m südlich der Bundesautobahn A92, in landwirtschaftlich geprägtem Umfeld, im Flugrouten-Bereich. Der Messpunkt ist etwa 8 km in nordöstlicher Richtung vom Flughafen entfernt (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1).

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4492334, Hochwert 5362968, Höhe ü. NN 425 m



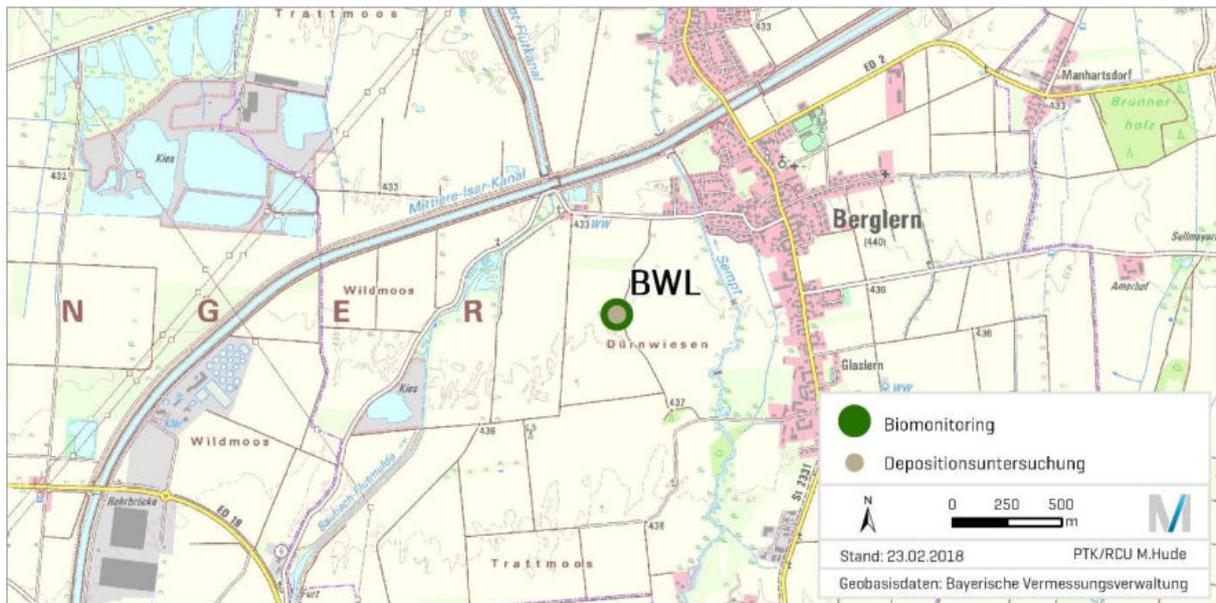
**Bild 9.2-5: VIF Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

### Messpunkt BWL – pausierte 2022

Der Messpunkt BWL befindet sich etwa 700 m westlich von Berglern in einem überwiegend landwirtschaftlich geprägten Umfeld in einem Wiesenstreifen. Die Entfernung zum Ortsrand und zur nächsten Straße beträgt etwa 500 m. Der Messpunkt liegt etwa 8 km östlich des Flughafens (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1).

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4494147, Hochwert 5360176, Höhe ü. NN 435 m



