

# Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2024

mit Einordnung der Wirkungssituation 2017–2024  
und zusammenfassender Datendokumentation 2024



### **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**

24.03.2025

### **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 und Graskulturen, darunter im Uhrzeigersinn die 8 Messpunkte FMF, MWF, AWL, MEF, VIF, BWL, BIS und RNL mit Graskultur- oder Grünkohl-Exponaten bei Exposition oder vor Probenahme**  
zu den Messpunkte siehe auch Kap. 9.2 [Foto MWF: Bernhard Huber für Flughafen München GmbH]

## 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. Seit dem Jahr 2023 wird das Biomonitoring wieder an den acht repräsentativen Messpunkten durchgeführt.

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 2017–2024 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 2024 wie in den Vorjahren nur geringe Gehalte in den Bioindikatoren auf bzw. lagen 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 Bismut und Blei wurden an diesen beiden Messpunkten schwache Immissionseinflüsse festgestellt. Für PAK wurden nur schwache Immissionseinflüsse festgestellt:

am Messpunkt MEF mit Graskulturen für die Leitparameter PAK4 mit Benzo[a]pyren sowie  
am Messpunkt BIS mit Grünkohl für die Summe der 16 PAK mit den schwerer flüchtigen 12 PAK

Anhand Messpunktabstufungen und der Lage der Messpunkte zueinander und zu potenziellen Emissionsquellen können auch Stoffanreicherungen unterhalb OmH noch Quellen zugeordnet werden. Die Ergebnisse zeigten (Brems-, Reifen-, Fahrbahn-)Abrieb- und Verbrennungsprozesse als direkte Quellen für Antimon und PAK an, versiegelte Oberflächen als indirekte Quellen für Bismut und Blei. Die räumliche Ausdehnung reichte nur in den Nahbereich, an die Messpunkte MEF am Ostende der nördlichen Start- und Landebahn und MWF am Westende der Südbahn. Hinsichtlich saisonaler Immissionswirkungen der PAK durch Hausbrand ragte Messpunkt BIS innerorts hervor, aber nicht in jedem Jahr: Die PAK-Immissionswirkungen in Grünkohl im Herbst am Messpunkt BIS zeigen seit 2017 eine abnehmende Entwicklung. Wie schon 2020 und 2023 war 2024 kein saisonaler herausragender PAK-Gehalt an BIS erkennbar, möglicherweise aufgrund später einsetzender Heizperiode. Im Jahr 2023 wurden an allen Messpunkten bislang niedrigste Werte in Grünkohl gemessen. Saisonale Immissionswirkungen der PAK durch Hausbrand dürften aufgrund der warmen Witterung im Herbst 2023 so gering ausgefallen sein.

Die in den Bioindikatoren untersuchten Metall- und PAK-Gehalte waren unauffällig niedrig. Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen in den Jahren 2020 und 2021 korrespondieren würde und dem Wiederanstieg seit dem Jahr 2022 bis zum Jahr 2024 auf rund 80 % des Niveaus der Vor-Coronajahre, wurde nicht deutlich.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	3
Inhaltsverzeichnis .....	5
Danksagung .....	7
1 Einführung.....	8
1.1 Zielsetzung .....	8
1.2 Luftverunreinigungen, Immissionswirkungen und Biomonitoring .....	8
1.3 Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München .....	10
2 Untersuchungskonzept und -methoden.....	12
2.1 Untersuchungsgebiet und Messpunkte .....	12
2.2 Untersuchte Stoffe .....	14
2.3 Standardisierte Graskultur .....	16
2.4 Grünkohlexposition .....	17
2.5 Analysen .....	19
2.6 Maßgaben zur Auswertung und Beurteilung .....	19
2.7 Kenngrößen, Messunsicherheit, Umgang mit den Messwerten.....	24
3 Ergebnisse des Biomonitorings 2017–2024 .....	28
3.1 Aluminium in Graskultur und Grünkohl.....	28
3.2 Antimon in Graskultur und Grünkohl .....	32
3.3 Bismut in Graskultur und Grünkohl.....	36
3.4 Blei in Graskultur und Grünkohl.....	39
3.5 Chrom in Graskultur und Grünkohl.....	43
3.6 Eisen in Graskultur und Grünkohl .....	47
3.7 Kupfer in Grünkohl.....	50
3.8 Molybdän in Graskultur und Grünkohl .....	53
3.9 Nickel in Graskultur .....	56
3.10 Vanadium in Graskultur und Grünkohl .....	59
3.11 PAK in Graskultur und Grünkohl .....	63
4 Messergebnisse 2024.....	73
4.1 Aluminium 2024.....	74
4.2 Antimon 2024.....	75
4.3 Bismut 2024.....	76

4.4	Blei 2024.....	77
4.5	Chrom 2024.....	78
4.6	Eisen 2024.....	79
4.7	Kupfer 2024.....	80
4.8	Molybdän 2024.....	81
4.9	Nickel 2024.....	82
4.10	Vanadium 2024.....	83
4.11	Benzo[a]pyren 2024.....	84
4.12	PAK4 2024.....	85
4.13	Summe 16 PAK (EPA) 2024.....	86
5	Zusammenfassende Bewertung.....	87
6	Abkürzungen.....	91
7	Glossar.....	93
8	Literatur.....	96
8.1	Gesetze und Verordnungen.....	96
8.2	Normen und Richtlinien.....	97
8.3	Literaturquellen.....	98
8.4	Quellen im Internet.....	99
	Abbildungsverzeichnis.....	101
	Tabellenverzeichnis.....	102
9	Anhang.....	103
9.1	Witterungseinflüsse 2024.....	104
9.2	Messnetz Biomonitoring – Messpunktbeschreibungen.....	108
9.3	Metalle in Graskultur 2024.....	116
9.4	Metalle in Grünkohl 2024.....	118
9.5	PAK in Graskultur (16 PAK nach EPA) 2024.....	119
9.6	PAK in Grünkohl (16 PAK nach EPA) 2024.....	121

## 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 Ökometric GmbH Bayreuth und AGES, Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, das Nationale Referenzlabor für Metalle und Stickstoffverbindungen in Futter- und Lebensmitteln in Linz,
- 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>.

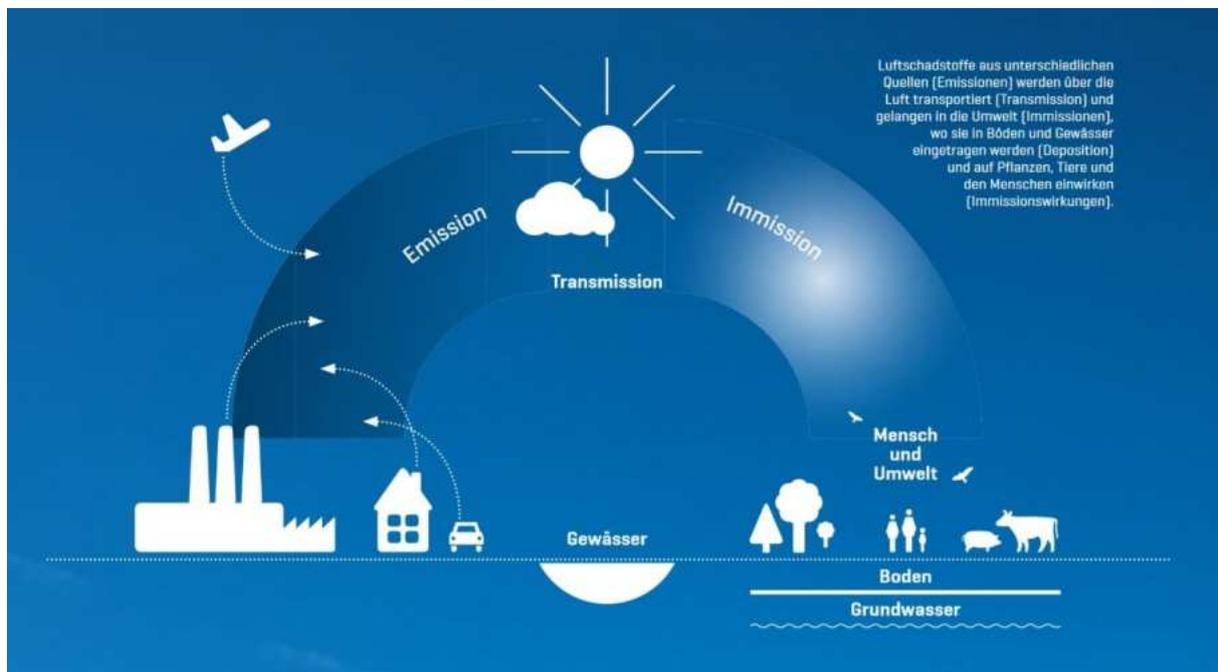
Um **Auswirkungen der Luftverunreinigungen** auf die Umweltqualität zu überwachen wird seit 2006 am Flughafen München und in seiner Umgebung **Biomonitoring** durchgeführt, bis 2020 ergänzt durch Depositionsuntersuchungen <https://www.munich-airport.de/biomonitoring-88353>. Die Wirkungsermittlung und -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 1.2-1): 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.

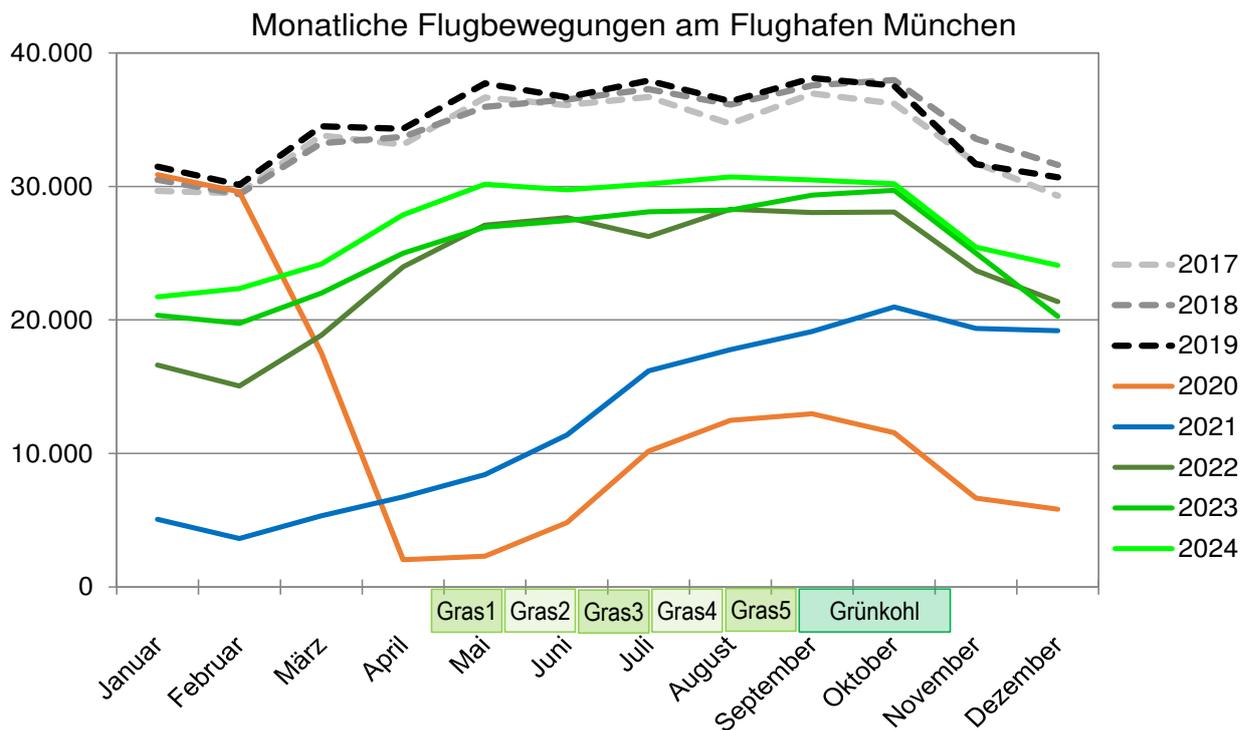
**Die Messpunkte** liegen im landwirtschaftlich genutzten Bereich, verkehrs- und siedlungsnah, oder quellenfern. Bis 2017 umfasste das Messnetz 14 Messpunkte: zehn Messpunkte im direkten Flughafenumfeld, zwei südlich gelegene Referenzmesspunkte und zwei Messpunkte im Vergleichsgebiet Aichach ohne Flughafen. 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 (2024) „Einsatz aktiver Biomonitoringverfahren im Bereich von Emissionsquellen“ angenähert. Im Jahr 2022 wurde das Messnetz abermals um drei Messpunkte auf fünf reduziert. Dies war ein einmaliger Schritt, denn in 2023 und 2024 wurde das freiwillige kontinuierliche Biomonitoring wieder an den acht repräsentativen Messpunkten von 2021 fortgeführt.

**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. Im Jahr 2020 wurde Grünkohl nicht auf Metalle untersucht. Das Biomonitoring wurde 2006 bis 2020 durch Depositionsuntersuchungen ergänzt. Seit dem Jahr 2021 werden die begleitenden Depositionsuntersuchungen nicht mehr durchgeführt, dafür wird Grünkohl wieder auf Metalle analysiert. Untersuchungskonzept und -methoden 2024 sind nachfolgend in Kapitel 2 dargestellt.

**Die Messergebnisse** aus dem Biomonitoring waren 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 worden und können dort angefragt werden. 2019 veröffentlichte der Flughafen München mit der Broschüre „Biomonitoring“ eine Zusammenschau der Messergebnisse und Gefährdungsabschätzungen aus den Jahren 2006 bis 2017 ([https://www.munich-airport.de/b/0000000000000005952988bb5c656236/biomonitoring\\_brosch.pdf](https://www.munich-airport.de/b/0000000000000005952988bb5c656236/biomonitoring_brosch.pdf)). Der hier vorgelegte Bericht Teil 1 *Einordnung der Wirkungssituation* stellt, wie die beiden Vorjahresberichte, die Ergebnisse des jährlichen Biomonitorings 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 2024* in der Darstellung einer *Zusammenfassenden 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 Immissions-einflüsse – weit unterhalb Beurteilungswerten für die Gefahrenabwehr – zu identifizieren. Dieser Biomonitoring-Bericht wie die der drei Vorjahren sind auf der Website des Münchner Airports abrufbar unter <https://www.munich-airport.de/biomonitoring-88353>.

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 Verkehrsberichte im Internet unter: <https://www.munich-airport.de/verkehrszahlen-88506>). 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. Im Gesamtjahr 2022 war dann das Flugverkehrsaufkommen auf rund 70 % des Niveaus der Vor-Coronajahre 2018 und 2019 zurückgekehrt, stieg 2023 auf 73 % und 2024 auf 79 % gegenüber 2018 und 2019 (Flugbewegungen in Bild 1.3-1).



**Bild 1.3-1: Flugbewegungen 2020 bis 2024 im Vergleich zu den Vorjahren**

Biomonitoring-Expositionsabschnitte von Graskultur und Grünkohl: grün unterlegt

Die Start- und Landebahn (SLB) Süd des Münchner Airports war vom 4. Mai bis 15. Juli 2020 gesperrt gewesen, die SLB Nord vom 16. Juli bis 3. August 2020. In diesen Zeiträumen waren an den Bahnen Sanierungsarbeiten im eher kleinen Rahmen durchgeführt worden. Im Jahr 2021 waren die SLB Süd vom 1. Mai bis 6. August und die SLB Nord vom 7. August bis 2. Oktober für massive Sanierungen gesperrt gewesen: Die SLB war mit Asphaltfräsen geöffnet und Teilstücke erneuert worden, der Abtransport des

Abraums auf LKWs war insbesondere auf der Südbahn z. T. mit erheblichen Staubfahnen verbunden (Mitteilungen Dr. Liebmann, FMG). Von 2022 bis 2024 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), die direkt die Auswirkungen von Immissionen anzeigen. Mit ihnen 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 2024 richtet sich nach den aktuellen Maßgaben (VDI 3957/10, 2024). Es berücksichtigt u. a. die zeitliche Entwicklung der letzten acht Jahre, in der das Programm durch die Nachgenannten einheitlich und nach dem neusten Stand ausgeführt wurde (mit Ausnahme der Reduktion von acht auf fünf Messpunkte für das Jahr 2022).

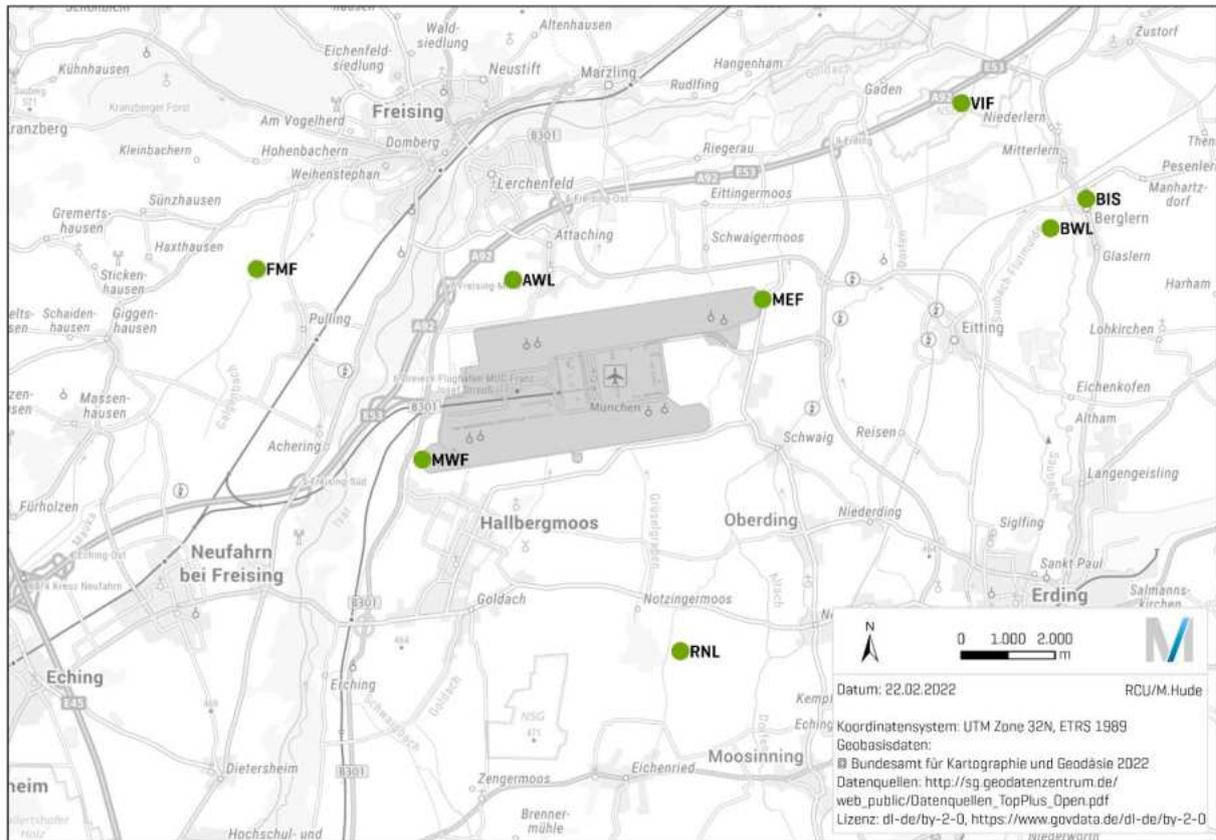
Das Programm wurde von Dr. Monica Wäber – UMW Umweltmonitoring in Sauerlach beraten und durchgeführt. Als Partnerlabor von UMW für die PAK-Analytik agiert die Eurofins Ökometric GmbH Bayreuth (vormals firmierend als ÖKOMETRIC GmbH – Bayreuther Institut für Umweltforschung). Für die Metallanalysen war bis einschließlich 2023 die Eurofins Food Testing Süd GmbH in Tübingen (vormals firmierend als Berghof Analytik + Umweltengineering GmbH) zuständig. Wegen der Schließung dieses Labors ist seit 2024 die AGES, die Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH das neue Partnerlabor von UMW für die Metallanalytik. Mit ihrem Nationalen Referenzlabor für Metalle und Stickstoffverbindungen in Futter- und Lebensmitteln ist die AGES in der Lage, die hohen Anforderungen für die Analytik des Biomonitorings zu erfüllen. Dies war vorab in aufwändigen Labortests überprüft worden und hat sich hier, wie auch in weiteren Untersuchungsprogrammen von UMW bestätigt.

### 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: Haus-

brand) 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**

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

**Das Messnetz** umfasste im direkten Flughafenumfeld 2020, 2021 und 2023 sieben Messpunkte und einen südlich gelegenen Messpunkt RNL (Bild 2.1-1): RNL wurde ursprünglich als Referenzmesspunkt für die Hintergrundbelastung angelegt (VDI 3957/10, Stand 2004), im Notzingeremoos abseits von Flughafeneinfluss. Aktuell ermittelt man die Hintergrundbelastung anhand der Messpunkte im Untersuchungsgebiet, die für den jeweiligen Stoff niedrigste Stoffanreicherungen in den Bioindikatoren zeigen (VDI 3857/2, 2021). Im Jahr 2022 – und nur für dieses Untersuchungsjahr – war das Messnetz um drei (RNL, VIF, BWL) der verbliebenen acht Messpunkte reduziert worden.

**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**

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 (EU) 2023/915).

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 2024).

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

Biomonitoring mit Graskultur und Grünkohl	
<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>• Naphthalin (NAP)</li> <li>• Acenaphtylen (ACY)</li> <li>• Acenaphthen (ACE)</li> <li>• Fluoren (FLE)</li> <li>• Phenanthren (PHE)</li> <li>• Anthracen (ANT)</li> <li>• Pyren (PYR)</li> <li>• <u>Benzo[a]anthracen (BaA)</u></li> <li>• <u>Chrysen (+Triphenylen) (CHR)</u></li> <li>• Fluoranthen (FLU)</li> <li>• <u>Benzo[b]fluoranthen (BbF)</u></li> <li>• Benzo[k]fluoranthen (BkF)</li> <li>• <u>Benzo[a]pyren (BaP)</u></li> <li>• Indeno[1,2,3,-cd]pyren (INP)</li> <li>• Benzo[g,h,i]perylen (BghiP)</li> <li>• Dibenzo[a,h]anthracen (DBahA)</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) als vornehmlich saisonale Freisetzung während der Heizperiode. Kontinuierliche Quellen sind zu jeweils rund 6 Prozent kleine und mittlere Feuerungsanlagen im Gewerbe sowie Industrieprozesse, nur zu 2 Prozent Verkehr, der Rest Energiewirtschaft, verarbeitendes Gewerbe und weitere Quellen (UBA 2016). Verkehrsabgase und der Flughafenbetrieb (Rückstände aus dem Kerosin) stellen also direkte, kontinuierliche PAK-Quellen dar, während die Hauptquelle – Hausbrand – saisonal 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) 2023/915). 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 2024) 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 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 pausierte 2020 pandemiebedingt zur Kostenreduktion.



**Bild 2.4-1: Grünkohlexponate Sorte „Reflex“ seit 2023 (oben), Sorte „Hammer/Grüsa“ bis 2022 (links unten) und Grünkohlernte für die Analysen auf Metalle (1 Kultur) und PAK (2 Kulturen)**

[Foto unten rechts: Günter Wicker]

Die Grünkohlproben werden nicht gewaschen und nicht verzehrfertig aufbereitet wie Lebensmittel (VDI 3957/4 2024), sondern ungewaschen analysiert, da sie gemäß Richtlinie VDI 3957 Blatt 3 (2024) als Indikatoren für direkte 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.

Im Jahr 2024 kam erstmals Grünkohl (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) der Sorte „Reflex“ zum Einsatz, in Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und wie dort eingesetzt. Die bis 2023 verwendete Sorte „Hammer/Grüsa“ ist nicht mehr verfügbar und wies in den Vorjahren verringerte Wüchsigkeit auf.

Tabelle 2.4-1 stellt nachfolgend die Expositionsabschnitte von Graskulturen und Grünkohl 2024 dar.

**Tabelle 2.4-1: Expositionsabschnitte 2024**

Expositionsabschnitte 2024 – alle Expositionsabschnitte (kurz: Serien)			
Monat	Kalender- 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> 26.04-26.05.2024	
Ende Mai–Ende <b>Juni</b>	KW 21–25	<b>2. Serie:</b> 26.05-23.06.2024	
Ende Juni–Ende <b>Juli</b>	KW 25–29	<b>3. Serie:</b> 23.06-21.07.2024	
Ende Juli–Mitte <b>August</b>	KW 29–33	<b>4. Serie:</b> 21.07.-19.08.2024	
Mi. <b>August</b> –Mi. <b>Sept.</b>	KW 33–37	<b>5. Serie:</b> 19.08.-15.09.2024	
Mitte <b>Sept.</b> –Mitte Okt.	KW 37–41		<b>Exposition:</b> 15.09.-10.11.2024
Mitte Okt.– <b>Mitte Nov.</b>	KW 37–45		

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

Folgende Besonderheiten traten 2024 auf, die bei der Ergebnisbetrachtung ggf. zu berücksichtigen sind: In der 2. Serie von Graskulturen war am Messpunkt VIF eine der beiden „großen“ Kulturen (für die PAK-Untersuchung) am Topfboden durchgebrochen. In der 4. Serie war dort eine der beiden „großen“ Kulturen von Ameisen besiedelt. Die jeweils intakte Kultur wurde analysiert.

In der 3. Serie von Graskulturen regnete es unmittelbar vor Probenahme stark. Am Messpunkt AWL waren die Kulturen bereits zur „Halbzeit“ der Exposition „zerzaust“, vermutlich aufgrund eines lokalen Hagelereignisses.

Bei Grünkohl waren am Messpunkt MWF zur „Halbzeit“ der Exposition die Stützstäbe nicht mehr in den Kulturtöpfen: ob aufgrund Sturm oder Vandalismus konnte nicht geklärt werden.

Die Wüchsigkeit der Grünkohl-Sorte „Reflex“ war seit 2023 besser als von Hammer/Grüsa davor. Außerdem waren während der Expositionsperioden 2024 wie bereits 2022 und 2023 wegen der trockenen heißen Witterung Zwischenbewässerungen erforderlich (KW33).

Ausfälle gab es 2024 erneut 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.

## 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 30-35°C erfolgt eine Zerkleinerung und Homogenisierung. Die homogenisierten Proben werden gemäß EN 13805 unter Hochdruck mit konzentrierter Salpetersäure zur vollständigen Mineralisierung aufgeschlossen. Die Metallgehalte werden danach mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) gemäß DIN EN 15763 und EN ISO 17294-2 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 2024 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 0,020 mg/kg TM für Antimon und 0,010 mg/kg TM für Vanadium (ab 2019 bis 2023). Folgende, zum Teil deutlich abgesenkten Bestimmungsgrenzen wurden 2024 eingehalten: Aluminium 0,40 mg/kg TM, Chrom 0,012 mg/kg TM, Eisen 0,15 mg/kg TM, Molybdän 0,007 mg/kg TM, Nickel 0,015 mg/kg TM, Blei 0,0025 mg/kg TM, Antimon 0,0040 mg/kg TM und Vanadium 0,007 mg/kg TM.

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 (2024) 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 Standardunsicherheit 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 2024 ermittelt. Dieser kann mit dem jeweiligen überregionalen OmH (VDI 3857/2 2021) und mit dem in Bayern an ländlichen Hintergrundmesspunkten ermittelten OmH (BayLfU 2022a) 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 2012–2024 sinnvoll (2020: keine Metalle in Grünkohl untersucht). Ausnahme bilden die OmH-Ermittlungen für Bismut und Blei: Für Bismut erfolgte der Datenumgriff 2017–2024, weil ab 2017 die Bestimmungsgrenze hinreichend empfindlich war. Für Blei erfolgte wegen der zeitlichen Entwicklung der Datenumgriff 2016–2024. Die OmH für Metalle in Grünkohl können mit aktuellen überregionalen OmH verglichen werden (VDI 3957/3 2024).

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 stimmen sie in der Höhe gut mit den Vergleichs-OmH überein, nur für Aluminium liegen sie höher.

Die berechneten OmH für Grünkohl sind für Aluminium wie für Antimon, Blei und Vanadium deutlich niedriger als die Vergleichs-OmH. Für Molybdän ist der OmH höher als der 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 2024) 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.

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  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  beträgt (VDI 3857/2). Dies entspricht rechnerisch einer Standardunsicherheit von einem Drittel: 33,33 %.