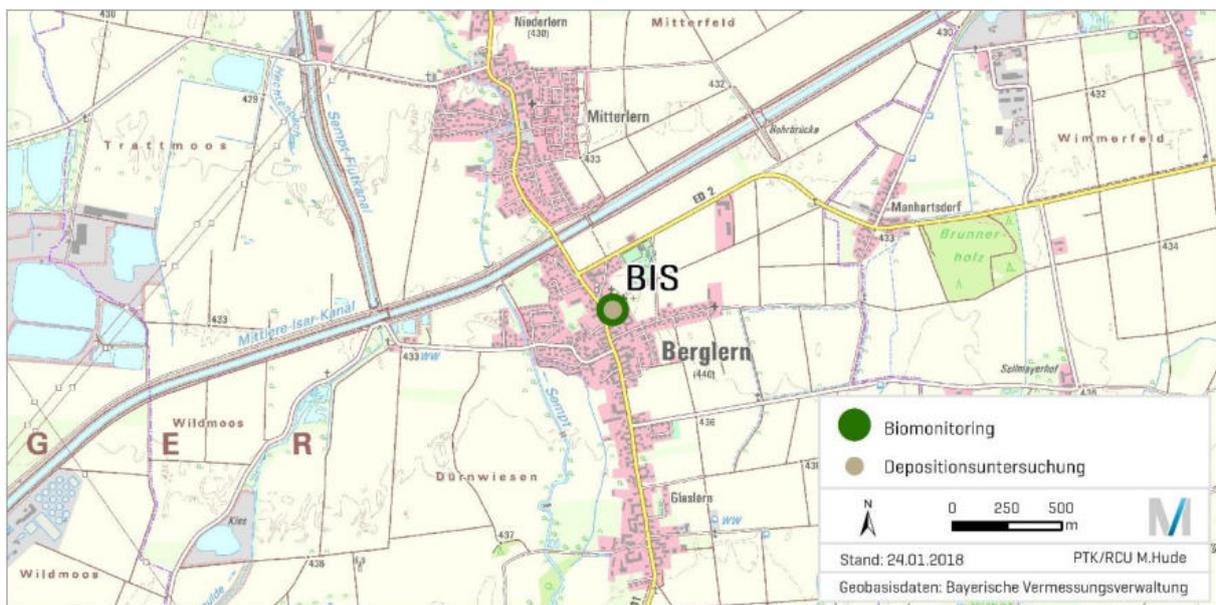
**Bild 9.2-6: BWL Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

## Messpunkt BIS

Der Messpunkt BIS befindet sich im Siedlungsbereich von Berglern. Die Entfernung zur Ortsdurchgangsstraße betrug bis 2018 etwa 50 m und zu Parkplatz / Bushaltestelle etwa 25 m. Der Messpunkt wurde Ende Mai 2018 geringfügig verlegt, um ihn vor Störeinflüssen durch den überragenden Baumbestand fern zu halten. Die Entfernung zur Ortsdurchgangsstraße beträgt nun etwa 85 m und zu Parkplatz / Bushaltestelle etwa 60 m. Der Messpunkt liegt etwa 8 km östlich der nördlichen Start- und Landebahn des Flughafens (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1). Das Umfeld um den Siedlungsbereich ist landwirtschaftlich geprägt.

Gauß-Krüger-Koordinaten (bis 05/2018): Rechtswert 4494913, Hochwert 5360810, Höhe ü. NN 439 m  
 Gauß-Krüger-Koordinaten (ab 06/2018): Rechtswert 4494946, Hochwert 5360846, Höhe ü. NN 441 m



**Bild 9.2-7: BIS Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH (FMG), Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

[Foto: Bernhard Huber für FMG; Ausschnitt links oben: Messpunktlage ab 2018 rechts neben Pfarrhaus, kleines Foto]

### Messpunkt RNL – pausierte 2022

Der 2006 als Referenzmesspunkt ausgewählte Messpunkt RNL repräsentiert den gebietstypischen landwirtschaftlich geprägten Hintergrund. Er befindet sich etwa 6 km südlich des Flughafens im Landschaftsschutzgebiet „Notzinger Moos“ zwischen Notzing und Eichenried in landwirtschaftlich geprägtem Umfeld (vgl. Tabelle 4-1 und Bild 4-1). Die Verbindungsstraße ED7 liegt etwa 1 km in nördlicher Richtung, die nächsten Gehöfte liegen etwa 2 km in südlicher Richtung entfernt.

Gauß-Krüger-Koordinaten: Rechtswert 4485890, Hochwert 5351452, Höhe ü. NN 463 m



**Bild 9.2-8: RNL Karte (oben) und Foto (unten)**

[Karte: Flughafen München GmbH, Grundlage: Geobasisdaten – Bayerische Vermessungsverwaltung; 1/18]

### 9.3 Metalle in Graskultur 2022

| Graskultur 2022                              |          |          |          |                      |
|--|----------|----------|----------|----------------------|
| Aluminium [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,25 |          |          |          |                      |
| Messpunkt                                    | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert           |
| FMF  | 72       | 59       | 39       | 57                   |
| MWF  | 56       | 74       | 85       | 72                   |
| AWL  | 93       | 83       | 107      | 94                   |
| MEF  | 67       | 103      | 51       | 74                   |
| BIS  | 61       | 48       | 28       | 45                   |
| OmH:   | 80       |          | 568      | Max. Immissions-Wert |

| Graskultur 2022                             |          |          |          |            |
|---|----------|----------|----------|------------|
| Bismut [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,0025 |          |          |          |            |
| Messpunkt                                   | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert |
| FMF   | 0,0027   | 0,0038   | 0,0038   | 0,0034     |
| MWF   | 0,0057   | 0,0059   | 0,0060   | 0,0059     |
| AWL   | 0,0053   | 0,0051   | 0,0087   | 0,0064     |
| MEF   | 0,0055   | 0,0070   | 0,0063   | 0,0063     |
| BIS   | 0,0030   | 0,0013   | 0,0013   | 0,0018     |
| OmH:  | 0,0090   |          |          |            |

| Graskultur 2022                           |          |          |          |                      |
|---|----------|----------|----------|----------------------|
| Chrom [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,025 |          |          |          |                      |
| Messpunkt                                 | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert           |
| FMF                                       | 0,25     | 0,22     | 0,22     | 0,23                 |
| MWF                                       | 0,28     | 0,32     | 0,28     | 0,29                 |
| AWL                                       | 0,35     | 0,36     | 0,34     | 0,35                 |
| MEF                                       | 0,30     | 0,32     | 0,27     | 0,30                 |
| BIS                                       | 0,26     | 0,25     | 0,21     | 0,24                 |
| OmH:                                      | 0,35     |          | 57       | Max. Immissions-Wert |

| Graskultur 2022                          |          |          |          |                      |
|--|----------|----------|----------|----------------------|
| Eisen [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,25 |          |          |          |                      |
| Messpunkt                                | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert           |
| FMF                                      | 82       | 69       | 71       | 74                   |
| MWF                                      | 78       | 82       | 104      | 88                   |
| AWL                                      | 99       | 94       | 119      | 104                  |
| MEF                                      | 80       | 98       | 85       | 88                   |
| BIS                                      | 77       | 67       | 72       | 72                   |
| OmH:                                     | 100      |          |          | Max. Immissions-Wert |

| Graskultur 2022                             |          |          |          |                      |
|---|----------|----------|----------|----------------------|
| Molybdän [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,05 |          |          |          |                      |
| Messpunkt                                   | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert           |
| FMF   | 1,6      | 2,3      | 1,9      | 1,9                  |
| MWF   | 1,7      | 2,4      | 1,8      | 2,0                  |
| AWL   | 1,6      | 3,1      | 1,9      | 2,2                  |
| MEF   | 1,2      | 2,6      | 2,1      | 2,0                  |
| BIS   | 1,8      | 3,1      | 2,2      | 2,4                  |
| OmH:  | 3,7      |          | 11,4     | Max. Immissions-Wert |

| Graskultur 2022                            |          |          |          |                      |
|--|----------|----------|----------|----------------------|
| Nickel [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,025 |          |          |          |                      |
| Messpunkt                                  | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert           |
| FMF  | 1,7      | 2,3      | 2,5      | 2,2                  |
| MWF  | 1,9      | 2,8      | 2,3      | 2,3                  |
| AWL  | 1,9      | 3,1      | 2,6      | 2,5                  |
| MEF  | 1,6      | 2,5      | 3,5      | 2,5                  |
| BIS  | 1,9      | 2,1      | 2,8      | 2,3                  |
| OmH:                                       | 5,0      |          | 57       | Max. Immissions-Wert |