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 sind diese?**

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

	Orientierungswerte für den maximalen Hintergrundgehalt [OmH]								
	für Graskultur bezogen auf 100% TM					für Grünkohl bezogen auf 100% TM			
	OmH <sub>ermittelt dieses Bio-monitoring</sub>	OmH überregional (VDI 3857/2)	OmH Bayern ländl. Hintergrund (VDI)	OmH Bayern ländl. H.grund BayLfU2012-21	Standardunsicherheit u%	OmH <sub>ermittelt dieses Bio-monitoring</sub>	OmH überregional (VDI 3957/3)	OmH Bayern ländl. Hintergrund (VDI)	Standardunsicherheit u%
<b>Metalle</b>	[mg/kg TM]	Milligramm pro Kilogramm T rockenmasse				[mg/kg TM]	Milligramm pro kg TM		
Aluminium (Al)	<b>79</b>	56	45	40	33%	<b>38</b>	60	-	-*
Antimon (Sb)	>75% : <0,013-<0,04	keine Angabe	>75% : <0,025	>75% : <0,025-<0,1	19%	<b>0,035</b>	0,094	-	-*
Bismut (Bi)	<b>0,0073</b>	keine Angabe	>75% : <0,007	>75% : <0,02-<0,007	-*	<b>0,023</b>	0,030	-	-*
Blei (Pb)	<b>0,14</b>	0,36	>75% : <0,25	>75% : <0,2-<0,25	15%	<b>0,12</b>	0,23	-	-*
Chrom (Cr)	<b>0,37</b>	0,51	>75% : <0,20	>75% : <0,20	22%	<b>0,39</b>	0,46	-	-*
Eisen (Fe)	<b>104</b>	103	95	84	16%	<b>172</b>	154	-	-*
Kupfer (Cu)						<b>2,7</b>	3,8	-	-*
Molybdän (Mo)	<b>3,2</b>	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	-*	<b>7,8</b>	4,0	-	-*
Nickel (Ni)	<b>5,1</b>	keine Angabe	5,7	5,4	14%			-	-*
Vanadium (V)	<b>0,15</b>	0,15	0,12	0,091	20%	<b>0,090</b>	0,12	-	-*
<b>PAK</b>	[µg/kg TM]		**OmH Bayern (2005-2014)	Mikrogramm/Kilogramm TM		[µg/kg TM]	Mikrogramm/Kilogramm TM		
16 PAK	<b>33 / 30 / 43</b>	-	**44 / 44 / 107	-	-*	<b>145</b>	330	-	20%
12 PAK	<b>24 / 23 / 34</b>	-	** / 29 / 87	-	-*	<b>130</b>	304	-	21%
PAK4	<b>2,5 / 2,1 / 4,5</b>	-	**8,6 / 8,1 / 16	-	-*	<b>29</b>	63	-	35%
Benz[a]pyren	<b>0,53 / 0,33 / 0,70</b>	-	**1,8 / 0,8 / 2,1	-	-*	<b>2,6</b>	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 2024 (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)

## 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 2017–2024 sind Veränderungen der allgemeinen Immissionsituation 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. Im Berichtsjahr 2024 stieg das Flugverkehrsaufkommen gegenüber 2022 um rund 7 % an (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 Standardunsicherheit des Verfahrens Berücksichtigung finden.

### III. Messpunktastufung und Quellenzuordnung

Um identifizierte Immissionswirkungen an Messpunkten potenziellen Emissionsquellen zuordnen 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 2023a) als aktuellste, publizierte 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 (2024 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 (Richtlinie 2002/32/EG).
- *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. Verordnung (EU) 2023/915 setzt Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln fest. Diese Verordnung löst Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 und deren Fortschreibungen ab. Aus den Stoffen, die für das aktuelle Biomonitoring ausgewählt sind, ist in VO (EU) 2023/915 spezifisch für Blattkohl-Lebensmittel ein Höchstgehalt für Blei festgelegt.

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?**

**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) 2023/915
Metalle	Milligramm pro Kilogramm Trockenmasse			mg/kg Frischmasse
Aluminium (Al)	-	568	568	-
Antimon (Sb)	-	-	-	-
Bismut (Bi)	-	-	-	-
Blei (Pb)	34	0,9 - 3,4	1,7 - 2,3	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	-
PAK	Mikrogramm/Kilogramm Trockenmasse			µg/kg Frischmasse
16 PAK	-	-	-	-
12 PAK	-	-	-	-
PAK4	-	-	-	-
Benz[a]pyren	-	-	-	-

*kursiv: Lebensmittel-Höchstgehalte nur orientierend mit Grünkohl zu vergleichen*

## 2.7 Kenngrößen, Messunsicherheit, Umgang mit den Messwerten

Die Stoffgehalte in den Graskultur- und Grünkohlproben sind auf die **Trockenmasse** bezogen. Die Bestimmung der Feuchtigkeit (Trockenmassegehalt in %) erfolgt durch Trocknung bei 35°C ohne Vortrocknung mittels Gravimetrie (Verordnung (EG) Nr. 152/200). Letzteres 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 3957/1, /2, /3 und /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 2024) 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 Standardunsicherheit 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 Standardunsicherheit  $u$  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 *kursiver 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). Für PAK wurden keine Werte als Ausreißer identifiziert und entsprechend behandelt.

**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: Aluminium, Eisen, Vanadium	gesamter Metalldatensatz 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 2017 Serie 5 2019 Serie 1 2019 Serie 3 2019 Serie 5 2023 Serie 1	Messpunkt BIS: Nickel Messpunkt MWF: Antimon Messpunkt MEF: Bismut Messpunkt MEF: Bismut Messpunkte MEF, MWF: Antimon Messpunkt MEF: Blei	nicht eliminiert, da nach Überprüfung einmaliger Immissionseinfluss möglich
Graskultur für Metallanalyse 2023 Serie 3	Messpunkt MEF: Aluminium, Eisen, Vanadium	alle Metallgehalte auffällig hoch, möglicherweise Kontamination durch Erdboden, daher Datensatz eliminiert
Graskultur für Metallanalyse 2024 Serie 3	Messpunkt AWL: Aluminium, Eisen, Vanadium	nicht eliminiert, da nach Überprüfung einmaliger Immissionseinfluss möglich (landwirtschaftliche Aktivität; niedriger als Serie 3 MEF 2023)
Graskultur für Metallanalyse 2024 Serie 3	Messpunkt MWF: Bismut	nicht eliminiert, da nach Nachanalyse bestätigt: einmaliger Immissionseinfluss z. B. Flughafenbetrieb möglich
Grünkohl für Metalle 2017–2024	2017 Messpunkt AWL Eisen erhöht, aber <rA	2017 AWL Eisen 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, z. B. bei Gras Serien 1, 3 und vor allen 5 2024. Die Niederschlagsmengen während der Graskulturserien und Grünkohl-Exposition 2024 sind im Anhang dargestellt und beschrieben (Kap. 9.1). Insgesamt waren die Niederschlagsmengen während der jeweils 2. Hälfte der Exposition bei Grasserie 1 mit 65 mm, bei Grasserie 3 mit 69 mm, bei Grasserie 5 mit 134 mm extrem hoch. Die 2. Serie Graskultur zeichnete sich durch extrem viel Niederschlag aus – 217 mm – aber in der 2. Hälfte regnete es nur drei

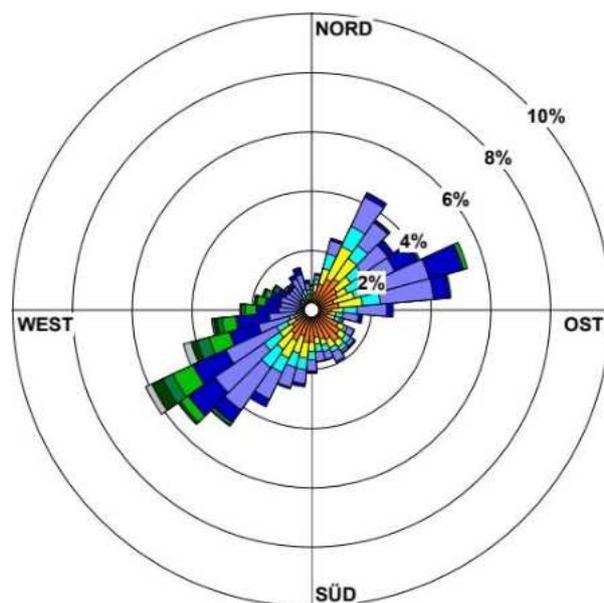
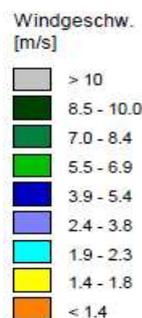
Tage vor Probenahme mit 15 mm in relevantem Ausmaß. Auch in der 4. Serie regnete es vor Probenahme: an drei letzten Tagen mit 23 mm relativ viel (Bild 9.1-1). Die insgesamt durchschnittliche Niederschlagsmenge von 114 mm während der Grünkohlexposition 2024 fiel allerdings i. W. nur während der ersten Expositionshälfte. Für Grünkohl könnten dies als Einflussfaktor auf die im Vergleich zu den Vorjahren höheren PAK-Gehalte eine Rolle gespielt haben – allerdings mehr noch die niedrigeren Temperaturen und damit verbunden saisonal höhere Heizaktivität häuslicher Kleinf Feuerungsanlagen (Kapitel 3.11).

Für die Betrachtung der **Windverhältnisse** hatte die FMG für die Expositionszeiträume Windrosen zur Verfügung gestellt. Bei den vorgelegenen, unauffällig niedrigen Immissionswirkungen hatten sich 2024 wie schon bei expositionsabschnittsweiser Betrachtung 2021, je nach vorherrschenden Windlagen, keine Hinweise auf unterschiedliche Quellen ergeben (Kap. 9.1, Bild 9.1-2). Da auch im Jahr 2022 niedrige Immissionswirkungen vorgelegen hatten, war nur die Gesamtjahreswindrose im Vergleich zum Vorjahr dargestellt worden (Wäber und Pompe 2024). Für 2023 lagen montasweise Windrosen vor.

Bild 2.7-1 zeigt die Windrose (Windrichtung und -geschwindigkeit) beispielhaft für den Zeitraum Mai bis Oktober 2023, vergleichbar zu den Windrosen für die Gesamtjahre 2024, 2022 und 2021: in allen Jahren Hauptwindrichtungen West-Südwest (aus westlichen Richtungen) und Ost-Nordost (in den Gesamtjahren zweithäufigste Windrichtung) und repräsentativ für den langjährigen Durchschnitt mit rund 60 % Westwinden und 40 % Ostwinden.

**Bild 2.7-1: Windrose beispielhaft für den Expositionszeitraum Mai–Oktober 2023**

mit Windgeschwindigkeit [m/s] und Windrichtung (aus Richtung);  
umlaufender Wind: durchschnittl. 5 %  
[Quelle: MüllerBBM GmbH für FMG]



### 3 Ergebnisse des Biomonitorings 2017–2024

#### 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 2017–2024 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (Bestimmungsgrenze BG: 0,25 mg/kg TM und 0,40 mg/kg TM in 2024).

Die Aluminiumgehalte in Graskultur waren 2024 mit 9–110 mg/kg TM in der Höhe gut vergleichbar mit den beiden Vorjahren mit 30–124 mg/kg TM und teilweise höher als 2021 mit 13–58 mg/kg TM. Insgesamt lagen sie im Wertebereich seit 2017 mit 13–128 mg/kg TM (Bild 3.1-1 oben).

Die Aluminiumgehalte in Grünkohl lagen 2024 mit 13–53 mg/kg TM innerhalb des Wertebereichs 2017–2023 von 4–69 mg/kg TM (2020 keine Messung; Bild 3.1-1 unten), aber tendenziell höher als die besonders niedrigen Niveaus von 2021 und 2023 mit 3,7–24 mg/kg TM.

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 79 mg/kg TM (fortgeschrieben im Zeitraum 2017–2024) und die Standardunsicherheit  $u$  33 %.

Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 38 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 Standardunsicherheit von 33,33 % entsprechend (Kap.2.6).

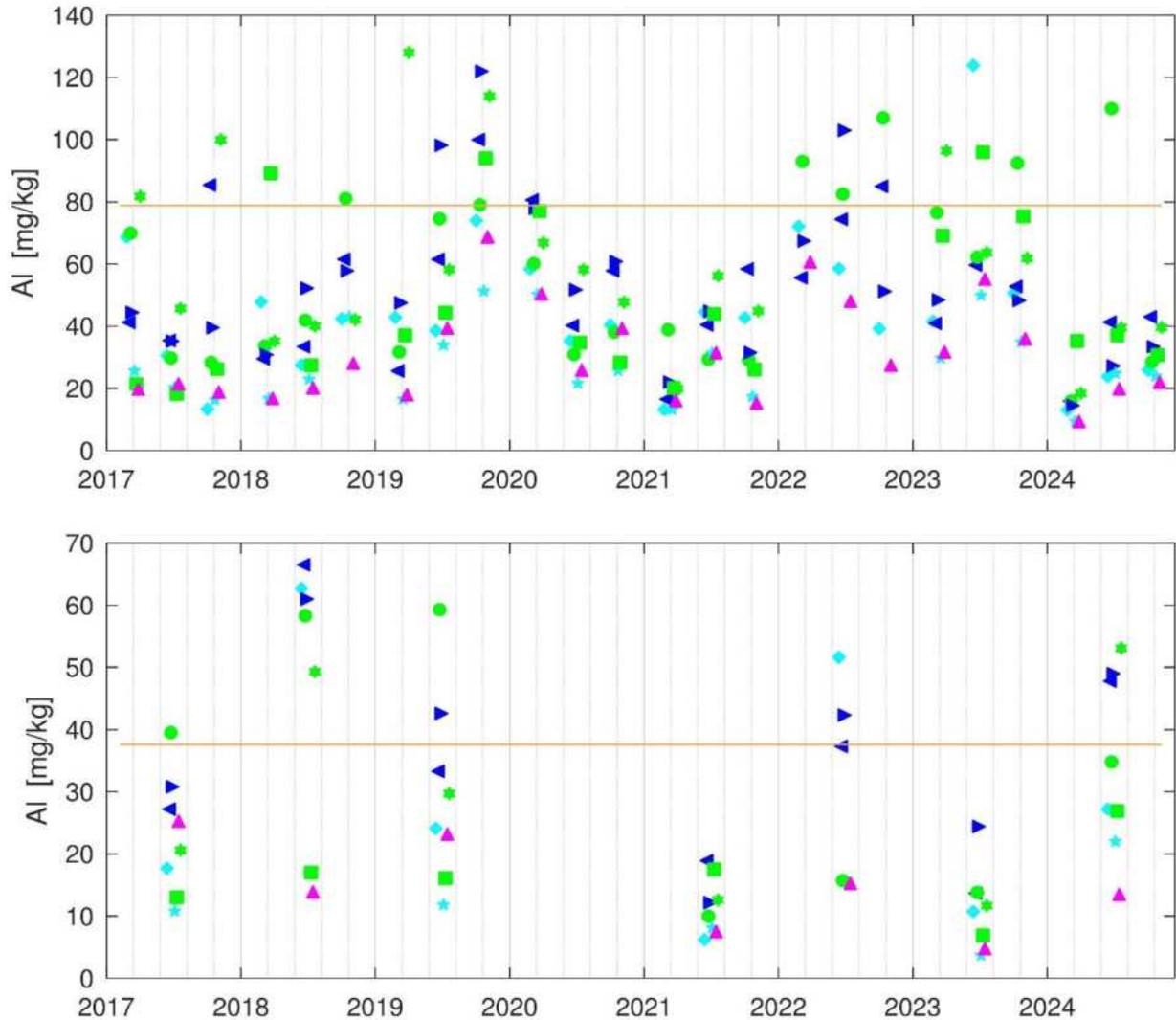
Im Jahr 2018 kam es in der 5. Graskulturserie wegen Vandalismus zu einem Totalausfall an AWL und im Jahr 2023 wurden wegen Kontamination die Metallwerte an MEF in der 3. Serie eliminiert. Von den für Graskultur 2017–2024 im Untersuchungsgebiet vorliegenden 181 Werte überschritten drei Aluminiumgehalte (in der 1. und 3. Serie 2019 und der 5. Serie 2023) den aktuellen OmH knapp – die Standardunsicherheit  $u$  33 % berücksichtigt (Tabelle 3.1-1).

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2024 vorliegenden 53 Werten traten 5 OmH-Überschreitungen auf: 2018 an den Messpunkten FMF, MWF, AWL, MEF und 2019 am Messpunkt AWL. Folglich lag im Untersuchungsgebiet 2018 und 2019 für Grünkohl an AWL ein schwacher, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Aluminium vor.

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

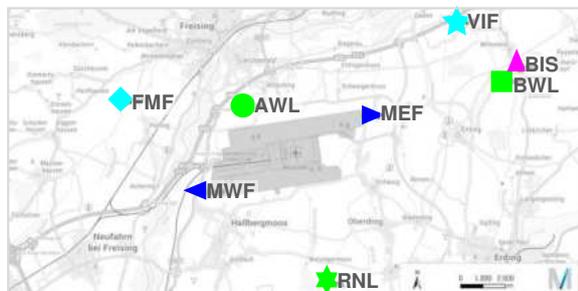
Aluminium	OmH [mg/kg TM]	Standardunsicherheit $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	79	33 %	20-24	1	0	0	1	0	0	0	1
Grünkohl	38	-	6-7	1	1	2	1	0	0	0	0

### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation



**Bild 3.1-1: Aluminiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024**

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:

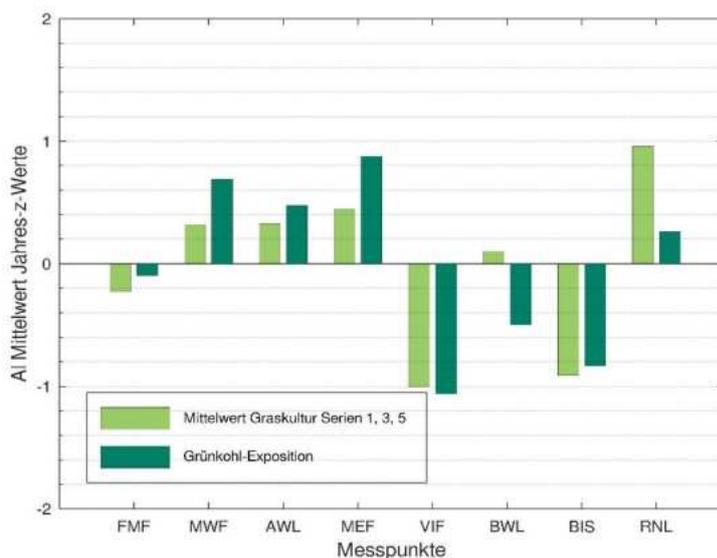
- ◆◆ (türkis) FMF, VIF naturnahes landwirtschaftliches Umfeld
  - ★●■ (grün) RNL, AWL, BWL im landwirtschaftlichen Umfeld
  - ▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich
  - ▶▶ (blau) MEF, MWF direkte Nähe zu Flughafen-Betriebsflächen
- [Karte: FMG, Grundlage: Geobasisdaten – Bay. Vermessungsverwaltung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

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 2021 und 2024 (mit einer Ausnahme) traten in Graskulturen keine Werte oberhalb 79 mg/kg TM auf. In den Jahren 2021 und 2023 traten in Grünkohl Werte deutlich unterhalb 38 mg/kg TM auf.

Die Flugzahlen waren 2020 und 2021 deutlich zurückgegangen (vgl. Bild 1.3-1) und 2022 wieder auf 70 %, 2023 auf rund 75 % und 2024 auf rund 80 % des Niveaus der Vor-Coronajahre angestiegen. Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Verlauf korrespondieren würde), werden mit Graskultur-Biomonitoring nicht klar erkennbar: Auch in den Vor-Coronajahren 2017–2019 lagen die Aluminiumgehalte mehrheitlich unter 79 mg/kg TM vor. Für Grünkohl hatten sich 2022 wieder höhere Aluminiumgehalte in Grünkohl gezeigt, allerdings nicht nur flughafennah an MWF und MEF, sondern auch naturnah an FMF (Bild 3.1-1 unten). Im Jahr 2023 lagen die Aluminiumgehalte in Grünkohl dann so niedrig wie 2021, während sie im Jahr 2024 in vergleichbarer Höhe mit 2022 lagen. Witterungsbedingte Einflüsse, die von Jahr zu Jahr differieren, sind zu vermuten.

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

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



**Bild 3.1-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Aluminium 2017–2024**

Anhand normierter Z-Werte (Kapitel 2.6) wird eine etwaig unterschiedliche Gesamtbelastung an den Messpunkten 2017–2024 veranschaulicht (Bild 3.1-2).

Mit Ausnahme von BWL zeigen die Messungen von Graskultur und Grünkohl-Exposition tendenziell übereinstimmend überdurchschnittliche Werte an den betriebsnahen Messpunkten MWF und MEF sowie an den landwirtschaftlich geprägten Messpunkten AWL und RNL.

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

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 Messpunktstufungen (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. Dies erklärt auch das Aluminiumergebnis an RNL (Bild 3.1-2) und liefert einen Quellenhinweis für das Einzelergebnis an FMF in der 3. Serie 2023 (Bild 3.1-1).

### **Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:**

Aluminium wird aktuell in anderen flughafenbezogenen Biomonitorings nicht untersucht. Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann aber zum einen durch die Bewertung der Hintergrundbelastung anhand OmH-Vergleich eingeordnet werden (Tabelle 2.6-1), zum anderen durch den Vergleich mit dem Graskultur-Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt an ländlichen Hintergrundmesspunkten:

Der hier für Graskultur ermittelte OmH liegt mit 79 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 2022a).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 38 mg/kg TM ist hingegen niedriger als der überregionale OmH 60 mg/kg TM (VDI 3957/3).

Graskulturgehalte von 14 $\pm$ 10 mg/kg TM bis 18 $\pm$ 6 mg/kg TM als Mittelwerte quellen- und ackerferner Hintergrundmesspunkte in Bayern 2017-2021 (BayLfU 2022) liegen am unteren Rand der 2024 hier im Untersuchungsgebiet gemessenen mittleren Gehalte von 17-51 mg/kg TM.

### **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 Schaffuttermitteln (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 0,040 mg/kg TM bis 2019; 0,025 mg/kg TM 2020–2021). Nach weiterer Absenkung der BG auf 0,013 mg/kg TM lag Antimon im Jahr 2022 noch an den Messpunkten FMF und BIS sämtlich unterhalb BG und an AWL einmal, im Jahr 2023 in den Serien 3 und 5 fast sämtlich unterhalb BG (MWF und AWL bei 0,014 mg/kg TM). Im aktuellen Berichtsjahr, nach nochmaliger deutlicher Absenkung der BG auf 0,0040 mg/kg TM, wurde Antimon in einem Wertebereich von 0,0065–0,034 mg/kg TM in allen Graskulturproben gefunden.

In den Grünkohlproben war Antimon 2017–2024 mehrheitlich analytisch bestimmbar: im Bereich von 0,015–0,096 mg/kg TM. Im Jahr 2023 lagen die Gehalte mehrheitlich unterhalb BG, wie schon im Jahr 2021. In beiden Jahren reichten nur die Werte an MEF und MWF sowie 2023 an AWL knapp über die damalige BG 0,020 mg/kg TN rund. Die vergleichsweise höchste Spannweite zeigten die Antimonwerte in Grünkohl 2018, analog Aluminium (Bild 3.2-1; vgl. Kapitel. 3.1). In 2024 wurde auch für Grünkohl die BG auf 0,0040 mg/kg TM gesenkt und Antimon konnte sämtlich gefunden werden.

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Für Graskultur konnte noch kein OmH ermittelt werden, da mehr als 75% der zu betrachtenden Werte unterhalb BG lagen. Ab 2025 wird voraussichtlich die Möglichkeit bestehen mit einer ausreichenden Anzahl Hintergrundwerte oberhalb BG einen aktuellen OmH (ab 2022) zu bilden und damit Immissionseinflüsse zu Antimon bewerten zu können.

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).

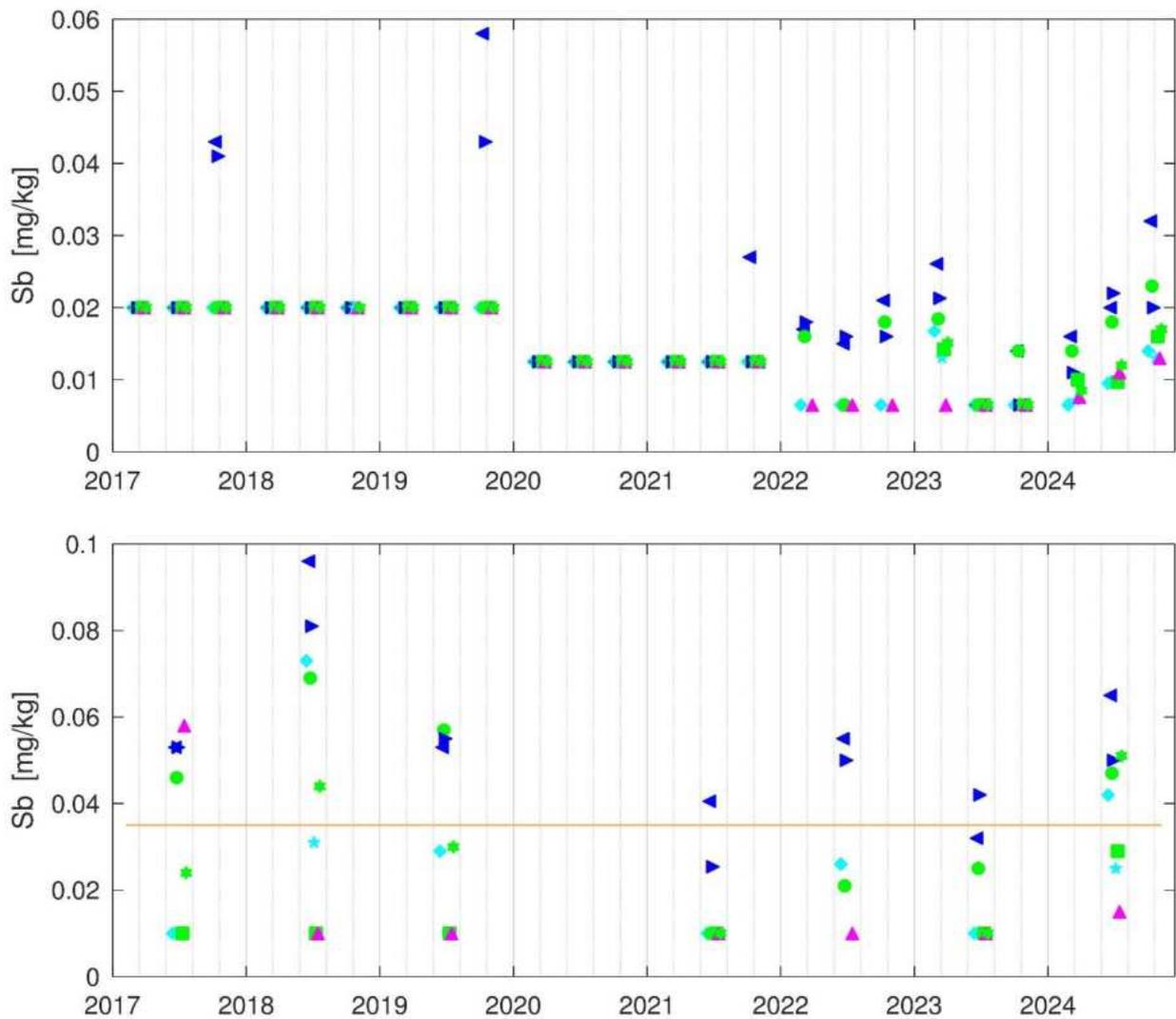
Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2024 (in 2020 wurden keine Metalle bestimmt) vorliegenden 53 Werten traten 12 OmH-Überschreitungen auf: 2017 an den Messpunkten BIS, MEF und MWF, 2018 an AWL, FMF, MEF und MWF, 2019 an AWL, MEF und MWF, sowie 2022 und 2024 an MWF (Tabelle 3.2-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet 2017–2024 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>	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	>75% Werte <BG	-									
Grünkohl	0,035	-	6–7	1	5	2	3	0	0	1	0

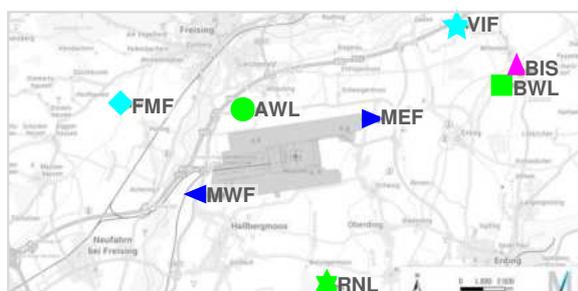
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Bild 3.2-1 unten zeigt, dass in Grünkohl 2023 wie 2021 keine Antimongehalte oberhalb OmH auftraten, da die Maxima abzüglich Standardunsicherheit unterhalb OmH lagen und in diesen beiden Jahren kein Immissionseinfluss vorlag.



**Bild 3.2-1: Antimonengehalte in Graskultur (oben) und in Grünkohl 2017–2024**

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 bis 2022 lediglich 13 von 135 Werten oberhalb den BGs 0,040 / 0,020 / 0,013 mg/kg TM lagen, in 2024 hingegen alle 24 Werte oberhalb BG 0,0040 mg/kg TM; 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]

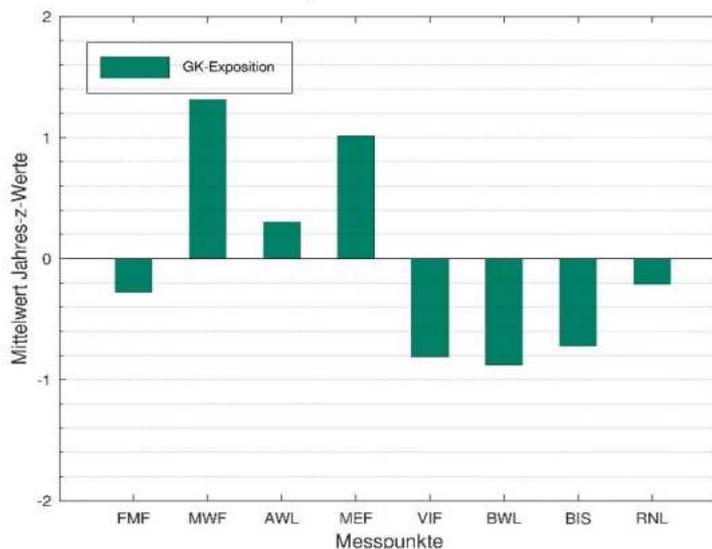
Ein Einfluss des Flughafenbetriebs, der aus dem Gleichlauf von Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen 2021 gegenüber 2017–2019 und dem Anstieg der Flugzahlen ab 2022 hervorgeht, wird

durch die Grünkohl-Ergebnisse seitdem nicht erkennbar. Hier wie insbesondere für Graskultur gilt es die künftige Entwicklung zu beobachten, nachdem die Bestimmungsgrenze für Antimon in 2024 deutlich weiter abgesenkt werden konnte.

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

Aus Bild 3.2-1 wird ersichtlich, dass in Graskulturen Antimongehalte oberhalb der Bestimmungsgrenze vornehmlich an den Flughafen betriebsnahen Messpunkten MWF, MEF und am landwirtschaftlich geprägten Messpunkt AWL auftraten. Ein relativer Messpunktvergleich mittels Z-Mittelwerten für Graskultur wurde nicht durchgeführt, da insgesamt noch 75 % der Messergebnisse im Betrachtungszeitraum unterhalb BG lagen.

Für die mehrheitlich über BG liegenden Messwerte für Grünkohl ist in Bild 3.2-2 ein relativer Messpunktvergleich anhand normierter Z-Werte (vgl. Kap 2.6) dargestellt, der die jährlichen Schwankungen eliminiert und Streuungen wie beispielsweise 2018 relativiert (vgl. Bild 3.2-1):



**Bild 3.2-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Antimon in Grünkohl 2017–2019 und 2021–2024**

Positive, überdurchschnittliche Werte (rund 1) traten an MWF und MEF auf, sehr schwach positiv auch an AWL.

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

Tendenziell korrespondieren diese Beobachtungen mit den Messungen für Graskultur.

Die Messpunktastufungen könnten auf Bremsabrieb und Aufwirbelung von antimonhaltigen Stäuben von Straßen und versiegelten Oberflächen im Flughafen-Nahbereich hinweisen (ähnlich wie im Graskultur-Biomonitoring des Bayerischen Landesamts für Umwelt; BayLfU 2019).

### 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 2022a und 2023a, BayLfU 2022):

- <0,013–0,065 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2024;
- <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 2017–2024 mehrheitlich analytisch bestimmbar (BG 0,005 mg/kg TM bis 2019 und 0,0025 mg/kg TM ab 2020).

Die Bismutgehalte in Graskultur lagen 2024 mit <0,0025–0,0054 mg/kg TM in noch engerem Bereich als in den Vorjahren. Allerdings wurde ein hoher Einzelwert in der 3. Serie an Messpunkt MWF gemessen und durch Nachanalyse bestätigt. Er ist in der Höhe vergleichbar mit den beiden Maxima 2019 am Messpunkt MEF mit 0,047 und 0,035 mg/kg TM (Bild 3.3-1 oben).

Die Bismutgehalte in Grünkohl 2024 mit 0,008–0,043 mg/kg TM überschritten sich mit den niedrigen Bereichen der Jahre 2017 und 2022 (Bild 3.3-1 unten). Sie zeigten aber eine höhere Spannweite, analog zu den Bismutwerten 2018, die bis 0,055 mg/kg TM reichten.

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,0073 mg/kg TM, der für Grünkohl 0,023 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 181 Graskulturwerten wurden 15 OmH-Überschreitungen festgestellt: an AWL nur 2 Mal und VIF 1 Mal, an MWF und MEF bei rund einem Viertel der Messungen (Tabelle 3.3-1).

Bei den 53 Grünkohlwerten 2017–2019 und 2021–2024 trat je 1 OmH-Überschreitung an MEF (2018) und MWF (2024) auf.

Folglich lagen im Untersuchungsgebiet 2017–2024 an MEF und MWF vereinzelt schwache Immissionseinflüsse für Bismut vor, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss.

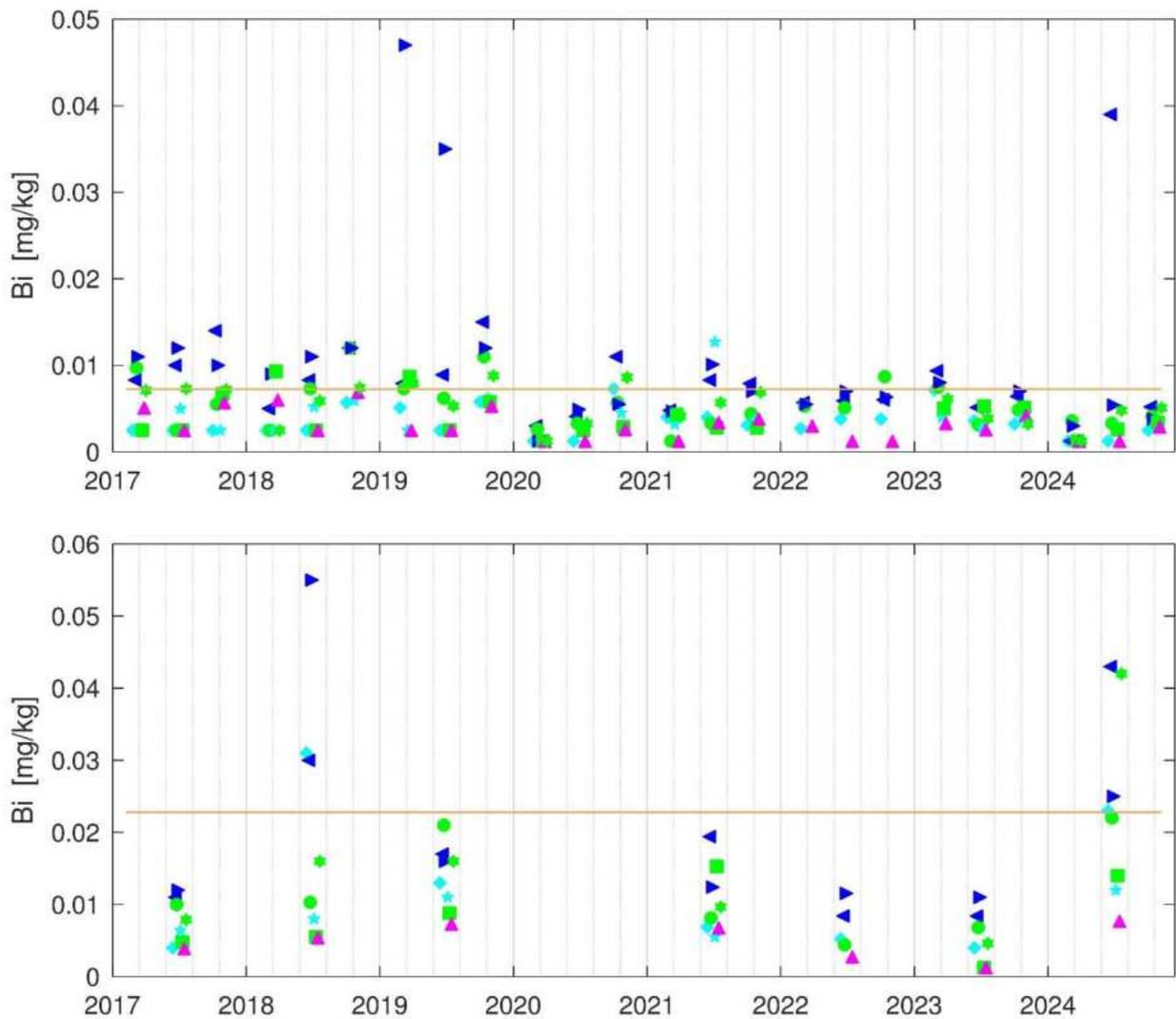
**Tabelle 3.3-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Bismut zu den Messpunkten**

Bismut	OmH [mg/kg TM]	Standardunsicherheit <i>u</i>	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	0,0073	-	20-24	0	5	2	7	1	0	0	0
Grünkohl	0,023	-	6–7	0	1	0	1	0	0	0	0

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

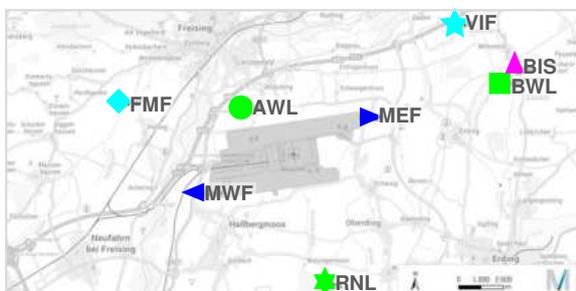
Eine vergleichsweise höhere Spannweite zeigten die Bismutgehalte in Grünkohl 2018 und 2024 – analog den Aluminium- und Antimongehalten (Kapitel 3.1 und 3.2).

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 Graskulturergebnisse 2024 wie 2023 und 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) 2017–2024**

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).



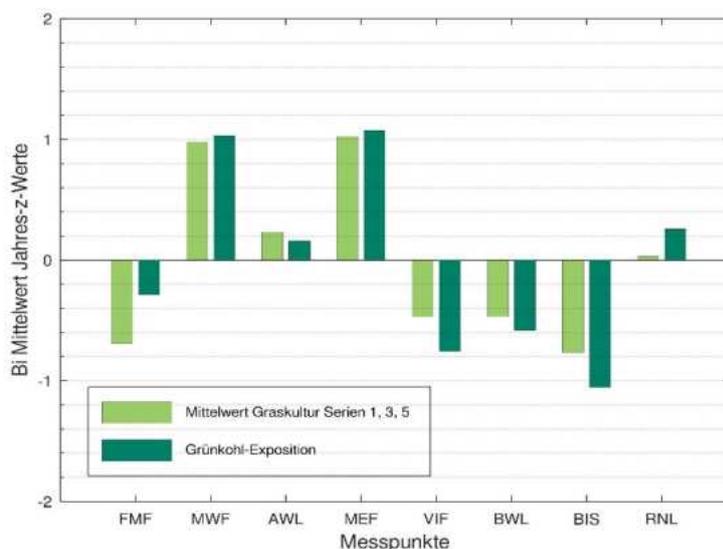
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (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. 2017–2024 veranschaulicht:



**Bild 3.3-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Bismut 2017–2024**

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 und VIF naturnah sowie BWL, landwirtschaftlich geprägt, 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:

Für den OmH für Graskultur von 0,0073 mg/kg TM liegen keine Vergleichs-OmH vor. Der Mittelwert für das Untersuchungsgebiet um den Flughafen München ohne betriebsnahe Messpunkte MEF und MWF lag aktuell mit 0,0026 mg/kg TM tendenziell unter dem mittleren quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern um 0,0037 mg/kg TM 2012–2021 (BayLfU 2022).

Der für Bismut in Grünkohl ermittelte OmH von 0,023 mg/kg TM entspricht in etwa dem überregionalen OmH 0,030 mg/kg TM (VDI 3957/3).

#### 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 2022a). Nach Recherche des BayLfU (2019) kann es auch aus Bremsabrieb und Motorverschleiß stammen.

Blei war 2017–2023 in den Gras- und Grünkohlproben mehrheitlich analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM) und 2024 bei deutlich abgesenkter Bestimmungsgrenze (0,0025 mg/kg TM) stets. Die Bleigehalte in Graskultur lagen 2024 mit 0,029–0,14 mg/kg TM im Bereich der Vorjahreswerte <0,050–0,34 mg/kg TM (Bild 3.4-1; Maximum 2023 in der 1. Serie an MEF).

Die Bleigehalte in Grünkohl lagen 2024 bei 0,043–0,12 mg/kg TM. In 2023 hatten sie unterhalb BG (<0,050 mg/kg TM) gelegen, ähnlich 2021 (nur 2 Messwerte: 0,055 mg/kg TM an MEF und 0,067 mg/kg TM an MWF). Eine höhere Spannweite hatten die Bleigehalte in Grünkohl 2018 gezeigt, analog Aluminium, Antimon und Bismut (Bild 3.1-1, Bild 3.2-1, Bild 3.3-1; vgl. Kapitel 3.1 bis 3.3): bis 0,055 mg/kg TM.

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,14 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  15 %. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 0,12 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 2017–2024 im Untersuchungsgebiet ermittelten 181 Werten überschritten 15 den OmH: in 2017 in der 1. Serie an allen 8 Messpunkten und in der 3. Serie an MWF und RNL, in 2019 in der 5. Serie an MEF, MWF und RNL, 2022 in der 3. Serie an MWF und 2023 in der 1. Serie an MEF. Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2024 vorliegenden 53 Werten trat 1 OmH-Überschreitung auf: 2018 am Messpunkt MEF (Tabelle 3.4-1). Folglich lagen im Untersuchungsgebiet an MWF und MEF allenfalls schwache und an RNL temporär schwache, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Blei vor.

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

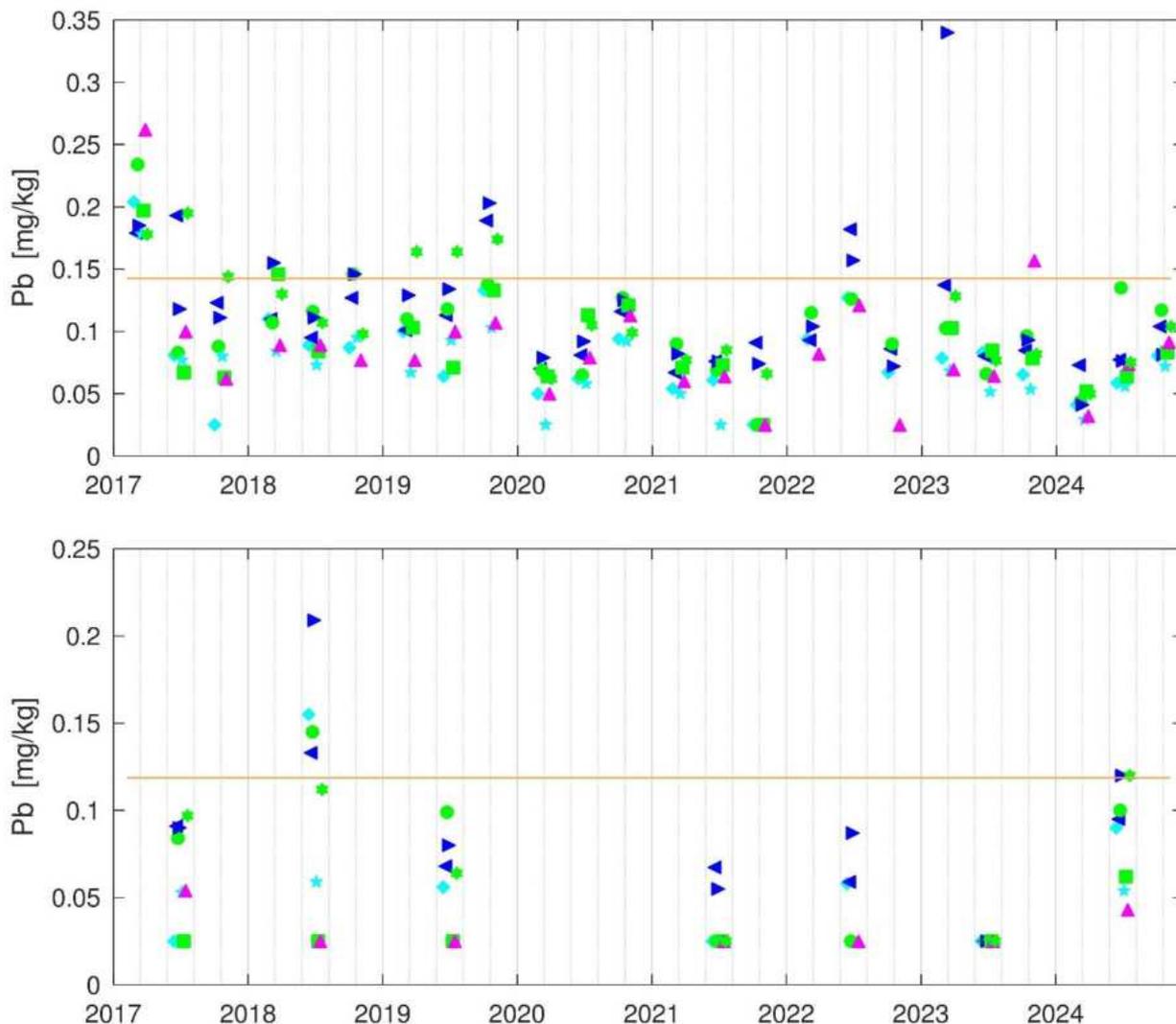
Blei	OmH [mg/kg TM]	Standardunsicherheit $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	0,14	15 %	20-24	1	4	1	3	1	1	1	3
Grünkohl	0,12	-	6-7	0	0	0	1	0	0	0	0

#### 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 Graskultur 2017 und in Grünkohl 2018 – letztere analog den Aluminium-, Antimon- und Bismutgehalten (Kapitel 3.1 und 3.2, 3.3).

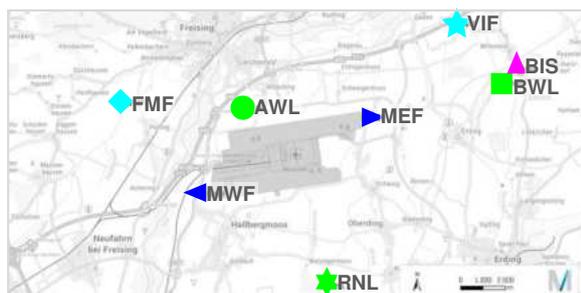
In den Coronajahren 2020 und 2021 traten keine Werte oberhalb OmH auf. Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzah-

len korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden allerdings nicht deutlich, da bei angestiegenen Flugzahlen teilweise noch niedrigere Bleigehalte gemessen wurden: 2023 in Graskultur Serie 2 und 2024 in Serie 1 und 3 sowie in Grünkohl 2023.



**Bild 3.4-1: Bleigehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024**

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

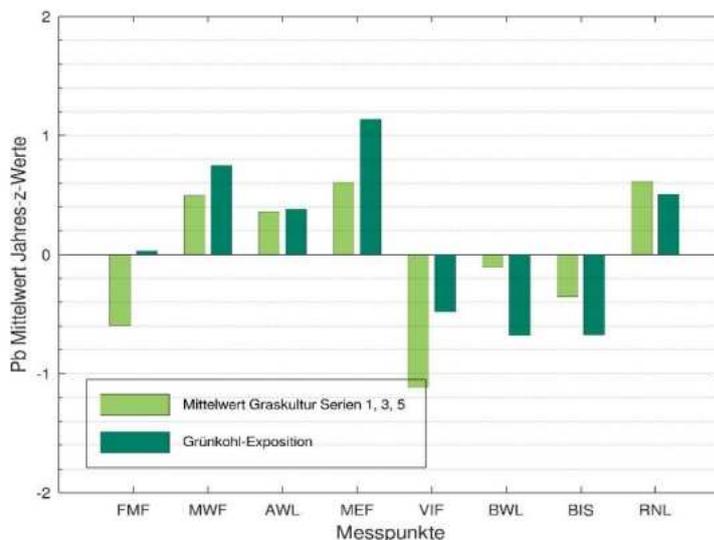
▲ (magenta) BIS innerorts im Siedlungsbereich

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

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

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

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.



**Bild 3.4-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Blei 2017–2024**

Betriebsnah am Flughafen an MWF und MEF, zudem an RNL und ebenfalls, aber schwächer an AWL als landwirtschaftlichen Messpunkten, traten überdurchschnittliche Werte auf.

Mit Ausnahme von FMF korrespondieren die Beobachtungen im Messpunktvergleich tendenziell für Graskultur und Grünkohl gut miteinander.

An den Messpunkten MWF und MEF betriebsnah am Flughafen 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, ähnlich zu Aluminium Kapitel 3.1).

Dieses Ergebnis 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 0,14 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 0,12 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 2017–2024 liegen eher niedrig, im unteren Bereich von Hintergrund und Wertespannen aktueller Graskultur-Biomonitorings (Wäber und Pompe 2022a und 2023a, BayLfU 2022):

- 0,029–0,34 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2024;
- 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 (2024) definiert Maximale Immissions-Werte als langfristige Empfehlungswerte. Deren Spanne in Rinderfuttermitteln reicht von 0,8 bis 3 mg/kg und in Schaffuttermitteln von 1,5 bis 2 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 0,9 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) 2023/915): 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 2024) wird Chrom (Cr) überwiegend im Transport, vor allem im Straßenverkehr freigesetzt – wie Antimon aus Bremsbelägen (Peichtl 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 2017–2024 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (Bestimmungsgrenze BG bis 2023: 0,025 mg/kg TM, ab 2024: 0,012 mg/kg TM).

Die Chromgehalte in Graskultur lagen 2024 mit 0,084–0,37 mg/kg TM in einem engen Bereich, in der Höhe gut vergleichbar mit 2023 und 2022 (0,13–0,40 mg/kg TM und 0,21–0,36 mg/kg TM). Die Chromgehalte seit 2017 umfassen 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.

Die Chromgehalte in Grünkohl lagen 2024 mit 0,19–0,44 mg/kg TM im oberen Bereich der Werte seit 2017 von 0,069–0,44 mg/kg TM (2020 keine Messung; Bild 3.5-1 unten).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 0,37 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  22 %.

Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 0,39 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 181 Werten auf: in der 1. Serie 2019 an Messpunkt MWF der Maximalwert 1,78 mg/kg TM.

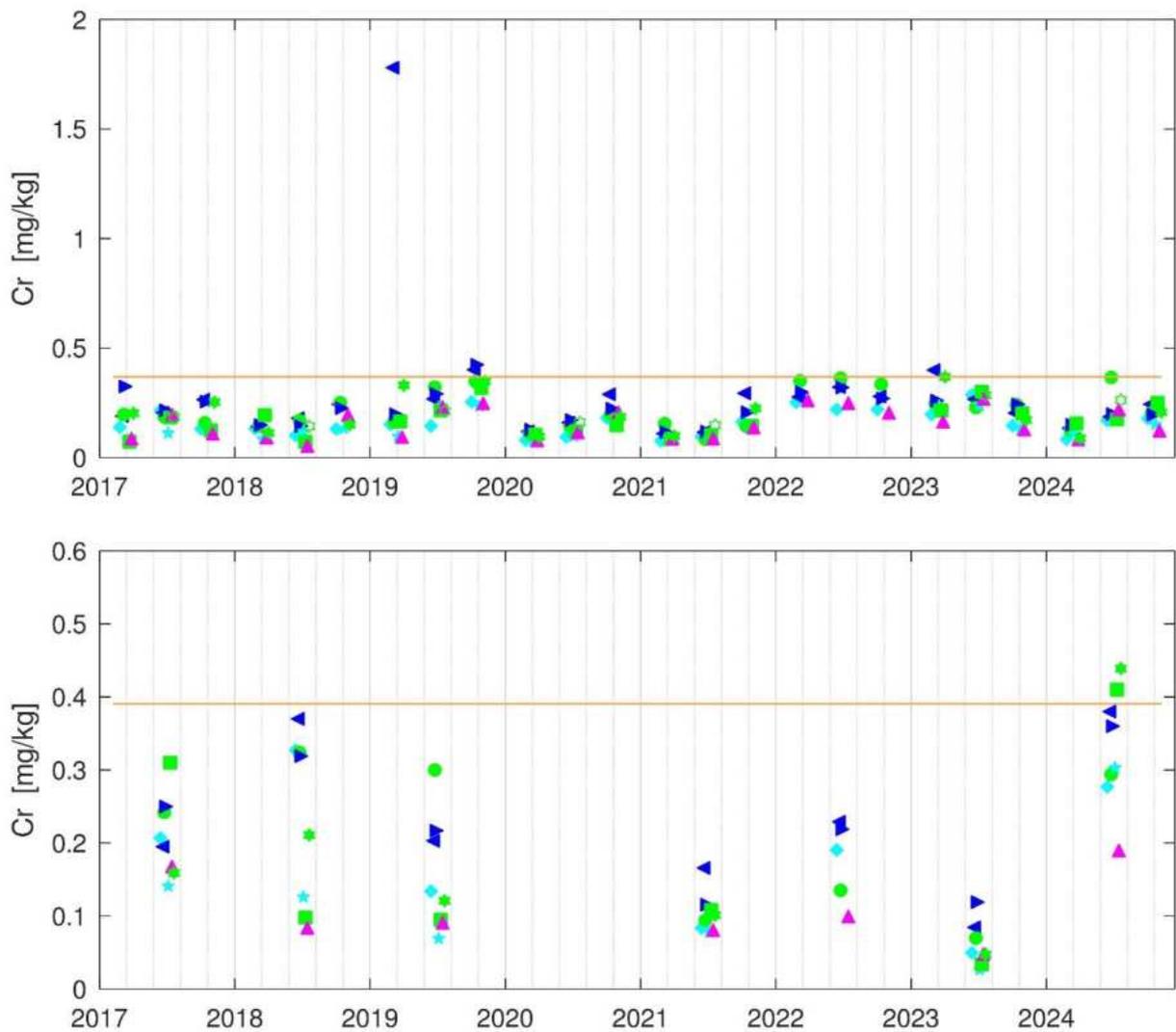
Für 53 Grünkohlwerte trat 2017–2019 und 2021–2024 keine OmH-Überschreitung auf (Tabelle 3.5-1). Folglich lag im Untersuchungsgebiet kein relevanter Immissionseinfluss für Chrom vor.

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

Chrom	OmH [mg/kg TM]	Standardunsicherheit $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	0,37	22 %	20-24	0	1	0	0	0	0	0	0
Grünkohl	0,39	-	6-7	0	0	0	0	0	0	0	0

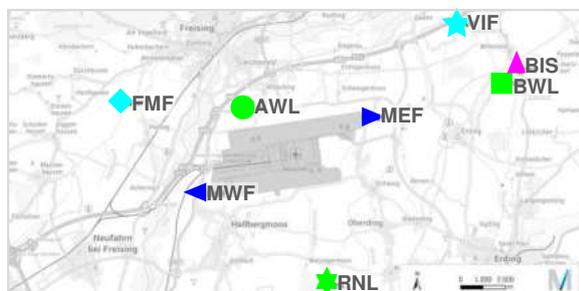
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

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 2018-2021 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 2024 lagen die Chromgehalte in Graskulturen in den 3 Serien in etwa gleichauf, ähnlich 2027 und 2022. In 2023 zeigten sich wieder saisonale Unterschiede, allerdings andersartige: tendenziell niedrigste Werte in Serie 3.



**Bild 3.5-1: Chromgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024**

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).



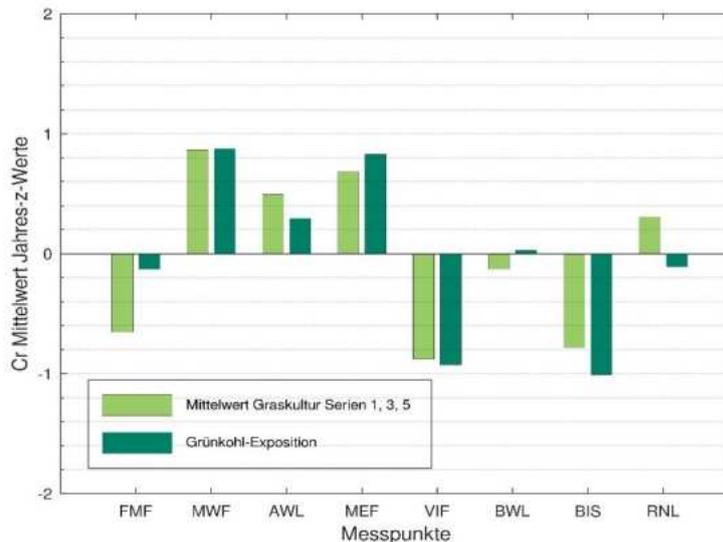
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (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 seit 2022 korrespondieren würde, deutete sich für die flughafennahen Messpunkte MWF und MEF bis 2022 an (blaue Symbole in Bild 1.3-1). Der Verlauf der ergebnisse 2023 und 2024 bestätigt dies nicht. Die weitere Entwicklung gilt es zu beobachten.

### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:



**Bild 3.5-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Chrom 2017–2024**

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 überdurchschnittliche Werte (0,5 – 1) auf, zudem sehr schwach 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.

Mit Ausnahme von RNL korrespondieren die Beobachtungen im Messpunktvergleich tendenziell für Graskultur und Grünkohl gut miteinander.