| Graskultur 2022                         |          |               |          |                         |
|---|----------|---------------|----------|-------------------------|
| Blei [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,05 |          |               |          |                         |
| Messpunkt                               | 1. Serie | 3. Serie      | 5. Serie | Mittelwert              |
| FMF                                     | 0,094    | 0,127         | 0,067    | 0,096                   |
| MWF                                     | 0,093    | 0,182         | 0,086    | 0,120                   |
| AWL                                     | 0,115    | 0,126         | 0,090    | 0,110                   |
| MEF                                     | 0,104    | 0,157         | 0,072    | 0,111                   |
| BIS                                     | 0,082    | 0,121         | 0,025    | 0,076                   |
| OmH:                                    | 0,16     | Höchstgehalt: | 34       | Max. Immissions-Wert: 1 |

| Graskultur 2022                             |          |          |          |            |
|---|----------|----------|----------|------------|
| Antimon [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,013 |          |          |          |            |
| Messpunkt                                   | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert |
| FMF   | 0,0065   | 0,0065   | 0,0065   | 0,0065     |
| MWF   | 0,0170   | 0,0150   | 0,021    | 0,0177     |
| AWL   | 0,0160   | 0,0065   | 0,0180   | 0,0135     |
| MEF   | 0,0180   | 0,0160   | 0,0160   | 0,0167     |
| BIS   | 0,0065   | 0,0065   | 0,0065   | 0,0065     |
| OmH:  |          |          |          |            |

| Graskultur 2022                              |          |          |          |                      |
|--|----------|----------|----------|----------------------|
| Vanadium [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,025 |          |          |          |                      |
| Messpunkt                                    | 1. Serie | 3. Serie | 5. Serie | Mittelwert           |
| FMF  | 0,126    | 0,102    | 0,090    | 0,106                |
| MWF  | 0,109    | 0,124    | 0,149    | 0,127                |
| AWL  | 0,177    | 0,143    | 0,201    | 0,174                |
| MEF  | 0,130    | 0,167    | 0,105    | 0,134                |
| BIS  | 0,116    | 0,085    | 0,069    | 0,090                |
| OmH:   | 0,14     |          | 11,4     | Max. Immissions-Wert |

Werte, die abzüglich Standardunsicherheit  $u$  den OmH überschreiten, sind blassorange unterlegt. Zur Gefährdungsabschätzung sind oben die Höchstgehalte gemäß FutTMV (blassrot unterlegt, auf den Einzelwert zu beziehen) und Empfehlungswerte für Futtermittel gemäß VDI 2310 angegeben (rosa unterlegt, jeweils strengster Wert der Empfehlungswerte-Spanne, auf den Mittelwert zu beziehen).

Diese Beurteilungswerte sind für den Vergleich mit den Graskultur-Ergebnissen auf 100 % TM bezogen (Tabelle 2.6-2). Werte die Höchstgehalte oder Maximale Immissions-Werte überschritten, traten 2022 nicht auf.

Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG *kursiv* dargestellt.

## 9.4 Metalle in Grünkohl 2022

| Grünkohl 2022   |           |        |       |        |       |          |       |         |             |
|---|-----------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|---------|-------------|
| [mg/kg TM]  | Aluminium | Bismut | Chrom | Kupfer | Eisen | Molybdän | Blei  | Antimon | Vanadium    |
| BG  | 0,25      | 0,0025 | 0,025 | 0,050  | 0,25  | 0,050    | 0,050 | 0,020   | 0,010       |
| OmH   | 32        | 0,026  | 0,35  | 3,4    | 166   | 4,9      | 0,11  | 0,035   | 0,056       |
| Messpunkt   |           |        |       |        |       |          |       |         |             |
| FMF   | 51,6      | 0,0052 | 0,19  | 1,4    | 109   | 0,5      | 0,058 | 0,026   | 0,069       |
| MWF   | 37,3      | 0,0084 | 0,23  | 1,9    | 78    | 0,7      | 0,059 | 0,055   | 0,053       |
| AWL   | 15,7      | 0,0044 | 0,14  | 0,9    | 57    | 0,7      | 0,025 | 0,021   | 0,023       |
| MEF   | 42,3      | 0,0115 | 0,22  | 1,6    | 82    | 0,4      | 0,087 | 0,050   | 0,064       |
| BIS   | 15,3      | 0,0028 | 0,10  | 1,1    | 66    | 2,2      | 0,025 | 0,010   | 0,083       |
| "ein Immissionseinfluss ist anzunehmen, wenn der Messwert $\geq 1,5 \times$ OmH beträgt" (VDI 3857/2) |           |        |       |        |       |          |       |         | blassorange |
| Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG in kursiv dargestellt      |           |        |       |        |       |          |       |         |             |