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 0,37 mg/kg TM ist niedriger als der überregionale OmH 0,51 mg/kg TM (VDI 3857/2).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 0,39 mg/kg TM entspricht in etwa dem überregionalen OmH 0,46 mg/kg TM (VDI 3957/3).

Hintergrundbereich und Wertebereich im Umfeld des Flughafens München 2017-2024 liegen im Bereich aktueller Graskultur-Biomonitorings (Wäber und Pompe 2022a und 2023a, BayLfU 2022):

- 0,054–0,42 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2024 (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 2017–2024 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,25 mg/kg TM bis 2023, 0,15 mg/kg TM ab 2024).

Die Eisengehalte in Graskultur lagen 2024 mit 35–122 mg/kg TM im Bereich aller Vorjahreswerte von 40–143 mg/kg TM (Bild 3.6-1 oben).

Die Eisengehalte in Grünkohl lagen 2024 mit 44–101 mg/kg TM in einem niedrigen Bereich innerhalb der Werte seit 2017 von 18–237 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 104 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  16 %. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 172 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 2017–2024 im Untersuchungsgebiet insgesamt 173 Werten (1. Serie 2019 keine Eisenanalysen) wurden 3 OmH-Überschreitungen festgestellt: in den jeweils 5. Serien 2017 und 2019 sowie in der 1. Serie 2023 am Messpunkt RNL.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2024 vorliegenden 53 Werten trat eine OmH-Überschreitung auf: 2017 an Messpunkt AWL (Tabelle 3.6-1).

Folglich lagen im Untersuchungsgebiet an RNL temporär schwache, ansonsten keine relevanten Immissionseinflüsse für Eisen vor.

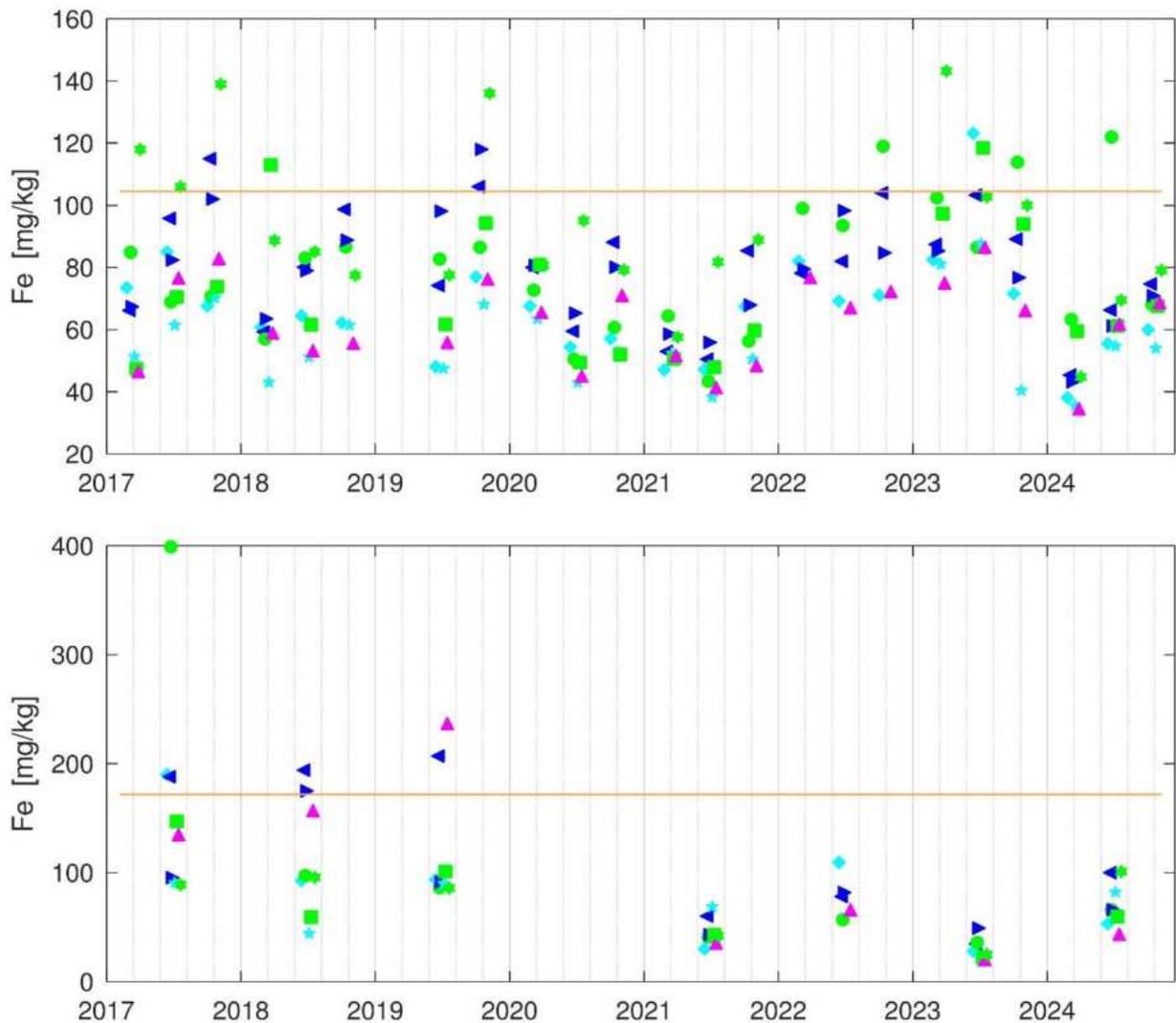
**Tabelle 3.6-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Eisen zu den Messpunkten**

Eisen	OmH [mg/kg TM]	Standardunsicherheit $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	104	16 %	19-23	0	0	0	0	0	0	0	3
Grünkohl	172	-	6-7	0	0	1	0	0	0	0	0

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

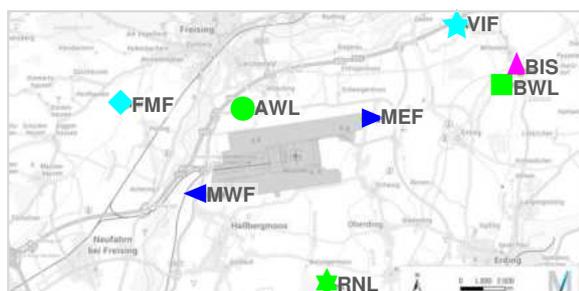
Ähnlich zu Aluminium (Kapitel 3.1) schwanken auch die Wertekollektive von Eisen in Graskultur und Grünkohl von Expositionsserie zu Expositionsserie unterschiedlich stark und weisen unterschiedlich hohe Streuungen auf. Die Bioindikatoren integrieren die Witterungseinflüsse, die auch auf die Vegetation 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). 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. Im Jahre 2023 weitete sich die Graskultur-Wertespanne

auf das Niveau vor 2020. Für Grünkohl lagen seit 2021 mit rund 20–100 mg/kg TM niedrige enge Wertekollektive vor (Bild 3.6-1 unten). 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, da der Wiederanstieg der Flugzahlen bis 2024 auf 79 % der Vor-Coronajahre von den Eisengehalten nicht nachvollzogen wird. Die künftige Entwicklung bleibt zu beobachten.



**Bild 3.6-1: Eisengehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024**

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).

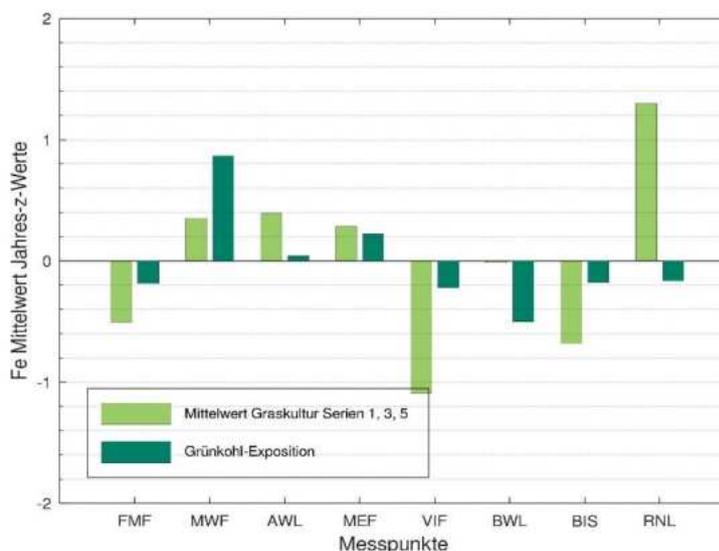


Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (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]

### Messpunktstabufung 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 2017–2024 veranschaulicht (Bild 3.6-2). An RNL als flughafenfernem, landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt traten für Graskultur deutlich (über 1) überdurchschnittliche Werte auf. An MWF, betriebsnah am Flughafen, traten für Graskultur sehr schwach (rund 0,4) überdurchschnittliche Werte auf, für Grünkohl überdurchschnittliche Werte (knapp 1).



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

Unterschiede zwischen Gras- und Grünkohlgergebnissen könnten durch unterschiedliche Einflussfaktoren, z. B. Aufnahme aus dem Substrat, bedingt sein.

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

**Bild 3.6-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Eisen 2017–2024**

### 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 104 mg/kg TM stimmt sowohl mit dem überregionalen OmH 103 mg/kg TM überein (VDI 3857/2), als auch mit dem aktuellen OmH für den quellenfernen ländlichen Hintergrund 84 mg/kg TM relativ gut (BayLfU 2022a).

Der für Grünkohl ermittelte OmH von 172 mg/kg TM stimmt ebenfalls gut mit dem überregionalen OmH 154 mg/kg TM (VDI 3957/3) überein.

Der Hintergrundbereich im Umfeld des Flughafens München für Graskultur 2017-2024 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.

- 35–143 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2024;
- 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 2024). 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 nicht mehr mit Graskultur untersucht.

Kupfer war 2017–2024 in allen Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,050 mg/kg TM).

Die Kupfergehalte in Grünkohl lagen 2024 mit 0,85–2,2 mg/kg TM im unteren Bereich der Vorjahreswerte 0,38–4,3 mg/kg (Bild 3.9-1).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 2,7 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 Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2024 vorliegenden 53 Werten trat eine OmH-Überschreitung auf: 2018 an Messpunkt MWF (Tabelle 3.7-1).

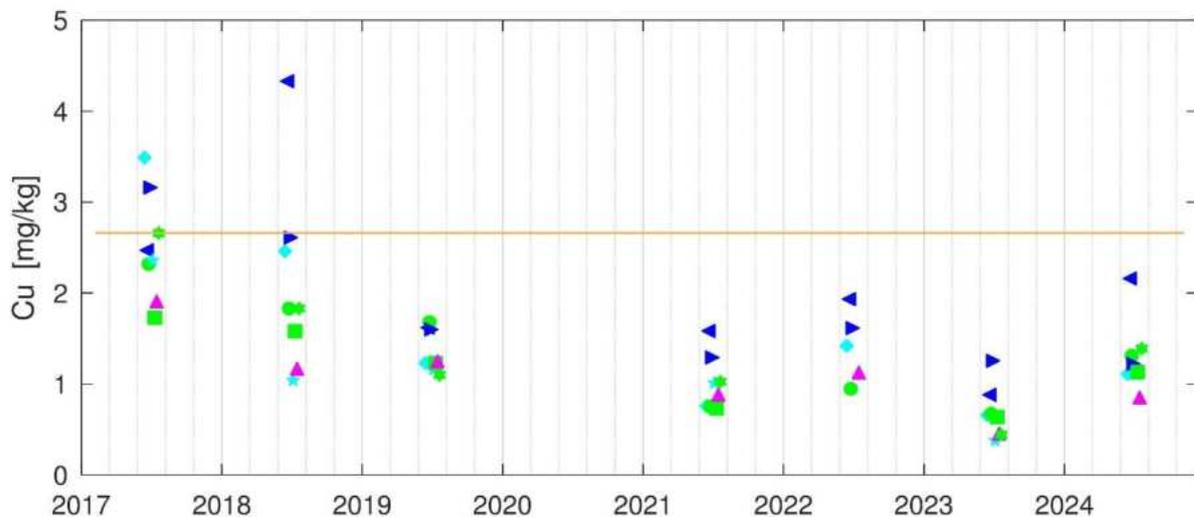
Folglich lagen im Untersuchungsgebiet an MWF temporär schwache, ansonsten kein relevanter Immissionseinfluss für Kupfer vor.

**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	2,7	-	6–7	0	1	0	0	0	0	0	0

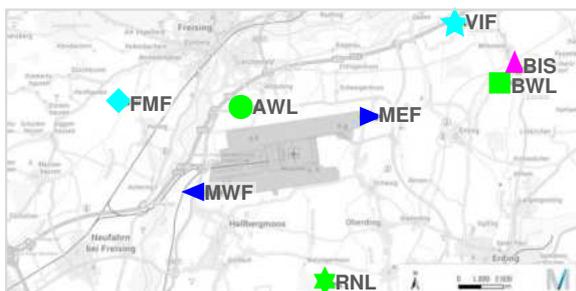
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

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 Wertebereiche seit 2019 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 und dem Wiederanstieg danach korrespondieren würde (Bild 1.3-1), somit auf den Flughafenbetrieb als Quelle hindeuten würde, wird nicht erkennbar.



**Bild 3.7-1: Kupfergehalte in Grünkohl 2017–2019 und 2021 bis 2024**

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]

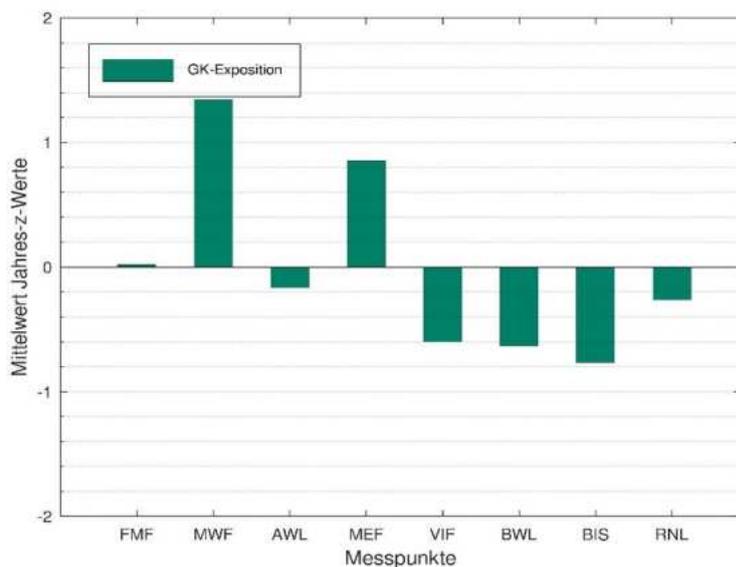
### Messpunktastufung und Quellenzuordnung:

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

Obwohl die Kupfergehalte in Grünkohl unterhalb der Schwelle für Immissionseinflüsse lagen (mit einer Ausnahme, 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 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 Quelleneinflüsse 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 in Grünkohl 2017–2019 und 2021–2024**

#### Vergleichende Einordnung der Wirkungssituation:

Der für Kupfer in Grünkohl ermittelte OmH von 2,7 mg/kg TM liegt geringfügig niedriger als der überregionale OmH 3,8 mg/kg TM (VDI 3957/3; Tabelle 2.6-1 und Tabelle 3.7-1). 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 wegen seiner Struktur Schmiermittel zur Herstellung in der Luft- und Raumfahrt verwendet (<https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/molybdaen/>, Quelle im Internet, 16.02.2025). Zusammen mit Antimon, Barium, Bismut, Blei, Kupfer und Zinn ist es in hohen Konzentrationen in Bremsbelägen enthalten (BayLfU 2017). Molybdän ist ein essenzielles Spurenelement, aber in zu hohen Konzentrationen kann es z. B. toxische Wirkungen bewirken (VDI 2310/37: für Rinder).

Molybdän war 2017–2024 in allen Gras- und Grünkohlproben analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM und ab 2024 deutlich abgesenkt auf 0,007 mg/kg TM).

Die Molybdängehalte in Graskultur lagen 2024 mit 0,26–0,69 mg/kg TM nochmals niedriger als 2023 mit 0,57–1,4 mg/kg TM (Bild 3.8-1 oben).

Die Molybdängehalte in Grünkohl 2024 waren mit 2,4–7,1 mg/kg TM im Bereich der Werte seit 2017 von 0,32–11,7 mg/kg TM gelegen (2020 keine Messung; Bild 3.8-1 unten).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 3,2 mg/kg TM. Der für Grünkohl ermittelte OmH beträgt 7,8 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 2017–2024 im Untersuchungsgebiet insgesamt 181 Werten wurde keine OmH-Überschreitung ermittelt.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2022 vorliegenden 53 Werten trat ebenfalls keine Überschreitung des aktuell fortgeschriebenen OmH auf (Tabelle 3.8-1).

Folglich lag im Untersuchungsgebiet kein Immissionseinfluss für Molybdän vor.

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

Molybdän	OmH [mg/kg TM]	Standardunsicherheit $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	3,2	-	20-24	0	0	0	0	0	0	0	0
Grünkohl	7,8	-	6-7	0	0	0	0	0	0	0	0

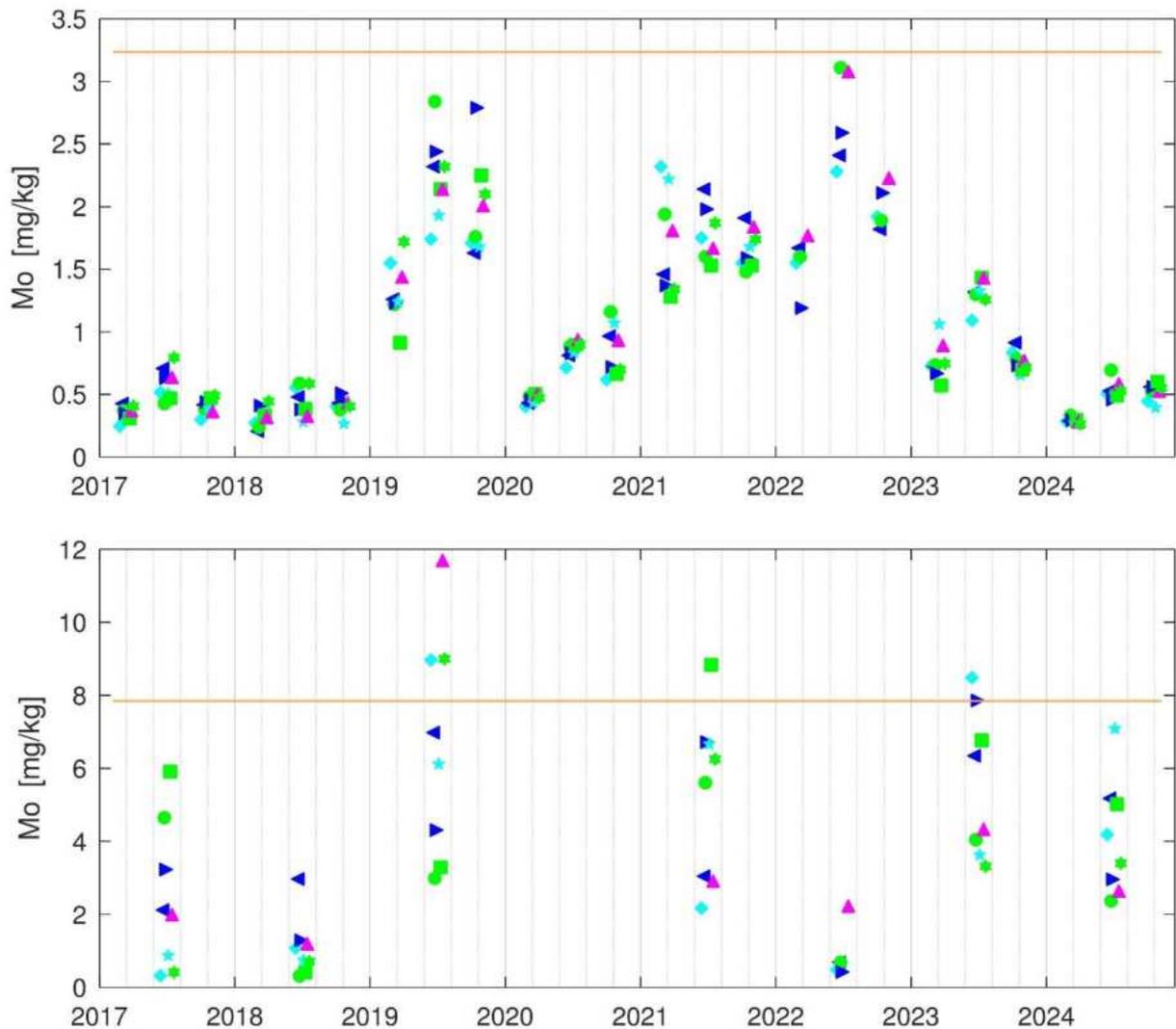
#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

Die Wertekollektive von Molybdän in Graskultur und Grünkohl schwanken von Messjahr zu Messjahr. Als Ursache kommen Verfahreseinflüsse 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 zeitliche Verlauf der Molybdängehalte in Graskultur hatte sich z. B. 2023 anders dargestellt als für die meisten anderen Metalle: In der 3. Serie 2023 waren vergleichsweise höchste Gehalte gemessen worden, was Regen in der letzten Expositionswoche begünstigt haben könnten - durch Durchfeuchtung, die die Aufnahme aus dem Substrat steigert<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Bei Molybdän verhält es sich umgekehrt zu anderen Metallen: Bei hohen pH-Werten im Boden ist die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit groß, bei niedrigen pH-Werten vermindert (mündliche Mitteilung T. Ebert, LfL Bayern).

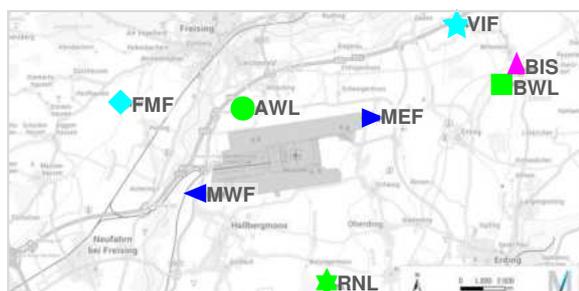
In 2024 lag der Wertebereich in Graskultur ebenso eng und niedrig wie 2017 und 2018. Der Wertebereich in Grünkohl wies 2024 wie 2023 eine moderate Weite auf, während er 2018 und 2022 relativ eng und niedrig lag.

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) 2017–2024**

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).



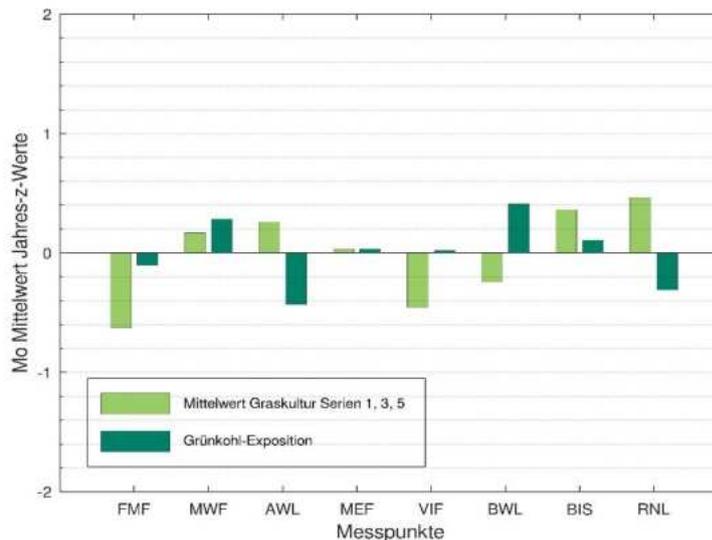
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (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 2017–2024**

Durch den relativen Messpunktvergleich werden für Molybdän lediglich sehr schwach überdurchschnittliche Werte (knapp 0,5) 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 Vergleichs-OmH für Graskultur):

Der aktuell für Grünkohl ermittelte OmH von 7,8 mg/kg TM liegt höher als der überregionale OmH 4,0 mg/kg TM (VDI 3957/3). Der OmH wird von der Spannweite der Werte an den Hintergrundmesspunkte beeinflusst (2017, 2028, 2022 niedrig und eng, 2023 und 2024 höher und weiter, einen Anstieg des OmH seit 2022 bedingend: 4,9 -> 6,6 -> 7,8 mg/kg TM)

Die Wirkungssituation im Untersuchungsgebiet kann insofern als unauffällig bewertet werden, als aus dem relativen Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten (Bild 3.8-2) für Molybdän keine Abstufung und keine Quellenhinweise deutlich 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 mit maximal 2,4 mg/kg TM als Jahresmittelwert (2022 an BIS) 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 2024) – 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 leicht 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 nicht mehr mit Grünkohl untersucht.

Nickel war 2017–2024 in allen Grasproben analytisch bestimmbar (BG: 0,10 und 0,025 mg/kg TM bis 2023, 0,015 mg/kg TM ab 2024 ).

Die Nickelgehalte in Graskultur lagen 2024 mit 1,2–2,4 mg/kg TM sehr ähnlich zu 2023, 2022 und 2021, eher im unteren Bereich der Nickelwerte davor: 1,2–8,3 mg/kg TM (Bild 3.9-1).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte OmH beträgt 5,1 mg/kg TM und die Standardunsicherheit  $u$  14 %.

Bei den für Graskultur 2017–2024 insgesamt 181 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 $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	5,1	15 %	20-24	1	1	1	0	0	1	1	0

#### Zeitliche Entwicklung der Wirkungssituation

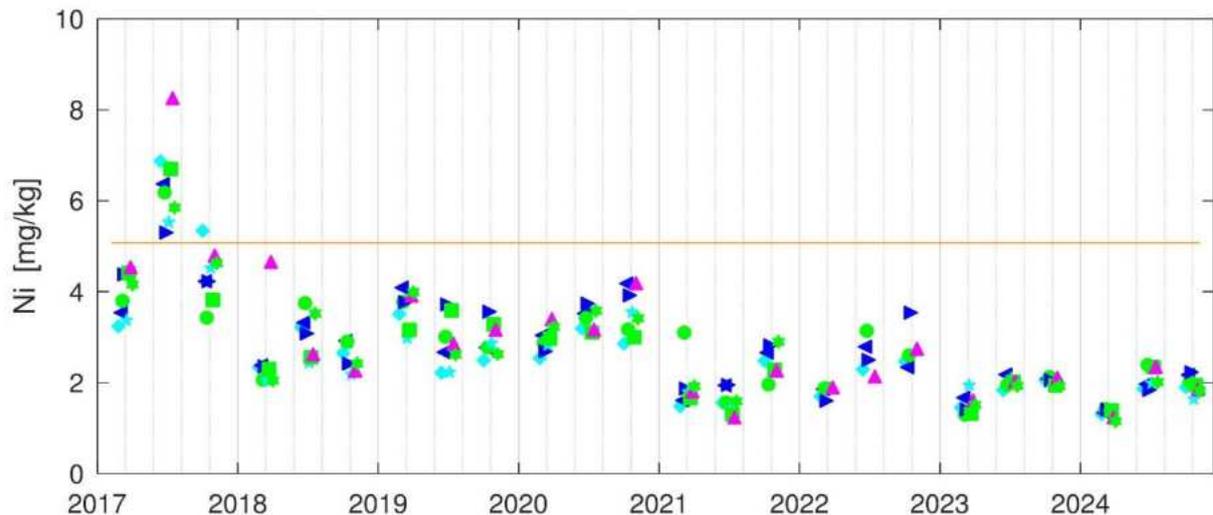
Das Biomonitoring von Nickel ist relevant, weil es in hohen Konzentrationen umweltschädlich wirken kann und der Flughafenbetrieb eine potenzielle Quelle darstellt. Der Gehalt von Nickel in der Graskultur kann allerdings auch durch die Aufnahme über das Substrat beeinflusst werden (VDI 3857/2), was bei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

In Bild 3.9-1 wird ersichtlich, dass Schwankungen auftreten, die beeinflusst sein könnten:

- durch das Substrat: Wertebereiche bis 2020 rund 2-8 mg/kg TM, ab 2021 rund 1,2-3,5 mg/kg TM;
- durch Witterungseinflüsse zwischen Serien: 2017 Serien 1 und 5 mit rund 3-5 mg/kg TM, Serie 3 mit rund 5-8 mg/kg TM, oder ab 2020 Anstiege von Serie 1 bis 5, allerdings nur geringfügig.

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 von rund 70 % des Vor-Corona-Niveaus auf 2024 rund 80 % korrespondieren würde (Bild 1.3-1), wird nicht erkennbar.



**Bild 3.9-1: Nickelgehalte in Graskultur 2017–2024**

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).