| Grünkohl 2022 |       |                                 |
|---------------|-------|---------------------------------|
| [mg/kg FM]    | Blei  | Trockenrückstand (30 °C) [% OS] |
| Messpunkt     |       |                                 |
| FMF           | 0,010 | 18,0                            |
| MWF           | 0,011 | 19,1                            |
| AWL           | 0,005 | 20,7                            |
| MEF           | 0,017 | 19,8                            |
| BIS           | 0,004 | 15,5                            |

Für den Vergleich mit dem Höchstgehalt für Blattkohl-Lebensmittel von 0,30 mg/kg FM (Tabelle 2.6-2) zur Gefährdungsabschätzung sind die Bleigehalte in Grünkohl anhand des Trockenmasseanteils (Trockenrückstand in % OS; OS: Originalsubstanz) in der Tabelle oben in Frischmasse umgerechnet (100 % FM).

Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG *kursiv* dargestellt.

## 9.5 PAK in Graskultur (16 PAK nach EPA) 2022

| Graskultur 2022  |             |          |          |
|--|-------------|----------|----------|
| Naphthalin [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt  | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF  | 2,6         | 3,6      | 4,3      |
| MWF  | 3,9         | 3,5      | 5,2      |
| AWL  | 3,3         | 3,3      | 5,9      |
| MEF  | 3,3         | 4,4      | 5,0      |
| BIS  | 3,7         | 3,8      | 4,9      |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Acenaphthen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,70        | 0,45     | 0,69     |
| MWF   | 0,75        | 0,52     | 0,83     |
| AWL   | 0,59        | 0,52     | 1,41     |
| MEF   | 0,76        | 1,03     | 0,72     |
| BIS   | 0,53        | 0,49     | 0,95     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Acenaphthylen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,67        | 0,55     | 0,31     |
| MWF   | 0,54        | 0,65     | 0,37     |
| AWL   | 0,38        | 0,55     | 0,45     |
| MEF   | 0,60        | 0,72     | 0,45     |
| BIS   | 0,59        | 0,49     | 0,35     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Fluoren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 1,8         | 1,1      | 1,5      |
| MWF   | 2,6         | 1,3      | 1,7      |
| AWL   | 2,1         | 1,9      | 1,9      |
| MEF   | 2,3         | 2,2      | 1,6      |
| BIS   | 2,3         | 1,9      | 1,5      |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Phenanthren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 7,8         | 6,4      | 5,1      |
| MWF   | 9,8         | 6,7      | 5,5      |
| AWL   | 8,2         | 7,3      | 5,6      |
| MEF   | 11,7        | 9,0      | 5,7      |
| BIS   | 8,6         | 7,2      | 6,2      |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Anthracen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,27        | 0,30     | 0,22     |
| MWF   | 0,29        | 0,33     | 0,36     |
| AWL   | 0,30        | 0,38     | 0,39     |
| MEF   | 0,42        | 0,56     | 0,41     |
| BIS   | 0,38        | 0,34     | 0,31     |