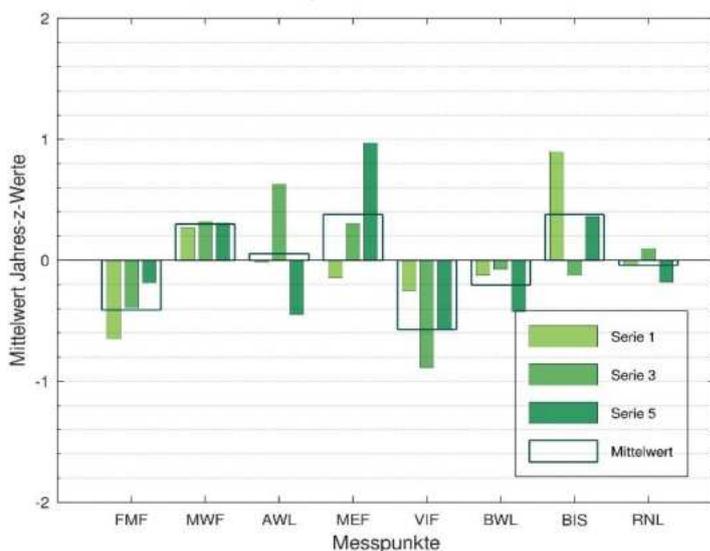
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆★ (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]

### Messpunktstabufung 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.

An BIS, innerorts, traten in der 1. Serie Graskultur (Mai) vergleichsweise überdurchschnittliche Werte auf. Im Mittel sind die Werte an BIS aber sehr schwach überdurchschnittlich (0,4).



**Bild 3.9-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Nickel in Graskultur 2017–2024**

An MEF als betriebsnahen Messpunkt des Flughafens lagen die Nickelwerte ebenfalls nur sehr schwach (0,4) über dem Durchschnitt, am zweiten betriebsnahen Messpunkt MWF noch schwächer (Bild 3.9-2).

An VIF, naturnah, waren die Werte schwach unterdurchschnittlich (-0,6), naturnah an FMF noch schwächer.

Somit liegt für Nickel keine deutliche Abstufung von betriebsnahen Messpunkten anderen Messpunkten vor.

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 5,1 mg/kg TM stimmt sowohl mit dem überregionalen OmH 5,7 mg/kg TM der Richtlinie VDI 3857 Blatt 2 gut überein, als auch mit dem aktuellen OmH für den quellenfernen ländlichen Hintergrund 5,4 mg/kg TM (BayLfU 2022a; Tabelle 2.6-1).

Der Wertebereich im Umfeld des Flughafens München 2017-2024 ist mit anderen Graskultur-Biomonitorings gut vergleichbar (Wäber und Pompe 2022a und 2023a, BayLfU 2022):

- 1,2–5,3 mg/kg TM im Umfeld des Flughafens München 2017–2024 (ausgenommen, weil höher, die 3. Serie 2017 mit 5,3–8,3 mg/kg TM);
- 1,4–4,4 mg/kg TM im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022;
- 1,7–3,2 mg/kg TM 2022 und 3,8–7,4 mg/kg TM 2013 und 2015 im Umfeld des Flughafens Berlin Brandenburg BER;
- 2,9+/-0,7 mg/kg TM bis 4,9+/-0,7 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 mg/kg bezogen auf 88 % TM (VDI 2310/30). Der Beurteilungswert von 57 mg/kg umgerechnet auf 100% TM wurde von den Graskultur-Mittelwerten 2017–2024 weit 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 2017–2024 in den Grasproben mehrheitlich analytisch bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM bis 2019, 0,025 mg/kg TM 2020–2023, 0,007 mg/kg ab 2024). In Grünkohl war es ebenfalls mehrheitlich bestimmbar (BG: 0,05 mg/kg TM bis 2018, 0,010 mg/kg TM 2019–2023, 0,007 mg/kg ab 2024). Die Vanadiumgehalte in Graskultur lagen 2024 mit 0,025–0,22 mg/kg TM im Bereich der Werte der Vorjahre: <0,025–0,23 mg/kg TM. Tendenziell höher lagen die Vanadiumgehalte in Graskultur der 5. Serie 2019 und 1. Serie 2022 (Bild 3.10-1 oben) – analog zu 2019 Aluminium und Chrom (Kapitel 3.1 und 3.5). Die Vanadiumgehalte in Grünkohl lagen 2024 mit 0,042–0,12 mg/kg TM im unteren Bereich der Werte seit 2017 von 0,011–0,12 mg/kg TM. Die Werte 2018 und 2019 hatten eine höhere Spannweite gezeigt (2020 keine Messung; Bild 3.10-1 unten), wie Aluminium, Antimon, Bismut und Blei (vgl. Kap. 3.1 bis 3.4).

#### Identifikation von Immissionseinflüssen

Der für Graskultur ermittelte, OmH beträgt 0,17 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 181 Werten für Graskultur im Untersuchungsgebiet 2017–2024 wurden 9 OmH-Überschreitungen festgestellt: 5mal am Messpunkt RNL in 1. und 5. Serie 2017, in der 1. und 5. Serie 2019, und in der 1. Serie 2023, sowie je 1mal an FMF und MEF, zweimal an AWL.

Bei den für Grünkohl aus den Jahren 2017–2019 und 2021–2024 vorliegenden 53 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 an AWL 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 $u$	Werte pro Messpunkt	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
Graskultur	0,17	20 %	20-24	1	0	2	1	0	0	0	5
Grünkohl	0,056	-	6-7	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.

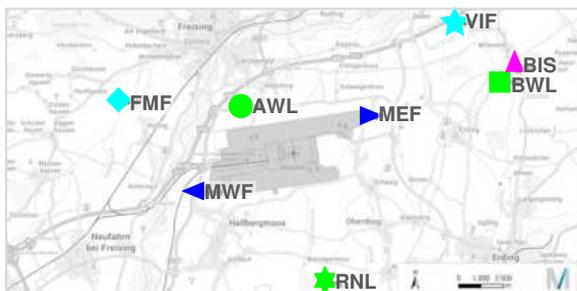
Die Vanadiumgehalte lagen in den Coronajahren, aber auch im aktuellen Messjahr, eher in engen und niedrigen Bereichen. Ein Einfluss des Flughafenbetriebs und eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen korrespondieren würde (Bild 1.3-1), werden nicht

deutlich. Vielmehr deuten die Maxima in Graskulturen an landwirtschaftlich geprägten Messpunkten - jeweils Ende April bis Ende Mai (1. Serie) und Mitte August bis Anfang September (5. Serie) auf saisonale Effekte hin: Staubverwehungen von offenen Äckern (noch geringe Pflanzendecke bzw. abgeerntet).



**Bild 3.10-1: Vanadiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024**

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).



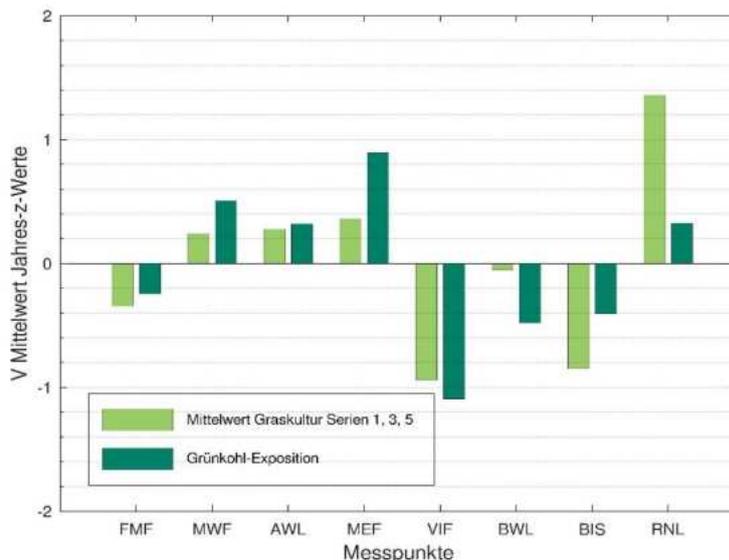
Erläuterung der Messpunkt-Symbole:

- ◆ ★ (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 2017–2024**

Für Graskultur traten an RNL als flughafenfernem, landwirtschaftlich geprägten Messpunkt deutlich positive ( $>1$ ), Vanadiumwerte auf, an MEF, Flughafen betriebsnah, allenfalls sehr schwach überdurchschnittliche Werte (knapp 0,4; Bild 3.10-2).

Für Grünkohl traten an MEF und MWF als betriebsnahen Messpunkten am Flughafen überdurchschnittliche Werte auf: schwach an MWF (rund 0,5), deutlicher an MEF (rund 1).

An BWL, landwirtschaftlich geprägt, für Grünkohl, an BIS, innerorts, für Graskultur, sowie an VIF, naturnah, für beide Bioindikatoren traten unterdurchschnittliche Werte auf.

Die Beobachtungen im Messpunktvergleich korrespondieren tendenziell für Graskultur und Grünkohl gut miteinander.

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 0,15 mg/kg TM höher als der aktuelle OmH 0,091 mg/kg TM für den quellenfernen ländlichen Hintergrund in Bayern (BayLfU 2022a), aber übereinstimmend mit 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 2017-2024 nimmt eine weitere Wertespanne ein, als die Ergebnisse des Biomonitorings an quellenfernen Hintergrundmesspunkten in Bayern (BayLfU 2022)

- $<0,025$ – $0,18$  mg/kg TM, als Bereich unterhalb OmH-Überschreitung im Umfeld des Flughafens München 2017–2024;

- 0,031+/-0,029 mg/kg TM bis 0,048+/-0,012 mg/kg TM als Mittelwerte ländlicher Hintergrundmesspunkte in Bayern 2017-2021; dort reichen Einzelwerte nicht über rund 0,1 mg/kg TM.

### **Beurteilung hinsichtlich einer Gefährdung**

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

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: der maximale Vanadium-Jahresmittelwert (2019 an RNL) bei 0,21 mg/kg TM.

### 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, während der Heizperiode.

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 2017–2024 in Graskulturen nur Benzo[k]fluoranthen (in 2 von 182 Fällen), Dibenzo[ah]anthracen (in 177 von 182 Fällen) und Indenopyren (in 3 von 182 Fällen) unterhalb der Bestimmungsgrenze 0,10 µg/kg TM.

In den Grünkohlproben lag lediglich Dibenzo[ah]anthracen in 13 von 61 Fällen unterhalb BG.

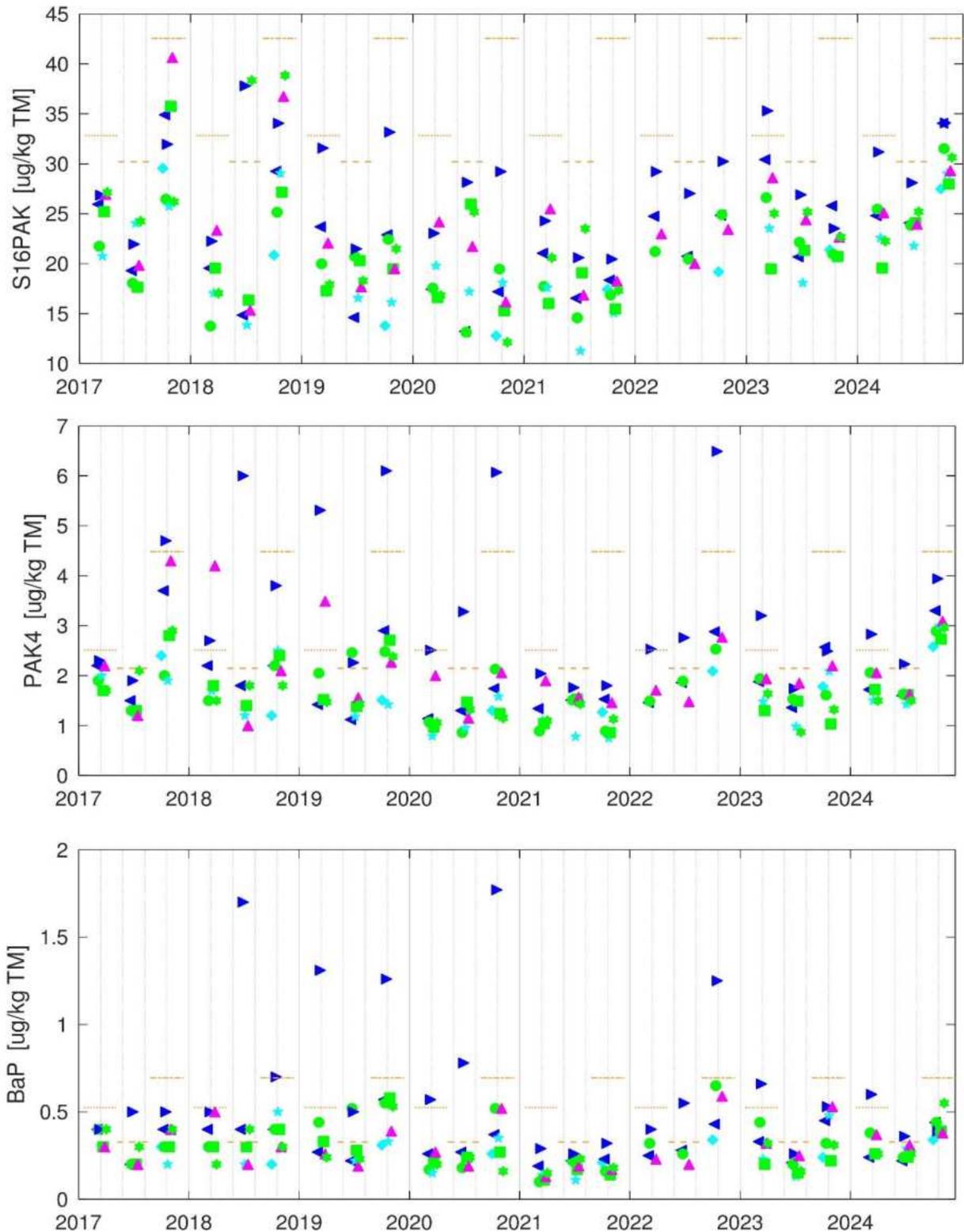
Diese Ergebnisse gingen mit 0,050 µg/kg TM in die Summen der 16 PAK und 12 PAK ein. Lagen Benzo[a]pyren, Benzo[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthen und Chrysen <BG, gingen sie mit Null in PAK4 ein.

**Die Summen der 16 PAK (S16PAK** als Kurzbezeichnung) in Graskultur (Bild 3.11-1 nachfolgende Seite oben) lagen bei 20–34 µg/kg TM, im Bereich der Vorjahre (10–40 µg/kg TM). In der jeweils 5. Serie 2017 und 2018 hatten sie vergleichsweise weitere, höhere Bereiche eingenommen: rund 20–40 µg/kg TM. Die S16PAK-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 übernächste Seite oben) waren 2017 bis 2022 bei rund 80–170 µg/kg TM gelegen, davon abgesetzt vergleichsweise höhere Werte an BIS innerorts mit rund 170–260 µg/kg TM. Im Jahr 2023 hatten die Summen der 16 PAK in einem engen, sehr niedrigen Bereich von 41–62 µg/kg TM gelegen. Im aktuellen Berichtsjahr war der Bereich ebenfalls eng, aber höher mit 88–116 µg/kg TM.

Die Ergebnisse für die **schwerer flüchtigen 12 PAK** fielen ähnlich aus (S12PAK als Kurzbezeichnung, ohne grafische Darstellung): In Graskultur lagen die Gehalte mehrheitlich im Bereich von rund 5–26 µg/kg TM, nur in der 5. Serie 2017 nahmen sie einen weiten Bereich bis rund 35 µg/kg TM ein.

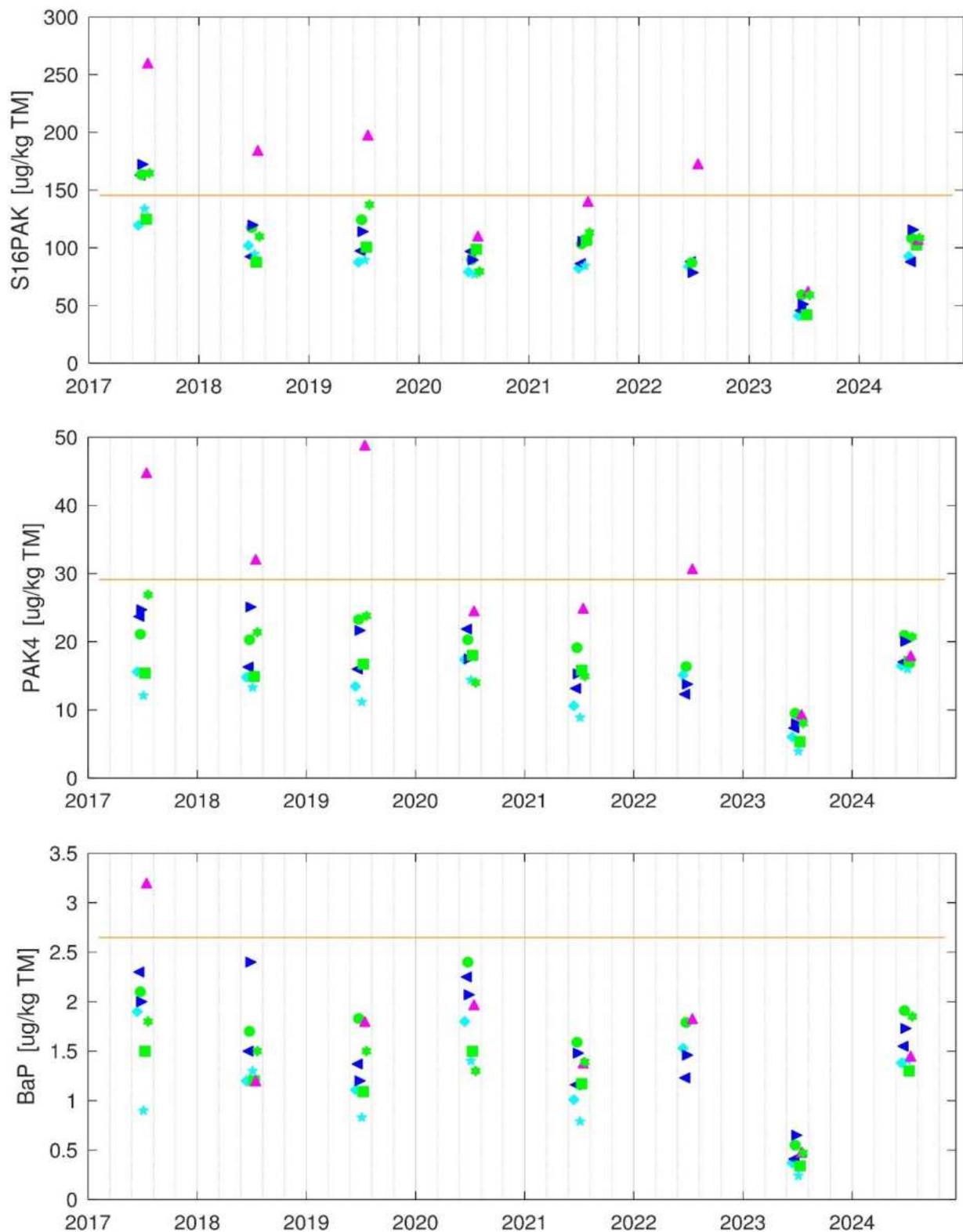
In Grünkohl waren die Wertebereiche 2018–2022 ähnlich, mit jeweils unterschiedlich weit davon abgesetzten Maxima an Messpunkt BIS. Wie für S16PAK traten 2017 tendenziell höhere S12PAK-Gehalte in Grünkohl im Untersuchungsgebiet auf. In 2023 waren die Werte in engem, niedrigen im Bereich von 31–52 µg/kg TM gelegen, in 2024 in engem, normalen Bereich von 73–97 µg/kg TM (unterhalb OmH 130 µg/kg TM vgl. Tabelle 2.6-1) – ohne dass sich Messpunkt BIS davon absetzte.

**Die PAK4-Gehalte** in Graskultur (Bild 3.11-1 nachfolgende Seite Mitte) lagen 2024 wie in den Vorjahren mehrheitlich im Bereich von rund 1–3 µg/kg TM. In der 5. Serie 2017 war die Wertespanne mit 2–5 µg/kg TM insgesamt weiter. Davon abgesetzt lagen 2018–2024, nicht aber in 2020 die Maxima an Messpunkt MEF mit bis 6,5 µg/kg TM höher. Vereinzelt waren auch die PAK-Gehalte an MWF und BIS höher. Die PAK4-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 übernächste Seite Mitte) lagen 2017–2022 in vergleichbaren Wertebereichen von rund 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. Im Jahr 2023 waren die die PAK4 am niedrigsten mit 3,9–9,5 µg/kg TM gelegen, in 2024 wieder bei um 20 µg/kg TM – in beiden Jahren ohne von den anderen Messpunkten abgesetztes Maximum an BIS.



**Bild 3.11-1: PAK-Gehalte in Graskultur 2017–2024**

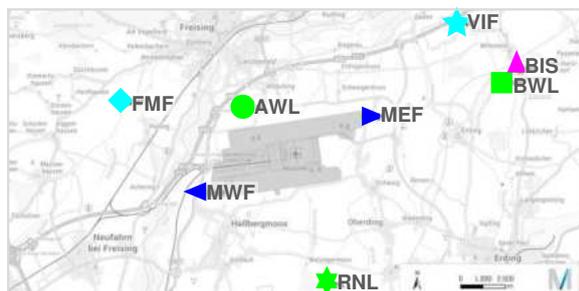
Summen 16 PAK (S16PAK oben), PAK4 (Mitte) und Benzp[a]pyren (BaP, unten) in der Umgebung des Flughafens München im Vergleich mit dem Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH: blassorange Linie); OmH für Serie1–3: gepunktete Linie, für Serie 4: gestrichelte Linie, für Serie 5: Punkt-Strich-Linie



**Bild 3.11-2: PAK-Gehalte in Grünkohl 2017–2024**

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 nachfolgende Karte 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]

**Benzo[a]pyren (BaP)** in Graskultur (Bild 3.11-1 vor-vorangegangene Seite unten) lag im gesamten Betrachtungszeitraum 2017–2024 in einem engen Wertebereich von rund 0,1–0,6 µg/kg TM – zumeist mit, wie bei PAK4, abgesetzten Maxima an Messpunkt MEF mit rund 0,6–1,8 µg/kg TM (nicht 2017, 2021). Die BaP-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 vorangegangene Seite unten) nahmen 2017–2024 vergleichbare Wertebereiche ein: 0,8–2,4 µg/kg TM. Nur im Jahr 2017 war BaP an Messpunkt BIS von den anderen Messpunkten abgesetzt höher: 3,2 µg/kg TM. Im Jahr 2023 lag der BaP-Wertebereich mit 0,24–0,65 µg/kg TM am niedrigsten.

### Identifikation von Immissionseinflüssen

Die vorangegangenen beiden Bildseiten stellen die Summen 16 PAK (S16PAK, jeweils oben), PAK4 (jeweils Mitte) und Benzp[a]pyren (BaP, jeweils unten) im Vergleich mit dem jeweiligen Orientierungswert für den maximalen Hintergrundgehalt (OmH) 2017–2024 dar (Bild 3.11-1 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 Graskultur 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.

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 2017–2024 insgesamt 5mal überschritten. Der OmH für Serie 5 wurde an MEF 3mal überschritten – 2019, 2020 und 2022.

Für Graskultur 2017–2024 traten also im Untersuchungsgebiet nur OmH-Überschreitungen für PAK4 und BaP auf: für PAK4 einmal an BIS und in 3 von insgesamt 24 betrachteten Fällen an MEF für BaP einmal an AWL und in 9 von 24 Fällen an MEF.

Folglich lagen am Messpunkt MEF für Graskultur schwache Immissionseinflüsse PAK4 und BaP vor.

Die für Grünkohl ermittelten OmH betragen 145 µg/kg TM für S16PAK, 130 µg/kg TM für S12PAK und 29 µg/kg TM für PAK4 und wurden – unter Berücksichtigung der jeweiligen, aus Richtlinie VDI 3957/3 entnommenen Standardunsicherheit – 1 Mal für PAK4 und jeweils 3 Mal von 16PAK und 12PAK von je 8 Messungen am Messpunkt BIS überschritten. Der OmH für Benzo[a]pyren von 2,6 µg/kg TM wurde von keinem Messwert in Grünkohl abzüglich  $u$  18% überschritten.

Somit lagen am Messpunkt BIS für Grünkohl schwache Immissionseinflüsse 16 PAK und 12PAK vor, ansonsten 2017–2024 keine relevanten Immissionseinflüsse für PAK.

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

Graskultur S1–3 / 4 / 5	OmH [µg/kg TM] (Standardunsicherheit: -)	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
S16PAK	33 / 30 / 43	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	24 / 23 / 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	2,5 / 2,1 / 4,5	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	1 / 2 / 0	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	1 / 0 / 0	0 / 0 / 0
BaP	0,53 / 0,33 / 0,70	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	0 / 1 / 0	1 / 5 / 3	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0
Grünkohl	OmH [µg/kg TM] (Standardunsicherheit $u$ )	FMF	MWF	AWL	MEF	VIF	BWL	BIS	RNL
S16PAK	145 (20 %)	0	0	0	0	0	0	3	0
S12PAK	130 (21 %)	0	0	0	0	0	0	3	0
PAK4	29 (35 %)	0	0	0	0	0	0	1	0
BaP	2,6 (18 %)	0	0	0	0	0	0	0	0

Summen der 16 PAK und der schwerer flüchtigen 12 PAK: S16PAK und S12PAK als Kurzbezeichnungen; für Graskultur Serie 1-3, Serie 4, Serie 5 und für Grünkohl lagen jeweils 7-8 Werte pro Messpunkt vor; Für Messpunkt AWL stehen für die 4. Graskultur Serie 7 Werte zur Verfügung, 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

In Graskultur hatten **Summen der 16 PAK (S16PAK)** (Bild 3.11-1) 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) gezeigt. Hier könnte sich ein Zusammenhang mit dem zum Herbst hin überregional ansteigenden PAK-Hintergrund durch Hausbrand angedeutet haben. Ein saisonaler Verlauf war 2019 bis 2023 nicht mehr zu erkennen. Vielmehr lagen die S16PAK in Graskultur in einem relativ engen niedrigen Bereich bis 30 µg/kg TM, an MEF bis 35 µg/kg TM. Erst im aktuellen Berichtsjahr deutet sich erneut ein saisonaler Verlauf mit tendenziell niedrigeren Werten für Serien 1–3 und Serie 4 gegenüber Serie 5 im Frühherbst an.

Die **PAK4**-Gehalte in Graskultur (Bild 3.11-1 Mitte) hatten in den Jahren 2017, 2022 und 2024 einen tendenziell saisonalen Verlauf mit ansteigenden Werten Mitte August bis Mitte September (Serie 5) gegenüber dem Zeitraum Mai bis August gezeigt. Ansonsten waren die Hintergrundwerte – ohne MEF und teilweise BIS und MWF – in einem relativ engen niedrigen Bereich bis rund 2,5 µg/kg TM gelegen. Die PAK4-Gehalte an Messpunkt MEF waren mit bis 6,5 µg/kg TM temporär höher: in unterschiedlichen Graskultur-Serien und ohne einen zeitlichen Trend. Im zweiten Jahr der Coronapandemie 2021 waren sie an MEF im niedrigen Hintergrundbereich bis rund 2 µg/kg TM gelegen. Ähnlich niedrig waren aber auch

die PAK4-Gehalte in Graskultur-Serien 1-3 und 4 in 2017 ausgefallen. Dieses Ergebnis lässt sich nicht eindeutig 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 zur Deckung bringen. Im Jahr 2022 hatten die PAK4 in den Graskultur Serien 1–3 und 4 an MEF um 3 µg/kg TM und in Serie 5 bei 6,5 µg/kg TM gelegen, vergleichbar mit dem Jahr 2020. Im Jahr 2023 waren sie an MEF mit 1,7–3,2 µg/kg TM leicht niedriger, in 2024 wieder tendenziell höher mit 2-4 µg/kg TM.

Die **Benzo[a]pyren**-Gehalte in Graskultur (Bild 3.11-1 unten) deuteten bislang nur für 2022 einen saisonalen Verlauf an. Sie ließen keine zeitliche Entwicklung erkennen, die mit den Flugzahlen und deren drastischen Rückgang ab 2020 korrespondieren würden und dem Wiederanstieg ab 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 und nicht 2023 und 2024, bei vergleichsweise hohen Flugzahlen.

**In Grünkohl** hatten **S16PAK-Gehalte** eines Teils der Messpunkte im Untersuchungsgebiet in 2017 vergleichsweise höhere Werte als in den nachfolgenden Jahren gezeigt (Bild 3.11-2 oben). Die Werte in den Coronajahren 2020 und 2021 waren im Bereich der Werte 2018, 2019 sowie 2024 gelegen. Nur am Messpunkt BIS zeigte sich 2020 und schwach 2021 ein Rückgang der dortigen Maxima. In 2022 hatte sich für BIS innerorts wieder ein Maximum bei 173 µg/kg TM, vergleichbar mit den Maxima 2018 und 2019, und deutlich abgesetzt gegenüber den niedrigen S16PAK an den anderen Messpunkten, insbesondere dem Minimum an MEF. Im Jahr 2023 war ein noch niedrigerer Wertebereich von 41–62 µg/kg TM gemessen worden, der Messpunkt BIS einschloss. Im aktuellen Berichtsjahr, bei insgesamt höheren S16PAK-Werten als 2023, war der S16PAK-Gehalt an Messpunkt BIS nicht abgesetzt.

Die **PAK4**-Gehalte in Grünkohl (Bild 3.11-2 Mitte) lagen 2024 wie im Zeitraum 2017–2022 in vergleichbaren Wertebereichen von 9–27 µg/kg TM. Davon abgesetzt traten an BIS höhere PAK4-Werte von rund 25–50 µg/kg TM auf – Ausnahme 2024 mit PAK4-Gehalt an BIS innerhalb der übrigen Werte. Für das Jahr 2023 war der enge, besonders niedrige Wertebereich von rund 3,9–9,5 µg/kg TM an allen Messpunkten einschließlich BIS aufgefallen.

Die **Benzo[a]pyren**-Gehalte in Grünkohl ließen ebenfalls keinen zeitlichen Trend erkennen (Bild 3.11-2 unten). Vielmehr wiesen die Wertekollektive unterschiedlich hohe Streuungen auf. Anders als für S16PAK und PAK4 waren – außer im Jahr 2017 – kein BaP-Maxima an BIS aufgetreten. Wie für PAK4 fällt für BaP in 2023 der enge, besonders niedrige Wertebereich von 0,24–0,65 µg/kg TM auf.

Für die PAK, insbesondere in Grünkohl, hat die Hausbrandaktivität Bedeutung. Sie wird von der Witterung beeinflusst. Dies ließen bis 2022 die Maxima innerorts an BIS erkennen. Für das Jahr 2023, ohne dortiges Maximum mit insgesamt besonders niedrigen Werten, dürfte die vergleichsweise hohen Temperaturen während der Grünkohlexposition relevant gewesen sein. Aber auch im Jahr 2024 hob sich kein Maximum an BIS von den übrigen Messpunkten ab, obwohl Durchschnittstemperatur schon während der ersten Hälfte der Grünkohlexposition rund 3 °C niedriger als im Vorjahreszeitraum lag.

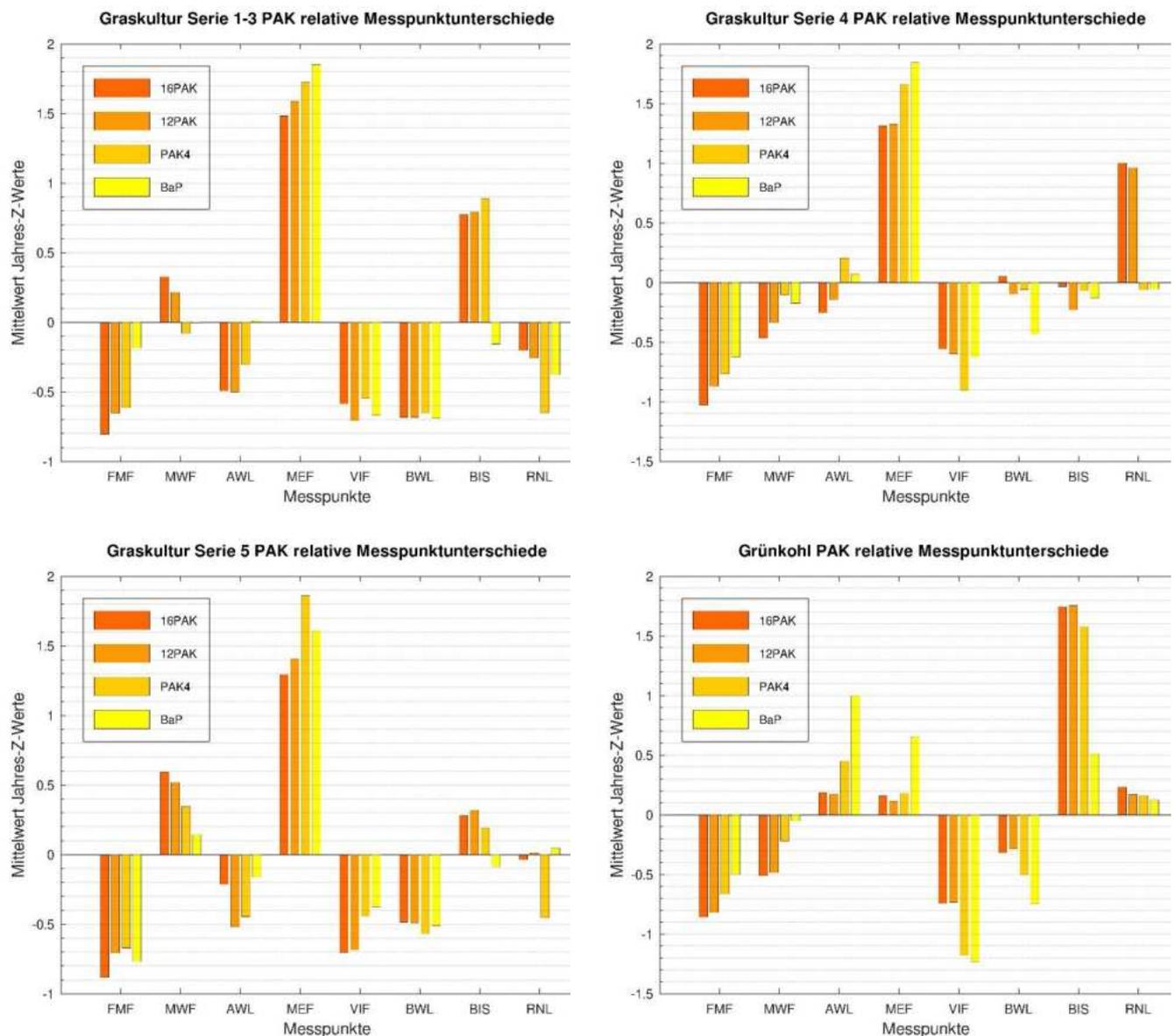
Eine zeitliche Entwicklung, die mit dem Flughafenbetrieb, den Flugzahlen und deren drastischen Rückgang ab 2020 korrespondieren würde (Bild 1.3-1), wurde für PAK nicht deutlich.

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

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

Für Graskultur Serie 1–3 Mai bis Mitte Juli (Bild 3.11-3, Bild links oben) traten an Messpunkt MEF betriebsnah am Flughafen für alle vier PAK-Parameter deutlich überdurchschnittliche Werte (um 1,5) auf – aber nicht an Messpunkt MWF. Für S16PAK, S12PAK und PAK4 traten überdurchschnittliche Werte (knapp 1) auch an Messpunkt BIS auf.

An den naturnahen Messpunkten FMF und VIF und den landwirtschaftlich geprägten Messpunkten AWL, BWL sowie für PAK4 und BaP an RNL traten für Serie 1–3 schwach unterdurchschnittliche Werte (-0,5 – -1) auf.



**Bild 3.11-3: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für PAK 2017–2024**

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, Mitte September – Anfang November):

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

Für Graskultur Serie 4 Ende Juli bis Mitte August (Bild 3.11-3, vorangegangene Seite, Bild rechts oben) blieb das Ergebnis am Messpunkt MEF gleich zu Serie 1-3: die vier PAK-Parameter, vor allem PAK4 und BaP, deutlich überdurchschnittlich (1,3–1,7). An BIS waren die Werte durchschnittlich, 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 schwach unterdurchschnittliche Werte für S16PAK und S12PAK (knapp -0,5), sowie die naturnahen Messpunkte FMF und VIF für alle vier Parameter (-0,5 – -1).

Für Graskultur Serie 5 Mitte August bis Mitte September (Bild 3.11-3, Bild links unten) ähnelt das Ergebnis stark dem für Graskultur Serie 1–3 im Mai: an MEF deutlich überdurchschnittliche Werte (1,3–1,7), während an MWF nur schwach und BIS nur sehr schwach überdurchschnittliche Werte für S16PAK und S12PAK auftraten (knapp 0,5). An den naturnahen Messpunkten FMF und VIF traten für die vier Parameter unterdurchschnittliche Werte auf (rund -0,5 – -1), an den landwirtschaftlich geprägten Messpunkten noch schwächer.

Für Grünkohl (Bild 3.11-3, Bild vorangegangene Seite rechts unten) zeigt sich ein von Graskultur abweichendes Bild:

An Messpunkt BIS innerorts traten für S16PAK, S12PAK und PAK4 deutlich überdurchschnittliche Werte auf (knapp 2). Für BaP traten an BIS wie an den Messpunkten AWL und MEF schwach überdurchschnittliche Werte (0,5–1) auf.

Am naturnahen Messpunkt VIF und schwächer an FMF traten für die vier PAK-Parameter in Grünkohl unterdurchschnittliche Werte (-0,5 – -1,3) auf, zudem, schwächer (rund -0,5) für PAK4 und BaP an BWL.

In Expositionsabschnitten, in denen witterungsbedingt häusliche Kleinf Feuerungsanlagen aktiv sind, und somit Hausbrand die maßgebliche Quelle von PAK darstellt – Graskultur Serien 1–3 ab Mai und Grünkohl, 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 Messpunkt abstufung 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). Allerdings war die Straße bei MEF in den letzten Jahren bis 2023 für den Durchgangsverkehr gesperrt (für landwirtschaftlichen und Bauverkehr frei).
- An MEF dürfte v.a. Flugbetrieb als Quelle zu den überdurchschnittlichen Werten beigetragen haben.

#### **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 32 / 29 / 38 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 24 / 22 / 30 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 / 4,0 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 0,53 / 0,32 / 0,79 µg/kg TM gegenüber den Vergleichs-OmH von 1,8 / 0,8 / 2,1 µg/kg TM (vgl. Tabelle 2.6-1).

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 157 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH 330 µg/kg TM,
- für S12PAK OmH hier im Untersuchungsgebiet 140 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 304 µg/kg TM,
- für PAK4 OmH hier im Untersuchungsgebiet 29 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 63 µg/kg TM,
- für BaP OmH hier im Untersuchungsgebiet 2,6 µg/kg TM gegenüber Vergleichs-OmH von 4,6 µg/kg TM (vgl. Tabelle 2.6-1).

Die Wertebereiche der PAK im Umfeld des Flughafens München 2017–2024 sind mit anderen aktuellen Graskultur-Biomonitorings gut vergleichbar (Wäber und Pompe 2023a und 2022a, BayLfU 2022):

- rund 10–40 µg/kg TM S16PAK, rund 1–6,5 µg/kg TM PAK4 und rund 0,1–1,8 µg/kg TM BaP im Umfeld des Flughafens München 2017–2024;
- 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 und 2022.

Die PAK-Wertebereiche in Grünkohl 2017–2024 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 und Pompe 2022a, BayLfU 2017):

- 41–260 µg/kg TM S16PAK, rund 4–50 µg/kg TM PAK4 und 0,24–3,2 µg/kg TM BaP im Umfeld des Flughafens München 2017–2024;
- 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 2017–2024 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). Seit Verordnung (EU) 2015/1933 sind Höchstgehalte für trockene pflanzliche Lebens- und Nahrungsergänzungsmittel, wie für Bananenchips und getrocknete Kräuter und Gewürze, festgelegt (VO 2023/915). 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 mit den Gehalten in Graskultur – rund 1–7 µg/kg TM PAK4 und 0,1–1,8 µg/kg BaP –
- und mit den Gehalten in Grünkohl – rund 4–50 µg/kg TM PAK4 und 0,24–3,2 µg/kg TM BaP –

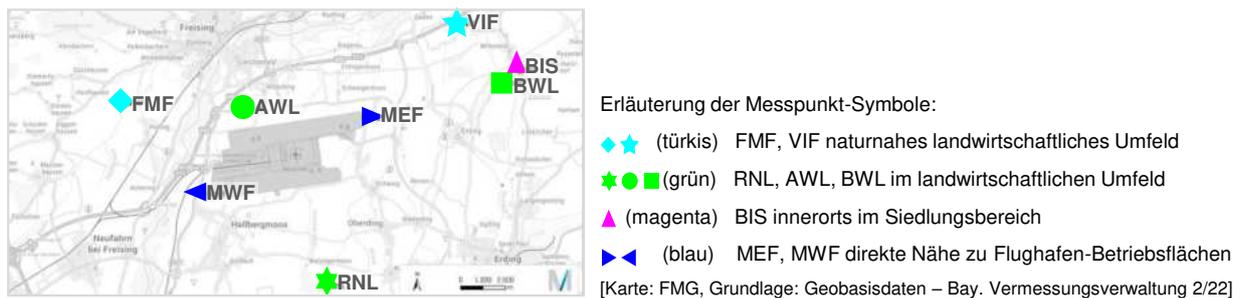
bestätigt, dass die Ergebnisse 2017–2024 insgesamt nicht hoch waren. Hier ist zu berücksichtigen dass:

- die Bioindikatoren Graskultur und Grünkohl ungewaschen und nicht verzehrfertig aufbereitet analysiert werden, zudem
- jede Pflanzenart individuelle Anreicherungseigenschaften besitzt,
- somit diese Beurteilung ist nur orientierend zu sehen ist.

Von einer Gefährdung hinsichtlich PAK war im Jahr 2024, wie in den Vorjahren, an keinem der Messpunkte auszugehen.

## 4 Messergebnisse 2024

Die Darstellung der Messwerte 2024 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**

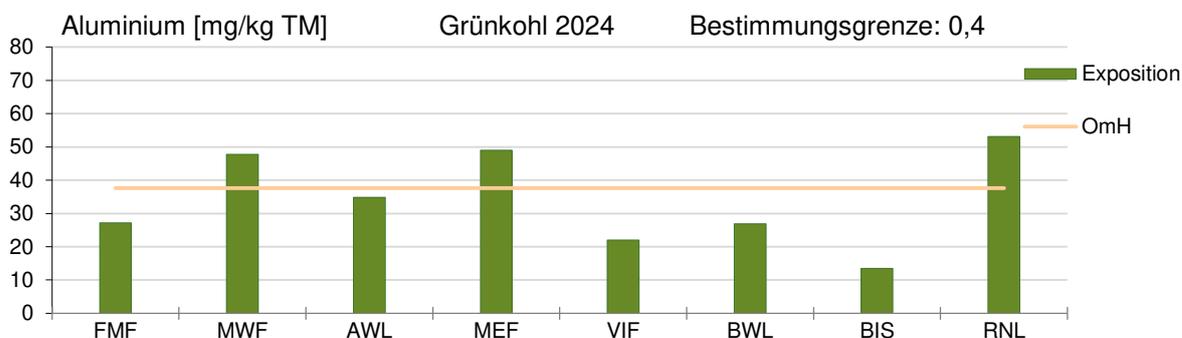
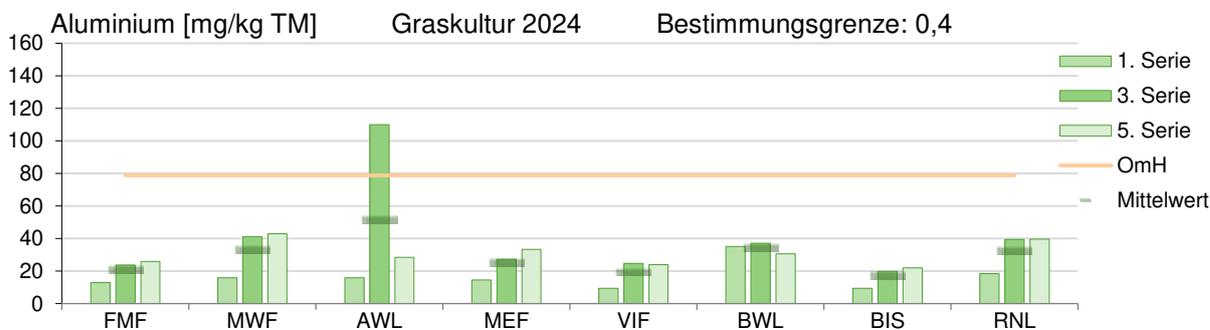
Dabei wird wie gehabt der Vergleich mit Beurteilungswerten aus Höchstmengen-Regelungen der Lebensmittel- und Futtermittelüberwachung (Tabelle 2.6-2) vorgenommen. Sind für den jeweiligen Stoff derartige Beurteilungswerte festgelegt, sind diese unter den Säulendiagrammen gelistet (blassrot unterlegt, umgerechnet 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 2024 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  $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$  betragen (Kap.2.6).

Die Bewertung der Untersuchungsdaten 2024 erfolgte darüber hinaus umfangreicher und im Umgriff über die letzten acht Jahre, um die weiteren zentralen Fragestellungen des Biomonitorings zu beantworten: **ob Immissionswirkungen vorhandenen Emissionsquellen zugeordnet werden können, wie die Wirkungssituation in der zeitlichen Entwicklung 2017–2024 verläuft und wie sie zu bewerten ist.**

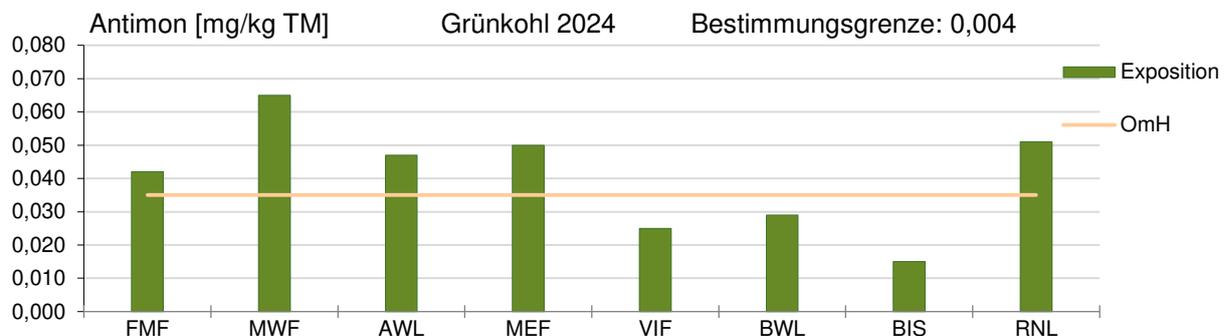
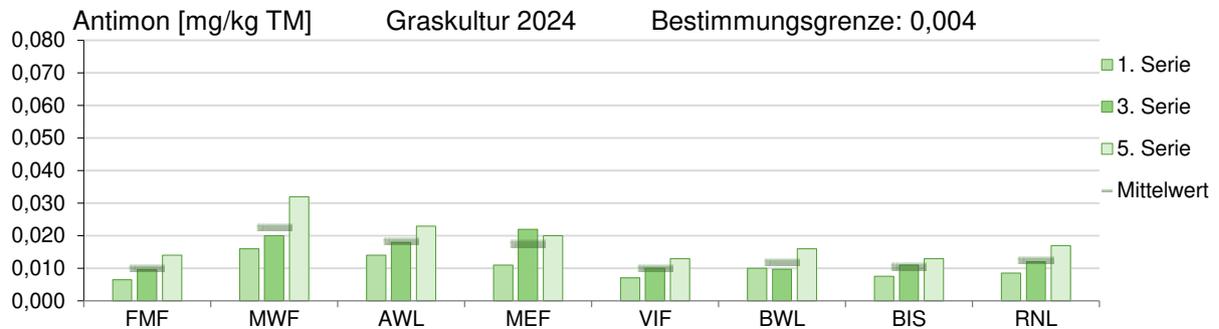
Die Bewertung der Ergebnisse 2017–2024 ist in Kapitel 3 dargestellt und wird in Kapitel 5 zusammengefasst.

## 4.1 Aluminium 2024



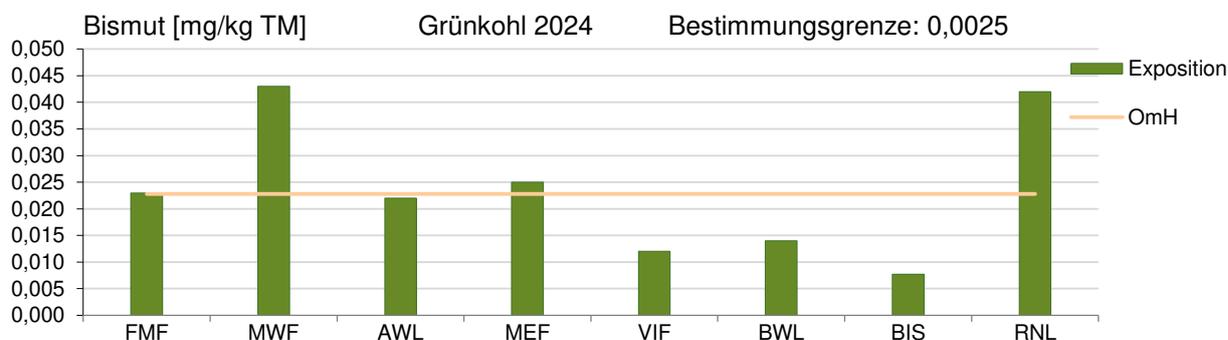
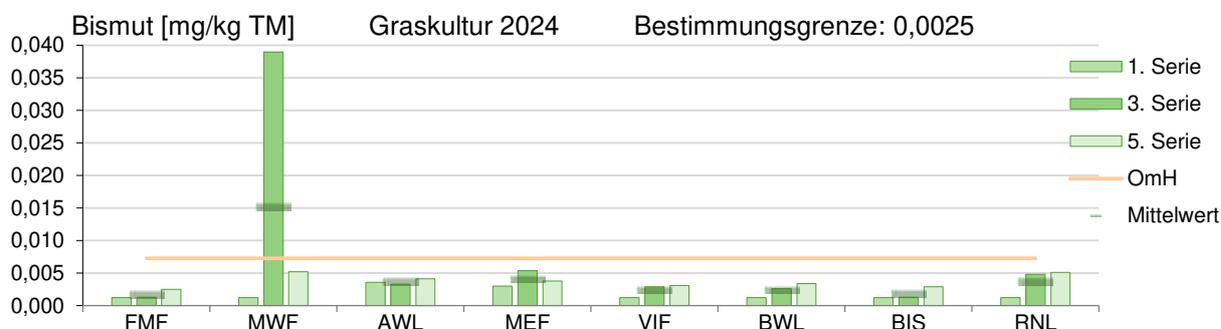
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Futtermittel-Empfehlungswerte: Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>568 mg/kg TM</b> (Rinder / Schafe)	Die Aluminiumgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.
OmH für Aluminium in Graskultur: <b>79 mg/kg TM</b>	Die Aluminiumgehalte in Graskultur unterschritten den OmH. Die Werte abzüglich Standardunsicherheit $\pm 33\%$ für Aluminium lagen sämtlich unterhalb OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Aluminiumgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für Aluminium in Grünkohl: <b>38 mg/kg TM</b>	Die Aluminiumgehalte in Grünkohl abzüglich Standardunsicherheit $\pm 33\%$ unterschritten den OmH.

## 4.2 Antimon 2024



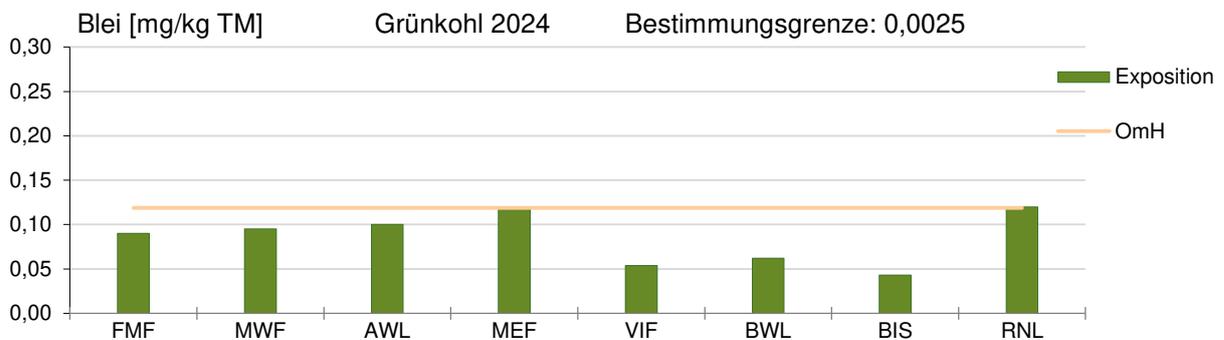
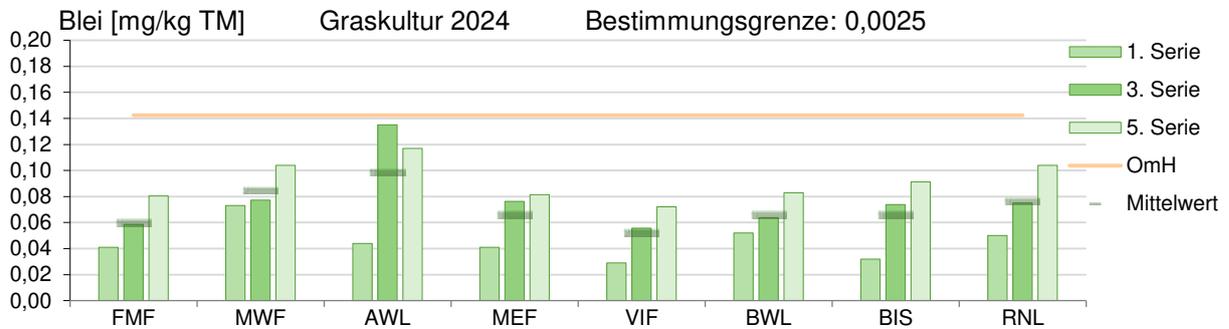
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Antimongehalte in Graskultur (Bild oben)
OmH für Antimon in Graskultur: – (>75% Werte <BG)	Die Antimongehalte in Graskultur lagen sämtlich oberhalb der 2024 deutlich abgesenkten Bestimmungsgrenze von 0,0040 mg/kg TM. (In den Vorjahren hatten die Werte <BG 0,015 mg/kg TM gelegen.)
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Antimongehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für Antimon in Grünkohl: <b>0,035 mg/kg TM</b>	Die Antimongehalte in Grünkohl lagen an den Messpunkten FMF, AWL, MEF, VIF, BWL, BIS und RNL oberhalb Bestimmungsgrenze: 0,0040 mg/kg TM, aber unterhalb OmH. Der Antimongehalt an MWF überschritt den OmH: er lag oberhalb 1,5 * OmH. Dort lag folglich ein Immissionseinfluss vor.

### 4.3 Bismut 2024



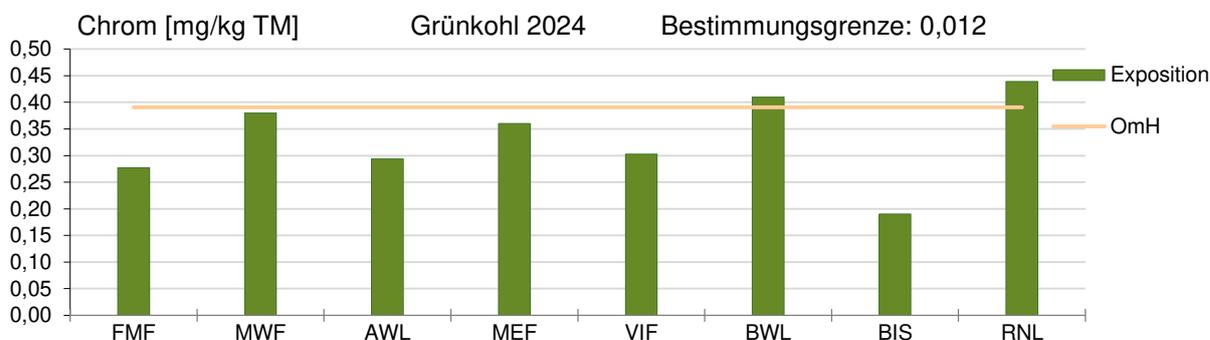
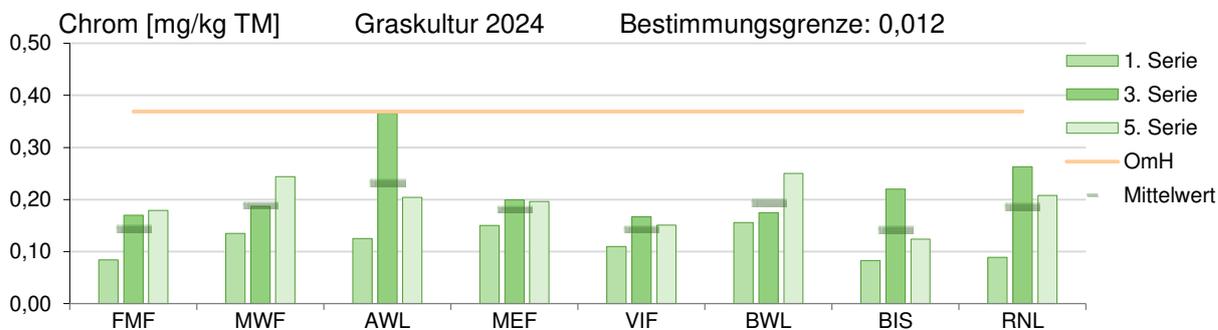
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Bismutgehalte in Graskultur (Bild oben)
OmH für Bismut in Graskultur: <b>0,0073 mg/kg TM</b>	Die Bismutgehalte in Graskultur unterschritten mit einer Ausnahme den OmH. Der maximale Einzelwert 0,039 mg/kg TM in Serie 3 an MWF wurde als Immissionseinfluss durch Nachanalyse bestätigt.
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Bismutgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für Bismut in Grünkohl: <b>0,023 mg/kg TM</b>	Die Bismutgehalte an MWF und an RNL überschritten den OmH: sie lagen oberhalb 1,5 * OmH. Dort lagen folglich Immissionseinflüsse vor.