| Graskultur 2022  |             |          |          |
|--|-------------|----------|----------|
| Fluoranthren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt  | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF  | 2,0         | 1,5      | 2,0      |
| MWF  | 2,4         | 2,1      | 2,5      |
| AWL  | 2,1         | 2,0      | 2,8      |
| MEF  | 3,4         | 2,6      | 3,7      |
| BIS  | 2,6         | 1,8      | 2,9      |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 1,9         | 1,7      | 1,5      |
| MWF   | 2,2         | 2,8      | 3,6      |
| AWL   | 1,8         | 1,7      | 2,2      |
| MEF   | 2,9         | 2,2      | 3,0      |
| BIS   | 1,8         | 1,8      | 2,0      |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Benz[a]anthracen [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,16        | 0,29     | 0,43     |
| MWF   | 0,28        | 0,35     | 0,49     |
| AWL   | 0,28        | 0,37     | 0,47     |
| MEF   | 0,38        | 0,53     | 1,27     |
| BIS   | 0,43        | 0,41     | 0,52     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Chrysen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,44        | 0,45     | 0,68     |
| MWF   | 0,56        | 0,70     | 1,12     |
| AWL   | 0,49        | 0,76     | 0,73     |
| MEF   | 0,94        | 0,95     | 2,16     |
| BIS   | 0,64        | 0,52     | 0,84     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Benzo[b]fluoranthen [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ T] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,41        | 0,41     | 0,64     |
| MWF   | 0,37        | 0,53     | 0,84     |
| AWL   | 0,40        | 0,50     | 0,68     |
| MEF   | 0,81        | 0,73     | 1,81     |
| BIS   | 0,41        | 0,35     | 0,82     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Benzo[k]fluoranthen [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ T] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,18        | 0,22     | 0,34     |
| MWF   | 0,20        | 0,22     | 0,39     |
| AWL   | 0,23        | 0,21     | 0,48     |
| MEF   | 0,36        | 0,42     | 0,94     |
| BIS   | 0,25        | 0,15     | 0,40     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Dibenz[ah]anthracen [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ T] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,05        | 0,05     | 0,14     |
| MWF   | 0,05        | 0,05     | 0,19     |
| AWL   | 0,05        | 0,05     | 0,18     |
| MEF   | 0,05        | 0,13     | 0,18     |
| BIS   | 0,05        | 0,05     | 0,11     |

| Graskultur 2022  |             |          |          |
|--|-------------|----------|----------|
| Benzo[ghi]perylen [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt  | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF  | 0,20        | 0,23     | 0,55     |
| MWF  | 0,34        | 0,45     | 0,76     |
| AWL  | 0,36        | 0,34     | 0,49     |
| MEF  | 0,46        | 0,59     | 1,03     |
| BIS  | 0,24        | 0,25     | 0,49     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| Indeno[1,2,3-cd]pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ T] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 0,17        | 0,20     | 0,49     |
| MWF   | 0,25        | 0,31     | 0,65     |
| AWL   | 0,26        | 0,28     | 0,62     |
| MEF   | 0,45        | 0,50     | 1,09     |
| BIS   | 0,26        | 0,26     | 0,60     |

| Graskultur 2022  |             |          |          |
|--|-------------|----------|----------|
| Benzo[a]pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt  | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF  | 0,20        | 0,24     | 0,34     |
| MWF  | 0,25        | 0,28     | 0,43     |
| AWL  | 0,32        | 0,26     | 0,65     |
| MEF  | 0,40        | 0,55     | 1,25     |
| BIS  | 0,23        | 0,20     | 0,59     |
| OmH / Serie  | 0,52        | 0,34     | 0,69     |

| Graskultur 2022   |             |          |          |
|---|-------------|----------|----------|
| PAK4 [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM] Bestimmungsgrenze: 0,1 |             |          |          |
| Messpunkt   | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF   | 1,2         | 1,4      | 2,1      |
| MWF   | 1,5         | 1,9      | 2,9      |
| AWL   | 1,5         | 1,9      | 2,5      |
| MEF   | 2,5         | 2,8      | 6,5      |
| BIS   | 1,7         | 1,5      | 2,8      |
| OmH / Serie   | 2,6         | 2,1      | 4,1      |

| Graskultur 2022                                  |             |          |          |
|--|-------------|----------|----------|
| Summe 16 PAK (EPA) [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM] |             |          |          |
| Messpunkt  | 1.-3. Serie | 4. Serie | 5. Serie |
| FMF  | 20          | 18       | 19       |
| MWF  | 25          | 21       | 25       |
| AWL  | 21          | 20       | 25       |
| MEF  | 29          | 27       | 30       |
| BIS  | 23          | 20       | 23       |
| OmH / Serie                                      | 26          | 28       | 40       |

Benzo[a]pyren-, PAK4- und S16PAK-Werte, die abzüglich Standardunsicherheit  $u$  den OmH überschreiten, sind blassorange unterlegt.

Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG *kursiv* dargestellt.

Werte unterhalb BG gehen in PAK4 mit Null ein und in Summe 16 PAK mit dem halben Wert der BG.

## 9.6 PAK in Grünkohl (16 PAK nach EPA) 2022

| Grünkohl 2022 |            |             |               |         |             |           |              |       |                   |         |                      |                      |               |                     |                   |                       |                    |      |                  |             |
|---------------|------------|-------------|---------------|---------|-------------|-----------|--------------|-------|-------------------|---------|----------------------|----------------------|---------------|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|------|------------------|-------------|
| [µg/kg TM]    | Naphthalin | Acenaphthen | Acenaphthylen | Fluoren | Phenanthren | Anthracen | Fluoranthren | Pyren | Benzo[a]anthracen | Chrysen | Benzo[b]fluoranthren | Benzo[k]fluoranthren | Benzo[a]pyren | Dibenz[ah]anthracen | Benzo[ghi]perylen | Indeno[1,2,3-cd]pyren | Summe 16 PAK (EPA) | PAK4 | Gefriertrocknung | Frischmasse |
| BG            | 0,10       | 0,10        | 0,10          | 0,10    | 0,10        | 0,10      | 0,10         | 0,10  | 0,10              | 0,10    | 0,10                 | 0,10                 | 0,10          | 0,10                | 0,10              | 0,10                  | 0,10               | 0,10 | %OS              | [g]         |
| OmH           |            |             |               |         |             |           |              |       |                   |         |                      |                      | 2,7           |                     |                   |                       | 162                | 29,8 |                  |             |
| Messpunkt     |            |             |               |         |             |           |              |       |                   |         |                      |                      |               |                     |                   |                       |                    |      |                  |             |
| FMF           | 7,1        | 1,0         | 0,43          | 3,5     | 17          | 1,3       | 17           | 16    | 3,7               | 7,1     | 2,8                  | 1,8                  | 1,5           | 0,29                | 1,5               | 2,2                   | 84                 | 15,1 | 19               | 79          |
| MWF           | 7,6        | 1,2         | 0,56          | 4,2     | 20          | 1,5       | 19           | 17    | 2,7               | 5,5     | 2,9                  | 1,6                  | 1,2           | 0,21                | 1,5               | 1,9                   | 88                 | 12,3 | 21               | 43          |
| AWL           | 7,3        | 1,0         | 0,55          | 4,2     | 19          | 1,5       | 19           | 12    | 3,9               | 7,7     | 3,0                  | 2,1                  | 1,8           | 0,27                | 1,8               | 2,3                   | 87                 | 16,4 | 18               | 47          |
| MEF           | 6,5        | 1,4         | 0,71          | 4,0     | 17          | 0,8       | 18           | 11    | 3,1               | 6,5     | 2,7                  | 1,7                  | 1,5           | 0,30                | 1,6               | 2,1                   | 79                 | 13,8 | 19               | 67          |
| BIS           | 7,3        | 1,7         | 0,79          | 4,1     | 42          | 4,2       | 48           | 29    | 9,1               | 15,4    | 4,4                  | 2,2                  | 1,8           | 0,20                | 1,3               | 1,9                   | 173                | 30,7 | 17               | 41          |

**blassorange:** Ein Immissionseinfluss liegt vor, wenn ein Gehalt abzüglich Standardunsicherheit  $u$  (18% für Benzo[a]pyren, 35% für PAK4, 20% für 16 PAK) den OmH überschreitet  
Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG in kursiv dargestellt

Werte, die abzüglich Standardunsicherheit  $u$  den OmH überschreiten (blassorange unterlegt) traten 2022 nicht auf.