## 4.4 Blei 2024



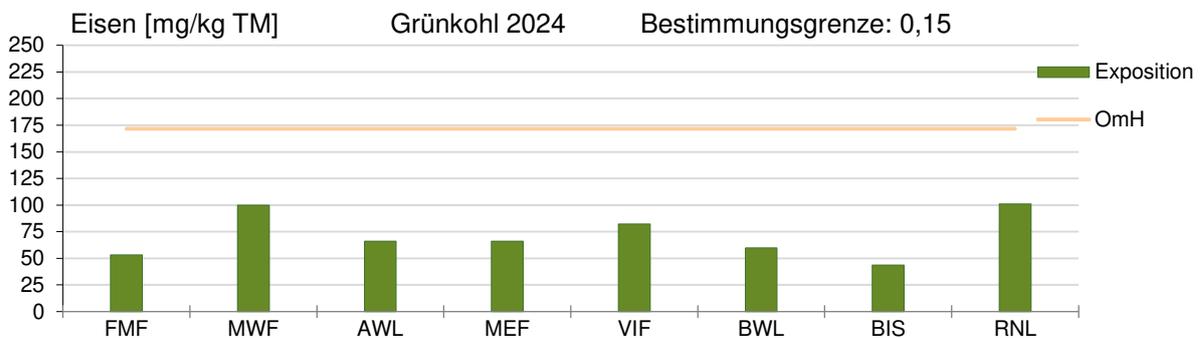
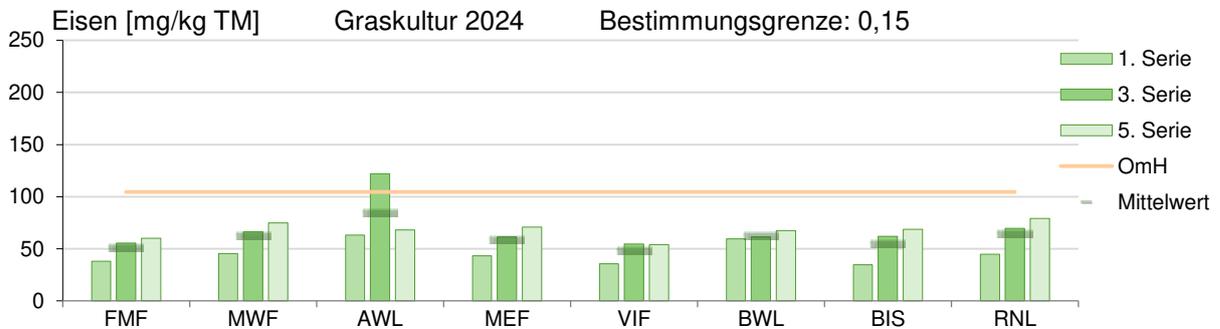
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Futtermittel-Höchstgehalt (FuttMV): <b>34 mg/kg TM</b> Futtermittel-Empfehlungswerte: Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>0,9-3,4 mg/kg TM</b> (Rinder), <b>1,7-2,3 mg/kg TM</b> (Schafe)	Die Bleigehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten den Futtermittel-Höchstgehalt und die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.
OmH für Blei in Graskultur: <b>0,14 mg/kg TM</b>	Die Bleigehalte in Graskultur unterschritten den OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.
Höchstgehalt für Blattkohl-Lebensmittel (Verordnung (EU) 2023/915): <b>0,30 mg/kg FM (Frischmasse)</b>	Die Bleigehalte in Grünkohl (Bild Mitte), umgerechnet 0,005 bis 0,007 mg/kg FM (alle <BG), unterschritten Lebensmittel-Höchstgehalt deutlich.
OmH für Blei in Grünkohl: <b>0,12 mg/kg TM</b>	Die Bleigehalte in Grünkohl lagen in allen Fällen oberhalb der Bestimmungsgrenze 0,0025 mg/kg TM. Sie unterschritten sämtlich den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.

## 4.5 Chrom 2024



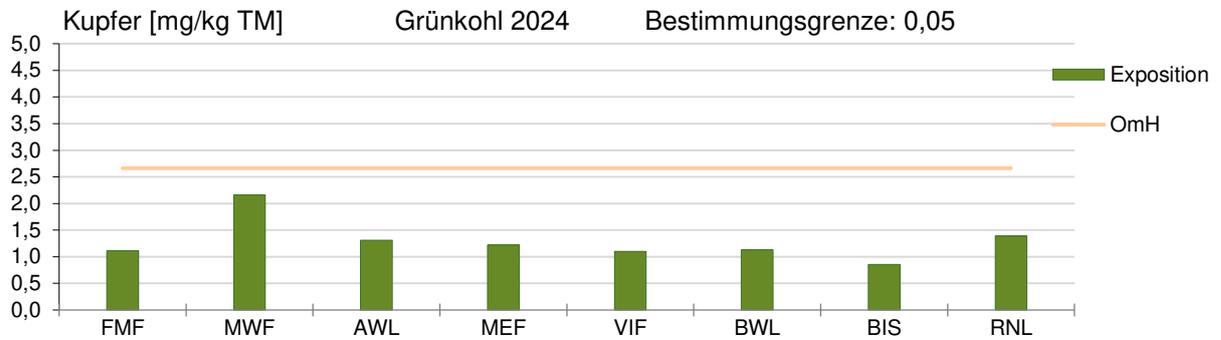
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Futtermittel-Empfehlungswerte: Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>57 mg/kg TM</b> (Rinder / Schafe)	Die Chromgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.
OmH für Chrom in Graskultur: <b>0,37 mg/kg TM</b>	Die Chromgehalte in Graskultur unterschritten den OmH: da auch der Messwert 0,37 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>0,39 mg/kg TM</b>	Die Chromgehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Sie lagen unterhalb $1,5 * OmH$ , folglich lag kein Immissionseinfluss vor.

## 4.6 Eisen 2024



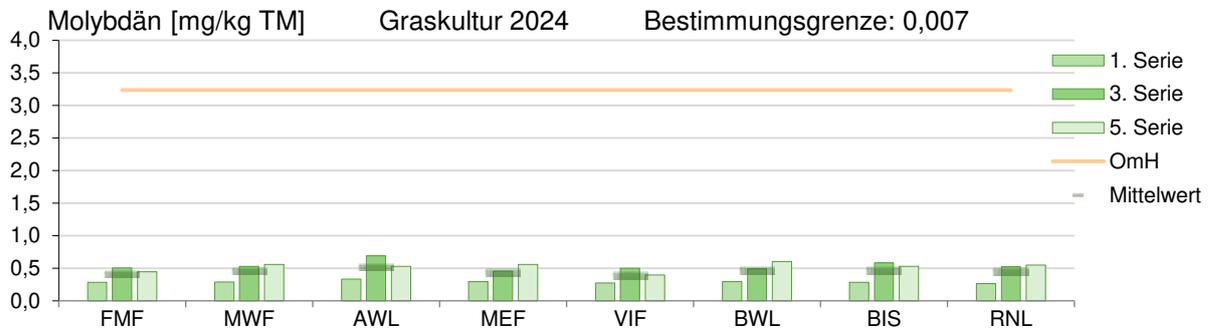
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Eisengehalte in Graskultur (Bild oben)
OmH für Eisen in Graskultur: <b>104 mg/kg TM</b>	Der Messwert an Messpunkt AWL in der 3. Serie abzüglich Standardunsicherheit $u$ von 16 % lag unterhalb OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Eisengehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für Eisen in Grünkohl: <b>172 mg/kg TM</b>	Die Eisengehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.

## 4.7 Kupfer 2024



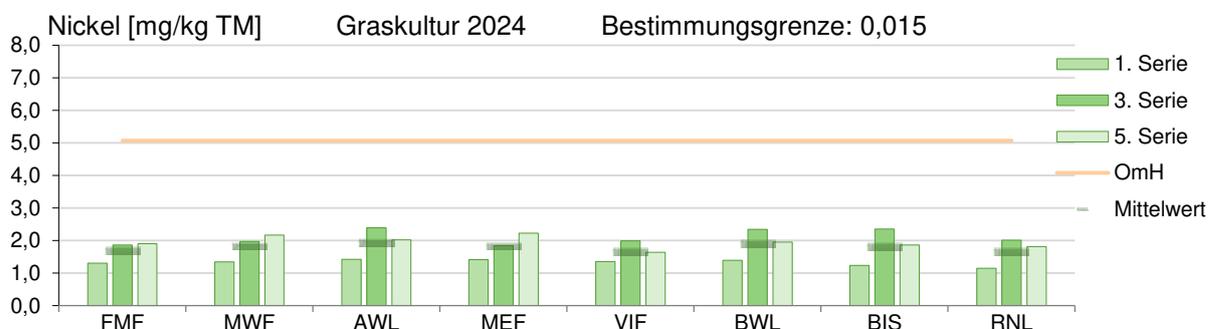
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
–	Kupfer wurde in Graskultur nicht analysiert, da Anreicherungs-effekte über die Wurzel aus dem Substrat auftreten können (VDI 3957/2 2020).
–	
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Kupfergehalte in Grünkohl (Bild oben)
OmH für Kupfer in Grünkohl: <b>2,7 mg/kg TM</b>	Die Kupfergehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.

## 4.8 Molybdän 2024



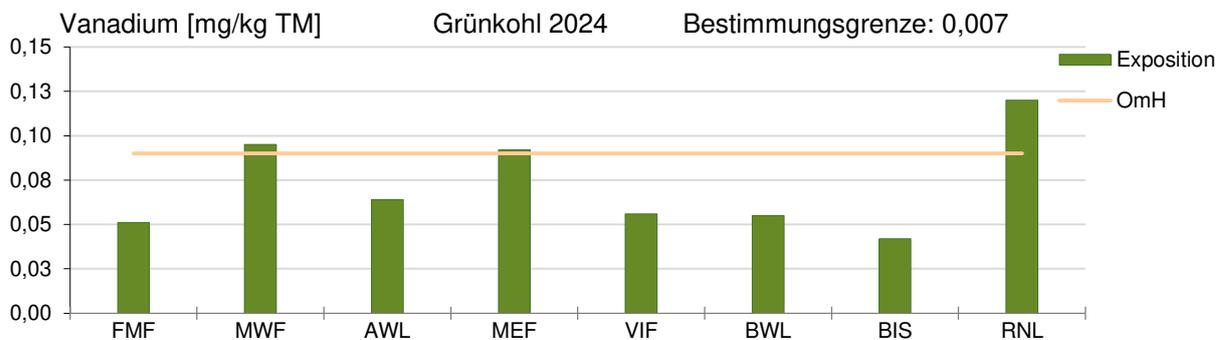
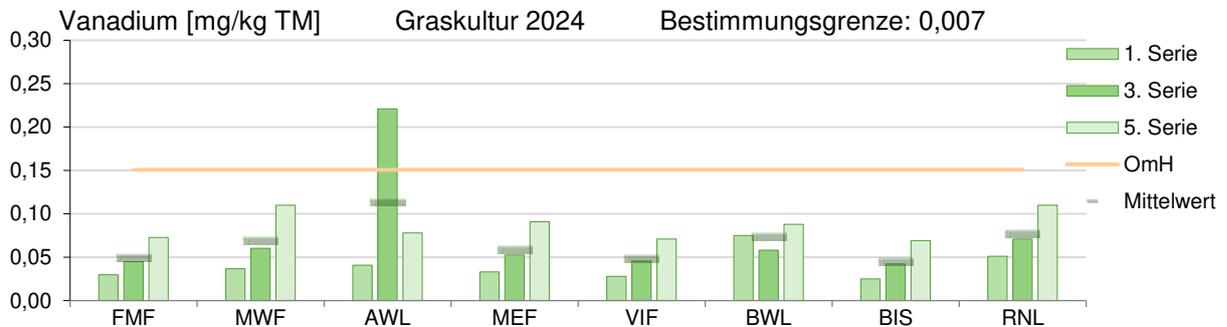
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Futtermittel-Empfehlungswerte: Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>11,4 mg/kg TM</b> (Rinder), <b>57 mg/kg TM</b> (Schafe)	Die Molybdängehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.
OmH für Molybdän in Graskultur: <b>3,2 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>7,8 mg/kg TM</b>	Die Molybdängehalte in Grünkohl unterschritten den OmH: Es lag kein Immissionseinfluss vor.

## 4.9 Nickel 2024



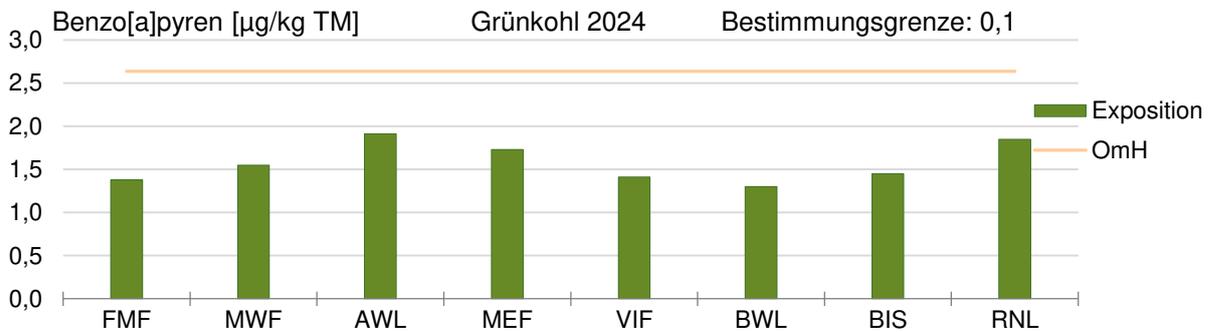
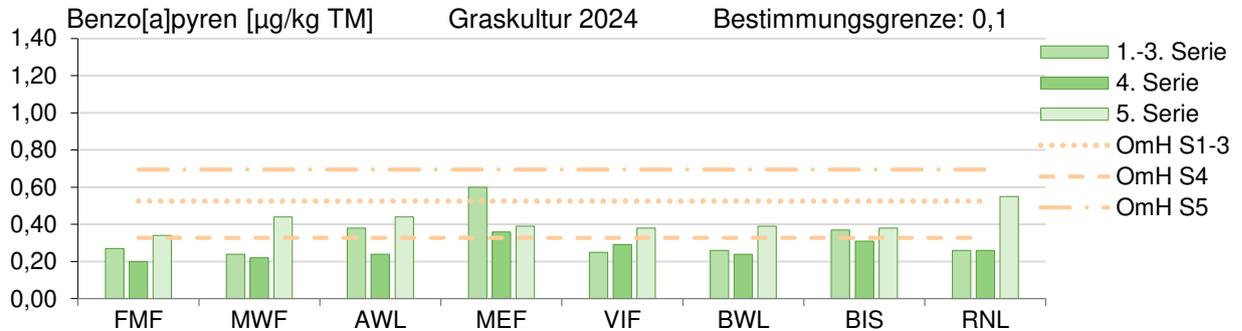
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Futtermittel-Empfehlungswerte: Max. Immissions-Werte (VDI 2310): <b>57 mg/kg TM</b> (Rinder / Schafe)	Die Nickelgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten die Futtermittel-Empfehlungswerte deutlich.
OmH für Nickel in Graskultur: <b>5,1 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 2024).
–	

## 4.10 Vanadium 2024



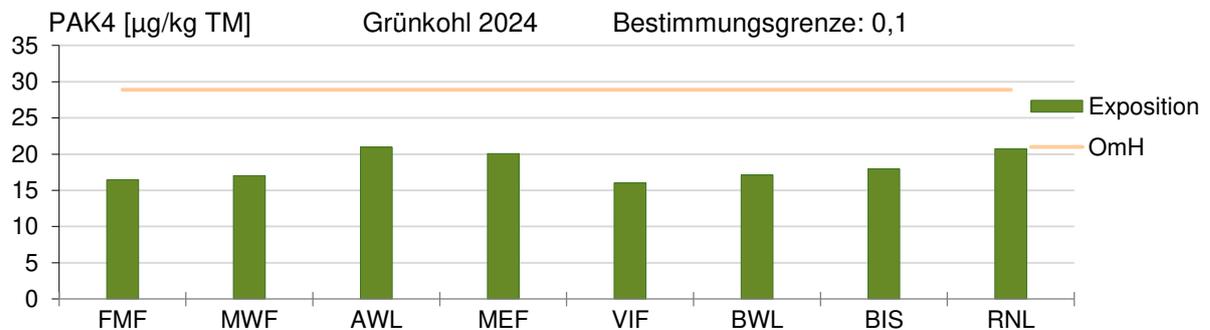
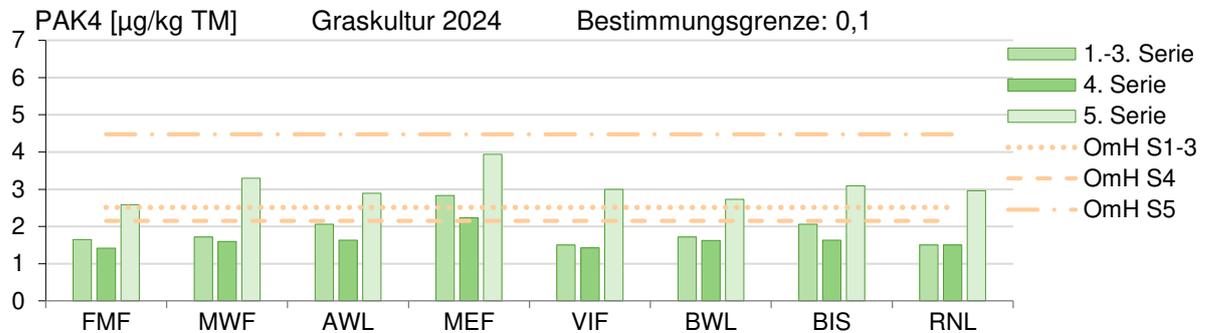
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Futtermittel-Empfehlungswert: Max. Immissions-Wert (VDI 2310): <b>11,4 mg/kg TM</b> (Schafe)	Die Vanadiumgehalte in Graskultur (Bild oben) unterschritten den Futtermittel-Empfehlungswert deutlich.
OmH für Vanadium in Graskultur: <b>0,15 mg/kg TM</b>	Ein Vanadiumgehalt in Graskultur, an Messpunkt AWL in der 3. Serie, überschritt abzüglich Standardunsicherheit $\pm 20\%$ den OmH: Es lag ein temporärer Immissionseinfluss vor.
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Vanadiumgehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für Vanadium in Grünkohl: <b>0,090 mg/kg TM</b>	Die Vanadiumgehalte in Grünkohl unterschritten den OmH. Es lag kein Immissionseinfluss vor.

### 4.11 Benzo[a]pyren 2024



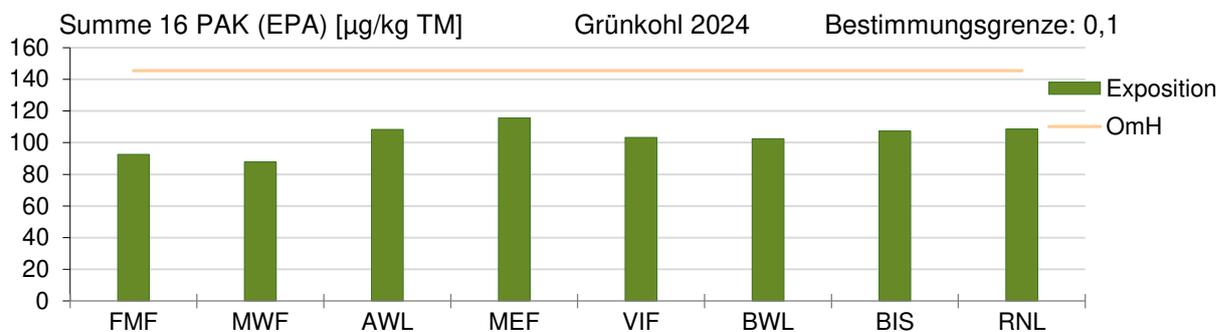
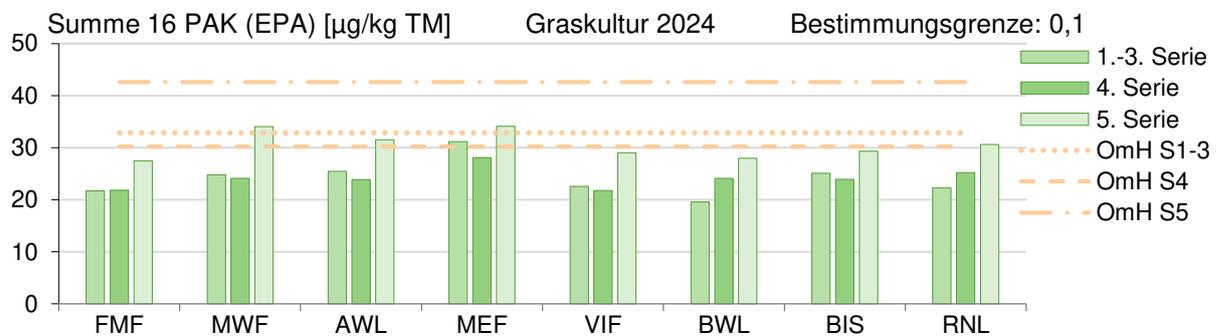
Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Benzo[a]pyren-Gehalte in Graskultur (Bild oben)
OmH für Benzo[a]pyren in Graskultur Serie 1–3 (gepunktete Linie): <b>0,53 µg/kg TM</b> , Serie 4 (gestrichelte Linie): <b>0,33 µg/kg TM</b> , Serie 5 (Punkt-Strich-Linie): <b>0,70 µg/kg TM</b>	Die Benzo[a]pyren-Gehalte in Graskultur unterschritten die für die Expositionsabschnitte (Serien 1–3, 4, 5) separat ermittelten OmH – auch an Messpunkt MEF in Serie 1 lag kein Immissionseinfluss vor: Der BaP-Gehalt betrug $\leq 1,5 \cdot \text{OmH}$ .
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	Benzo[a]pyren-Gehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für Benzo[a]pyren in Grünkohl: <b>2,6 µg/kg TM</b>	Die Benzo[a]pyren-Gehalte in Grünkohl zuzüglich Standardunsicherheit $u$ 18% unterschritten den OmH weit. Es lag kein Immissionseinfluss vor.

## 4.12 PAK4 2024



Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	PAK4-Gehalte in Graskultur (Bild oben)
OmH für PAK4 in Graskultur Serie 1–3 (gepunktete Linie): <b>2,5 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math>,</b> Serie 4 (gestrichelte Linie): <b>2,1 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math>,</b> Serie 5 (Punkt-Strich-Linie): <b>4,5 <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 nicht $\geq 1,5 \cdot \text{OmH}$ betragen. Es lag kein Immissionseinfluss vor.
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	PAK4-Gehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für PAK4 in Grünkohl: <b>29 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b>	Die PAK4-Gehalte in Grünkohl zuzüglich Standardunsicherheit $\pm 35\%$ unterschritten den OmH weit. Es lag kein Immissionseinfluss vor.

### 4.13 Summe 16 PAK (EPA) 2024



Beurteilungswerte für Gefährdungsabschätzung; für Immissionseinflüsse über max. Hintergrund (OmH)	Untersuchungen 2024
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	S16PAK-Gehalte in Graskultur (Bild oben)
OmH für Summe der 16 PAK (S16PAK) in Graskultur Serie 1–3 (gepunktete Linie): <b>33 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> , Serie 4 (gestrichelte Linie): <b>30 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b> , Serie 5 (Punkt-Strich-Linie): <b>43 <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. Es lag kein Immissionseinfluss vor.
Beurteilungswert für Gefährdungsabschätzung: –	S16PAK-Gehalte in Grünkohl (Bild Mitte)
OmH für S16PAK in Grünkohl: <b>145 <math>\mu\text{g}/\text{kg TM}</math></b>	Die S16PAK-Gehalte in Grünkohl zuzüglich Standardunsicherheit $\pm$ 20% unterschritten den OmH weit. 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) war im Berichtsjahr 2022 außerordentlich nochmals um drei der seit 2020 verbliebenen acht Messpunkte reduziert worden. Seit dem Jahr 2023 wird das kontinuierliche Biomonitoring wieder an den acht repräsentativen Messpunkten durchgeführt.

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 die Vorjahresberichte über die frühere, jährliche Dokumentation der Untersuchungsdaten hinaus und erweitert den Umgriff auf die Jahre 2017–2024 (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 2017–2024 mit vereinzelt Ausnahmen (kein relevanter Immissionseinfluss).

Relevante Immissionseinflüsse – mit mehrheitlichen OmH-Überschreitungen – wurden nur für Antimon in Grünkohl an MEF und MWF als betriebsnahen Messpunkten am Flughafen festgestellt. Durch die deutliche Steigerung der analytischen Empfindlichkeit im Jahr 2024 könnten zukünftig auch für Graskultur Immissionseinflüsse von Antimon mittels OmH nachweisbar werden, was bislang aufgrund der Datenlage nicht möglich war.

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

- an AWL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt für Aluminium und Antimon jeweils nur in Grünkohl sowie für Vanadium in Graskultur,
- an BIS als Messpunkt innerorts für PAK (S12PAK, S16PAK) saisonal in Grünkohl,
- an MEF als betriebsnahe Messpunkt am Flughafen für Bismut, Blei und PAK4 mit Benzo[a]pyrenen als Leitparametern der PAK in Graskultur,
- an MWF als zweitem betriebsnahe Messpunkt am Flughafen schwächer für Bismut und Blei in Graskultur,

- an RNL als landwirtschaftlich geprägtem Messpunkt für Vanadium 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 7-Jahresvergleich (ohne 2020) 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 ab dem Jahr 2022, in dem das Flugverkehrsaufkommen bereits auf rund 70 % des Niveaus der Vor-Coronajahre 2018 und 2019 zurückgekehrt war, keine OmH-Überschreitungen für Blei und Eisen auf, für Aluminium nur 2022 an FMF. Enge niedrige Wertebereiche z. B. für Eisen kamen auch in früheren Untersuchungsjahren vor (Messberichte 2012 und 2015, ohne Darstellung). In 2023, bei weiter gestiegenem Flugzahlen fielen besonders enge, niedrige Wertebereiche für die PAK sowie die meisten Metalle in Grünkohl auf, gegenüber Wertebereichen 2024 ähnlich zu 2022 (siehe Abschnitt unten). Die weitere Entwicklung in den kommenden Jahren gilt es zu beobachten: insbesondere von Antimon, das hauptsächlich aus Abrieb aus Bremsbelägen aus dem Verkehr in die Umwelt eingetragen wird (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, gingen 2023 stark zurück und hoben sich seitdem nicht mehr von den PAK-Gehalten an den anderen Messpunkten ab.

Die Metalle in Grünkohl hatten in 2023 teilweise niedriger gelegen als 2022, aber im Bereich der langjährigen Werte. Die PAK in Grünkohl hatten in 2023 an allen Messpunkten in einem auffällig niedrigen Bereich gelegen. In 2024 kehrten sie auf das Niveau der Vorjahre zurück. Ein auf die Metall- und PAK-Gehalte gleichartig wirksamer Einfluss des Biomasse-Zuwachses der Grünkohlsorte „Reflex“ im Herbst 2023 scheidet aus, denn diesen im Vergleich zur schwächer wüchsigen Vorgängersorte bis 2022 zeigte „Reflex“ auch 2024. Einen ebenfalls auf die meisten Metall- und die PAK-Gehalte gleichartig wirksamen, gewissen Einfluss kann der Niederschlag 2023 gehabt haben: In den letzten beiden Wochen der Grünkohl-Exposition 2023 regnete es rund dreimal mehr als im Vergleichszeitraum 2022 und in 2024 regnete es in den letzten zwei Grünkohl-Expositionswochen nicht (Bild 9.1-1). Die Regenmenge zu Ende der Exposition 2023 könnte mehr aufgelagerte Stoffe abgewaschen haben. Besonders stark könnte aber der Einfluss der warmen Witterung von September bis November 2023 und damit verbunden der (Nicht-)Heiztätigkeit als Hauptquelle für PAK im Herbst für die Gehalte in Grünkohl gewesen sein.

Insgesamt wurde kein deutlicher Einfluss des Flughafenbetriebs oder eine zeitliche Entwicklung festgestellt, die mit dem Coronapandemie bedingten Rückgang der Flugzahlen 2020 und 2021 und dem Wiederanstieg seit 2022 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 Kleinf Feuerungsanlagen in Haushalten (Hausbrand) als saisonaler Quelle, 2 % stammen aus der kontinuierlichen Quelle Verkehr (UBA 2016). In Expositionsabschnitten, in denen witterungsbedingt häusliche Kleinf Feuerungsanlagen aktiv sind, waren an Messpunkt BIS innerorts im relativen Messpunktvergleich überdurchschnittliche PAK-Gehalte in Graskultur und Grünkohl zu beobachten. Messpunkt MEF, betriebsnah am Ostende der Nordbahn des Flughafens, trat 2017–2022 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. Im Unterschied zu den anderen Metallen zeigte Nickel in Graskultur an BIS keinen relativ unterdurchschnittlichen Wert in der ersten Serie im Mai. Dies ist bedingt durch ein von den anderen Messpunkten abgesetztes Nickel-Maximum 2018.

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 2017–2024 unauffällig niedrig. Dies zeigt sich im Vergleich mit OmH und Vergleichswerten anderer Biomonitorings.

Von den Metallen liegen Bismut 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) 2023/915) 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 im Jahr 2025 kontinuierlich an den acht repräsentativen Messpunkten fortgeführt, 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
BSL	Beweissicherungsverfahren Landwirtschaft
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

S16PAK	Kurzbezeichnung für Summe der 16 PAK
S12PAK	Kurzbezeichnung für Summe der schwerer flüchtigen 12 PAK
Sb	Antimon
TM	Trockenmasse
<i>u</i>	Standardunsicherheit des Verfahrens
V	Vanadium
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VO	Verordnung
µg/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“, nach Verordnung (EU) 2023/915

**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 (abzüglich -> Standardunsicherheit des Verfahrens  $u$ ) 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) 2023/915 (vormals VO Nr. 835/2011 ff.)

**Standardunsicherheit des Verfahrens  $u$ :**

Für den OmH als Beurteilungswert, bei dessen Überschreitung ein Immissionseinfluss nachgewiesen wird, sind die verfahrensbedingten Datenabweichungen zu berücksichtigen; die Standardunsicherheit  $u$  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).

**Trockenmasse (TM):**

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

**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 11 Absatz 3 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) 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 – mit:

Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung, ABl. EU Nr. L 140 vom 30.5.2002, S. 10–22

TA Luft: Neufassung der Ersten Allgemeinen 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), in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323) 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, aufgehoben am 25. Mai 2024 mit Inkrafttreten von VO (EU) 2023/915.

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.

VO (EU) 2023/915: VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2024 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006. Amtsblatt der Europäischen Union L119, S. 103-157.

## 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 EN ISO 17294-2:2023-03: Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope (ISO 17294-2:2023); Deutsche Fassung EN ISO 17294-2:2023

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 27:2024-07: Maximale Immissions-Werte – Maximale Immissions-Werte für Blei zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere und der von ihnen stammenden Lebensmittel. 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 3:2024-01: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) – Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl. Berlin, Beuth.

VDI 3957 Blatt 4:2024-01 Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring); Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl – Bewertung von Schadstoffgehalten in Nahrungspflanzen für den menschlichen Verzehr. Berlin, Beuth

VDI 3957 Blatt 10:2024-01: 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.

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 2018–2024, Koalitionsvertrag zwischen CSU und Freien Wählern vom 04.11.2018, S. 51.
- Peichl L., M. Wäber, W. Reifenhäuser (1994): Schwermetallmonitoring mit der standardisierten Gras-kultur 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, Wein-heim, S. 319-334.
- Siewers, U., U. Herpin (1998): Schwermetalleinträge in Deutschland – Moos-Monitoring 1995/96. Geo-logisches Jahrbuch Sonderhefte, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Schwei-zerbart'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 Emis-sions- 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 deutschsprachi-gen 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 Gras-kultur 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 25.01.2025: [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)
- BayLfU (2022a): Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) für die Anreicherung von Metallen in Graskulturen – Bewertungszeitraum 2012 – 2021. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 5 S., Stand 25.01.2025: [https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe\\_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/omh\\_graskultur.pdf](https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/omh_graskultur.pdf)

FMG Verkehrsberichte. Flughafen München GmbH (Hrsg.), Stand 27.01.2025: <https://www.munich-airport.de/verkehrszahlen-88506>

UBA (2016): Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe – Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, Quelle im Internet, Stand 27.01.2025: [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 (2022a): Umweltbelastungen der Landwirtschaft: Düngemittel. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, Stand 27.01.2025: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/duengemittel#duengemittel-was-ist-das>

UBA (2024): Emissionsentwicklung 1990 - 2022 für Schwermetalle. Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, Umweltbundesamt (Hrsg.), Stand 27.01.2025: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>

Wäber, M., Pompe, F. (2021): Biomonitoring und Depositionsuntersuchungen in der Umgebung des Flughafens München – Zusammenfassende Dokumentation 2020. Quelle im Internet, Stand 27.01.2025: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000012223301bb61829c0e/biomonitoring-2020.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000012223301bb61829c0e/biomonitoring-2020.pdf)

Wäber, M., Pompe, F. (2022): Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2021 mit Einordnung der Wirkungssituation 2017–2021. Quelle im Internet, Stand 27.01.2025: [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 27.01.2025: <https://corporate.berlin-airport.de/content/dam/corporate/de/umwelt/luft/2022-11-28-biomber.pdf>

Wäber, M., Pompe, F. (2023): Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2022 mit Einordnung der Wirkungssituation 2017–2022. Quelle im Internet, Stand 27.01.2025: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000016753227bb6411a93c/biomonitoring-2022-1.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000016753227bb6411a93c/biomonitoring-2022-1.pdf)

Wäber, M., Pompe, F. (2023a): Biomonitoring von Luftverunreinigungen mit standardisierten Graskulturen im Umland des Flughafens Leipzig/Halle 2020 und 2022. Flughafen Leipzig/Halle GmbH (Hrsg.), Quelle im Internet, Stand 27.01.2025: [https://www.mdf-ag.com/media/user\\_upload/Leipzig\\_Halle/Bilder/Umwelt/FLH2022\\_Biomon-Bericht\\_UMW20230411.pdf](https://www.mdf-ag.com/media/user_upload/Leipzig_Halle/Bilder/Umwelt/FLH2022_Biomon-Bericht_UMW20230411.pdf)

Wäber, M., Pompe, F. (2024): Biomonitoring in der Umgebung des Flughafens München 2023 mit Einordnung der Wirkungssituation 2017–2023. Quelle im Internet, Stand 27.01.2025: [https://www.munich-airport.de/\\_b/0000000000000024673356bb664dda52/biomonitoring-2023-web1.pdf](https://www.munich-airport.de/_b/0000000000000024673356bb664dda52/biomonitoring-2023-web1.pdf)

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1.2-1: Schadstoffe gelangen über die Luft in die Umwelt.....	9
Bild 1.3-1: Flugbewegungen 2020 bis 2024 im Vergleich zu den Vorjahren .....	11
Bild 2.1-1: Lage der Messpunkte am Flughafen München und in seiner Umgebung .....	13
Bild 2.3-1: Graskulturen für die Analysen auf Metalle (2 kleine Kulturtöpfe, hinten) und auf PAK (2 große Kulturtöpfe, vorne) .....	16
Bild 2.4-1: Grünkohlexponate Sorte „Reflex“ seit 2023 (oben), Sorte „Hammer/Grüsa“ bis 2022 (links unten) und Grünkohlernte für die Analysen auf Metalle (1 Kultur) und PAK (2 Kulturen).....	17
Bild 2.7-1: Windrose beispielhaft für den Expositionszeitraum Mai–Oktober 2023 .....	27
Bild 3.1-1: Aluminiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024 .....	29
Bild 3.1-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Aluminium 2017–2024 .....	30
Bild 3.2-1: Antimonergehalte in Graskultur (oben) und in Grünkohl 2017–2024.....	33
Bild 3.2-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Antimon in Grünkohl 2017–2019 und 2021–2024.....	34
Bild 3.3-1: Bismutgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024 .....	37
Bild 3.3-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Bismut 2017–2024.....	38
Bild 3.4-1: Bleiergehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024 .....	40
Bild 3.4-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Blei 2017–2024.....	41
Bild 3.5-1: Chromgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024 .....	44
Bild 3.5-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Chrom 2017–2024.....	45
Bild 3.6-1: Eisengehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024 .....	48
Bild 3.6-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Eisen 2017–2024.....	49
Bild 3.7-1: Kupfergehalte in Grünkohl 2017–2019 und 2021 bis 2024 .....	51
Bild 3.7-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Kupfer in Grünkohl 2017–2019 und 2021–2024.....	52
Bild 3.8-1: Molybdängehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024.....	54
Bild 3.8-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Molybdän 2017–2024 .....	55
Bild 3.9-1: Nickelgehalte in Graskultur 2017–2024 .....	57
Bild 3.9-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Nickel in Graskultur 2017–2024 .....	58
Bild 3.10-1: Vanadiumgehalte in Graskultur (oben) und Grünkohl (unten) 2017–2024 .....	60
Bild 3.10-2: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für Vanadium 2017–2024 .....	61
Bild 3.11-1: PAK-Gehalte in Graskultur 2017–2024.....	64
Bild 3.11-2: PAK-Gehalte in Grünkohl 2017–2024.....	65

Bild 3.11-3: Relativer Messpunktvergleich anhand Z-Mittelwerten für PAK 2017–2024 .....	69
Bild 9.1-1: Niederschlagsmengen in mm während der Graskulturserien und Grünkohl-Exposition 2024 .	104
Bild 9.1-2: Doppelseite - Windgeschwindigkeit und Windrichtung (aus Richtung) 2024 .....	106
Bild 9.2-1: FMF Karte (oben) und Foto (unten) .....	108
Bild 9.2-2: MWF Karte (oben) und Foto (unten) .....	109
Bild 9.2-3: AWL Karte (oben) und Foto (unten) .....	110
Bild 9.2-4: MEF Karte (oben) und Foto (unten) .....	111
Bild 9.2-5: VIF Karte (oben) und Foto (unten) .....	112
Bild 9.2-6: BWL Karte (oben) und Foto (unten) .....	113
Bild 9.2-7: BIS Karte (oben) und Foto (unten) .....	114
Bild 9.2-8: RNL Karte (oben) und Foto (unten) .....	115

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1-1: Übersicht über die Messpunkte .....	14
Tabelle 2.2-1: Übersicht Stoffspektrum beim Biomonitoring .....	15
Tabelle 2.4-1: Expositionsabschnitte 2024.....	18
Tabelle 2.6-1: Beurteilungswerte für Immissionseinflüsse – OmH für Graskultur und Grünkohl.....	21
Tabelle 2.6-2: Beurteilungswerte zur Gefährdungsabschätzung .....	24
Tabelle 2.7-1: Behandlung identifizierter Ausreißer (rA) .....	26
Tabelle 3.1-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Aluminium zu den Messpunkten .....	28
Tabelle 3.2-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Antimon zu den Messpunkten.....	32
Tabelle 3.3-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Bismut zu den Messpunkten .....	36
Tabelle 3.4-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Blei zu den Messpunkten .....	39
Tabelle 3.5-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Chrom zu den Messpunkten .....	43
Tabelle 3.6-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Eisen zu den Messpunkten .....	47
Tabelle 3.7-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Kupfer zu den Messpunkten .....	50
Tabelle 3.8-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Molybdän zu den Messpunkten .....	53
Tabelle 3.9-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Nickel zu den Messpunkten .....	56
Tabelle 3.10-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für Vanadium zu den Messpunkten.....	59
Tabelle 3.11-1: Zuordnung der OmH-Überschreitungen für PAK zu den Messpunkten.....	67

## 9 Anhang

Kapitel 9.1: Witterungseinflüsse 2024

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

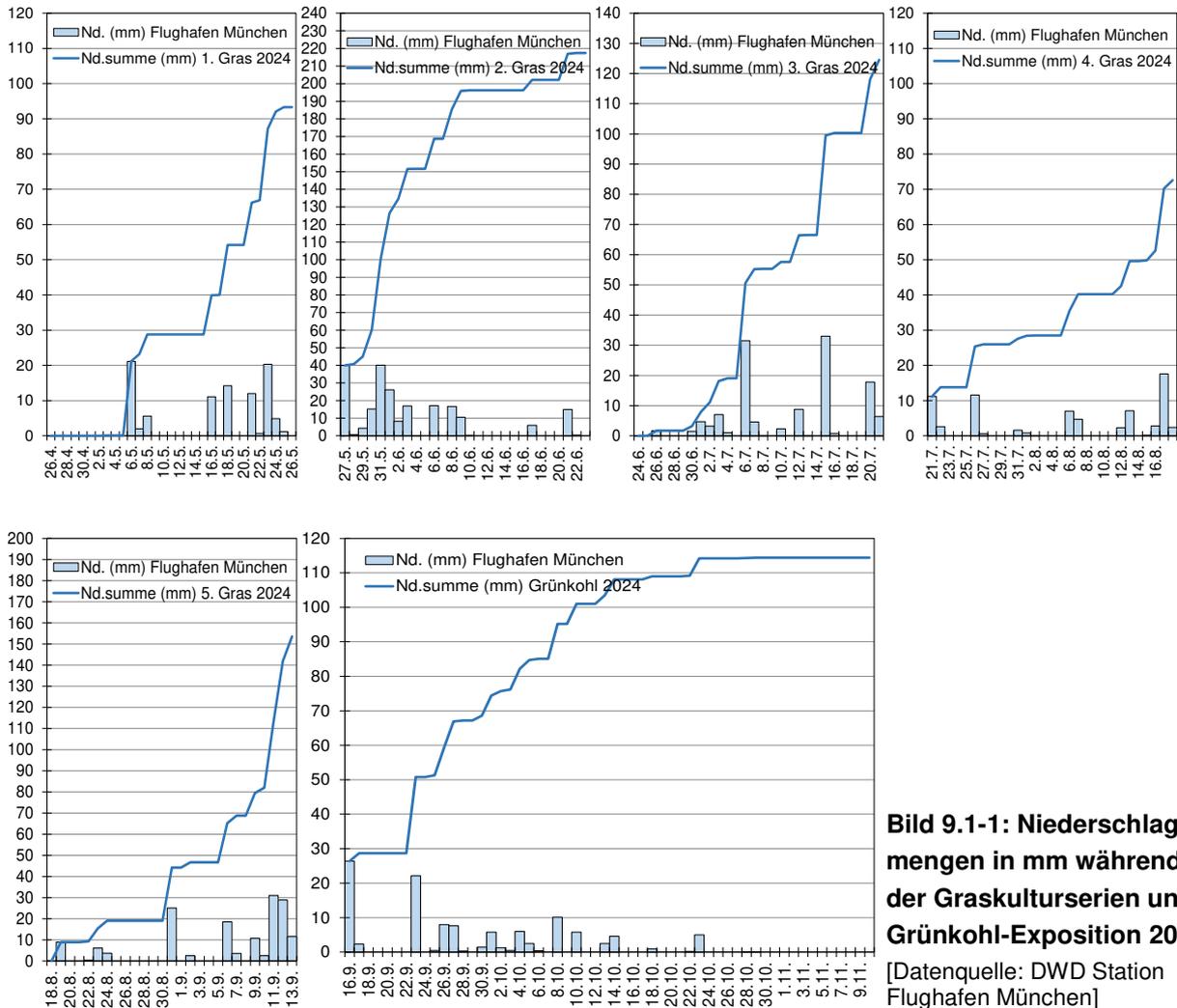
Kapitel 9.3: Metalle in Graskultur

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 2024



**Bild 9.1-1: Niederschlagsmengen in mm während der Graskulturserien und Grünkohl-Exposition 2024**

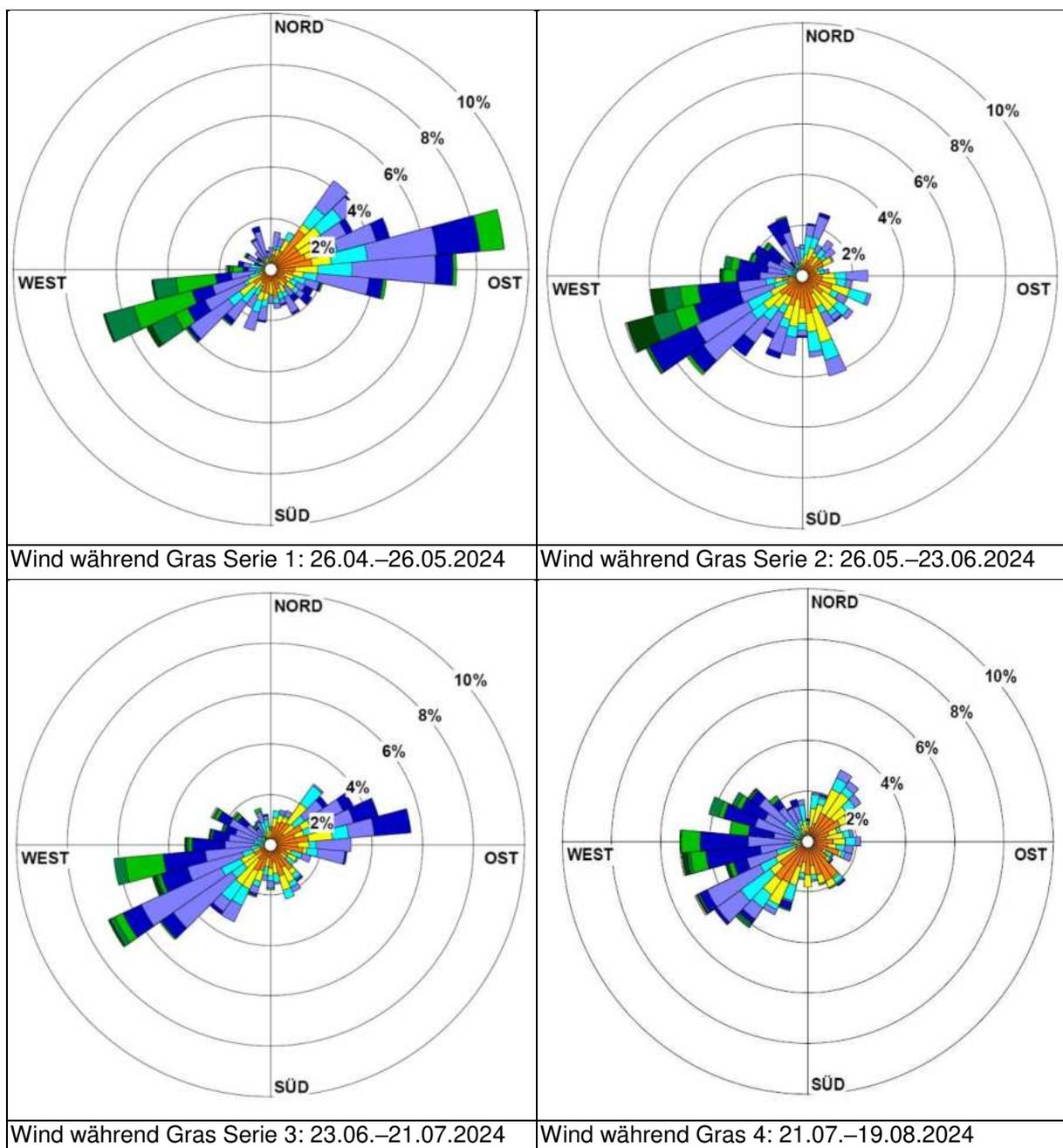
[Datenquelle: DWD Station Flughafen München]

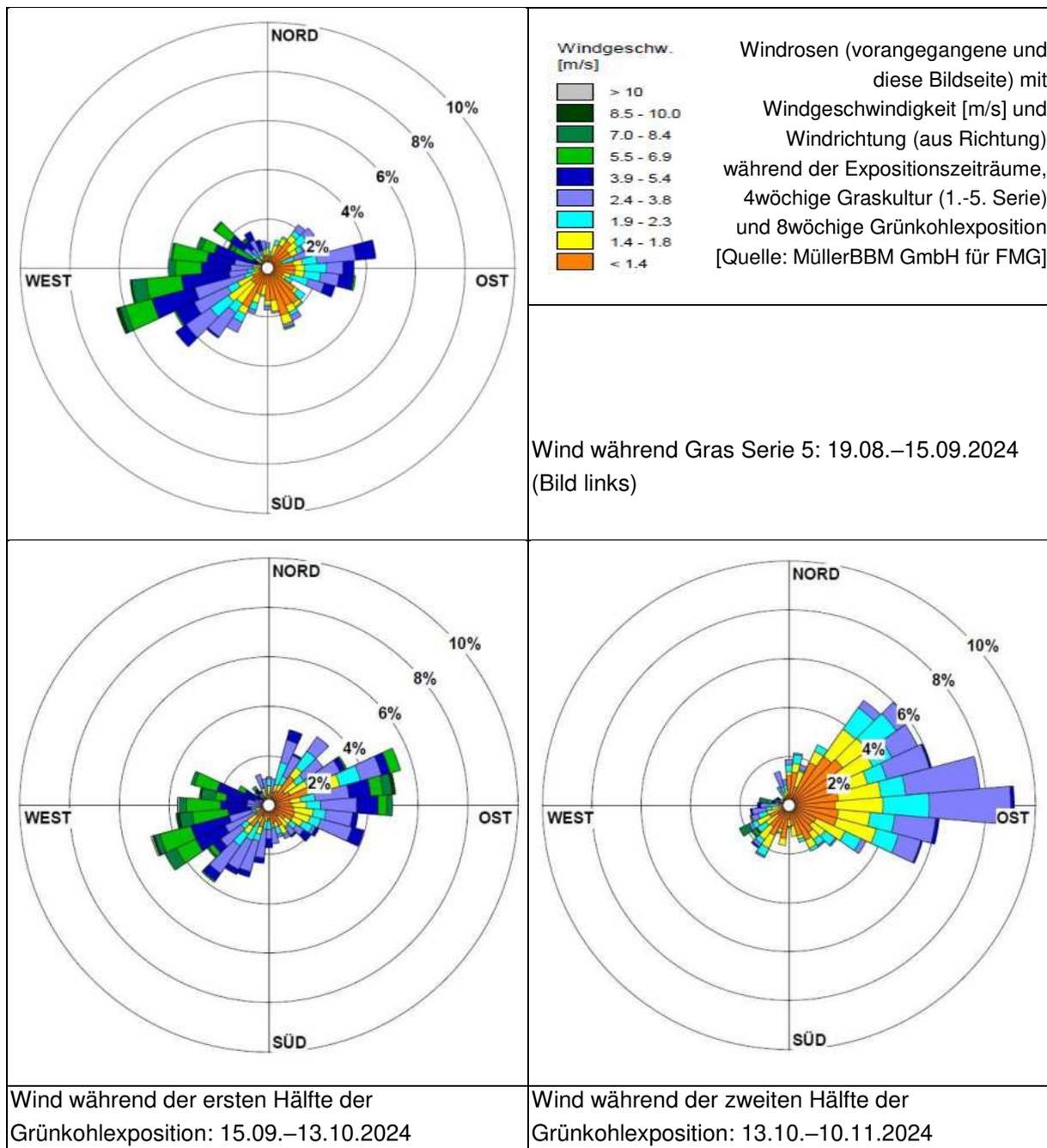
Im Jahr 2021 waren jeweils rund 80–150 mm Niederschlag während der Graskultorexpositionen gefallen. Im Jahr 2022 regnete es während der Graskultorexpositionen weniger, maximal 87 mm, aber während der Grünkohlexposition aber mehr als doppelt so viel, mit 137 mm normal für diesen Zeitraum. Im Jahr 2023 waren jeweils rund 10 mm (2. Serie) bis 159 mm Niederschlag (5. Serie) während der Graskultorexpositionen gefallen und 67 mm saisonal weit unterdurchschnittlich während der Grünkohlexposition. Die Höhe und Verteilung der Niederschläge 2024 sind in Bild 9.1-1 dargestellt:

- In der 1. Serie Graskultur Ende April bis Ende Mai 2024 regnete es mit 93 mm relativ viel, in den letzten 10 Expositionstagen 65 mm.
- In der 2. Serie Graskultur im Juni betrug die Niederschlagsmenge 217 mm – extrem viel und rund 200 mm allein in der ersten Expositionshälfte. (Die 2. und 4. Serie Graskultur werden nicht auf Metalle untersucht; diese Serie geht aber in die Mischprobe 1-3 zur PAK-Untersuchung ein.)
- In der 3. Serie im Juli regnete es mit 125 mm viel und an den letzten beiden Expositionstagen 18 mm und 6 mm.

- In der 4. Serie bis Mitte August fielen 73 mm Niederschlag, am vorletzten Expositionstag 18 mm und am letzten Tag 2 mm.
- In der 5. Serie Graskultur fiel mit 154 mm sehr viel Niederschlag – davon rund 72 mm an den letzten drei Tagen bzw.
- Während der achtwöchigen Grünkohlexposition von Mitte September bis Anfang November war die Niederschlagsmenge mit 114 mm saisonal durchschnittlich. In den letzten zwei Expositionswochen regnete allerdings nicht.

Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten beeinflussen die Verdriftung von direkten Immissionen oder auch den Abdrift von Bodestaub von Oberflächen. Die folgenden beiden Bildseiten zeigen die Windrosen – Windgeschwindigkeit und Windrichtung (aus Richtung) – für Mai bis Oktober 2024 (Bild 9.1-2).





**Bild 9.1-2: Doppelseite - Windgeschwindigkeit und Windrichtung (aus Richtung) 2024**

- Ende April bis Ende Mai 2024, während der 1. Serie Graskultur, traten vorrangig Winde aus Ost bis Nordost auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 2,7 m/s (Bild 9.1-2).
- Ende Mai bis Ende Juni 2024, während der 2. Serie Graskultur, überwogen hingegen Winde aus westlichen bis südwestlichen Richtungen deutlich, bei vorwiegend geringen Windgeschwindigkeiten: Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 2,7 m/s wie während Serie 1.
- Ende Juni bis Ende Juli 2024, während der 3. Serie, überwogen erneut Winde aus westlichen bis südwestlichen Richtungen. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 2,5 m/s.

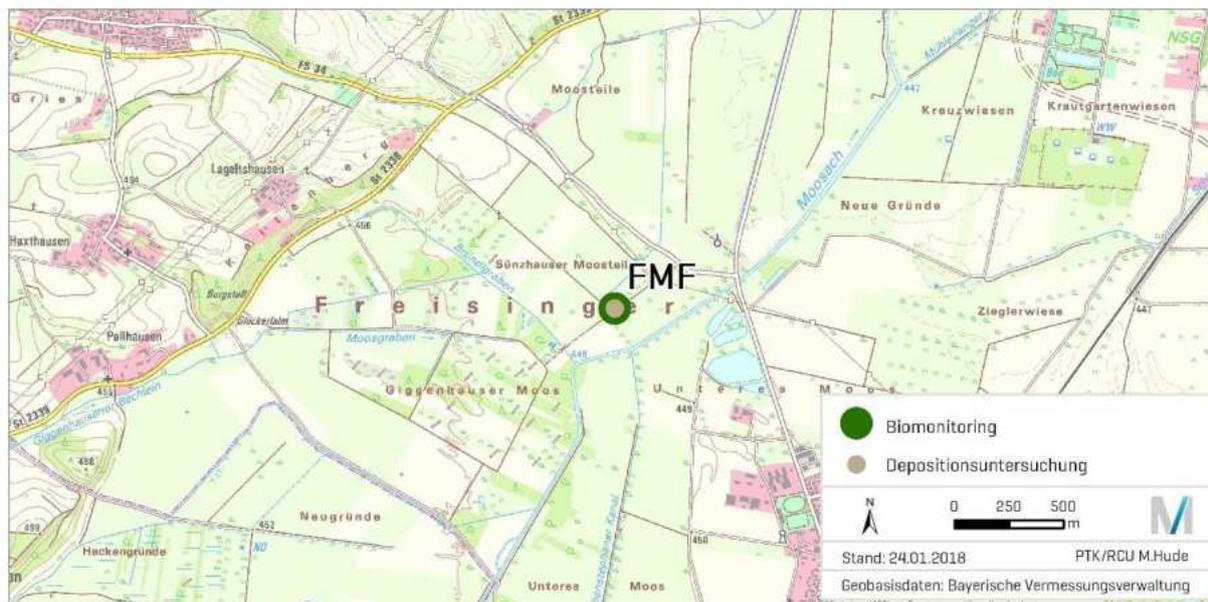
- Ende Juli bis Mitte August 2024, während der 4. Serie Graskultur, überwogen Winde aus nord- bis südwestlichen Richtungen gegenüber Winden aus nord- bis südöstlichen Richtungen. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 2,3 m/s.
- Mitte August bis Mitte September 2024, während der 5. Serie Graskultur, überwogen Winde aus nordwestlichen bis südwestlichen Richtungen Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 2,6 m/s .
- Während der ersten Hälfte der Grünkohlexposition vom 15.09.-13.10.2024 waren südwestliche und nordöstliche Windrichtungen ähnlich häufig und die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 2,9 m/s. Während der zweiten Expositionshälfte vom 13.10.-10.11.2024 überwogen hingegen ganz deutlich westliche winde bei waren südwestliche und nordöstliche Windrichtungen bei insgesamt geringen Windgeschwindigkeiten: im Mittel 1,75 m/s.

## 9.2 Messnetz Biomonitoring – 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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1).

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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1). 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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1).

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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1). Die Entfernung zur Verbindungsstraße ED5 beträgt etwa 50 m. Diese Verbindungsstraße war 2023 für den Durchgangsverkehr gesperrt, wurde aber dennoch vorwiegend von landwirtschaftlichen und Bau-Fahrzeugen befahren. Im aktuellen Berichtsjahr 2024 war sie wieder geöffnet. 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



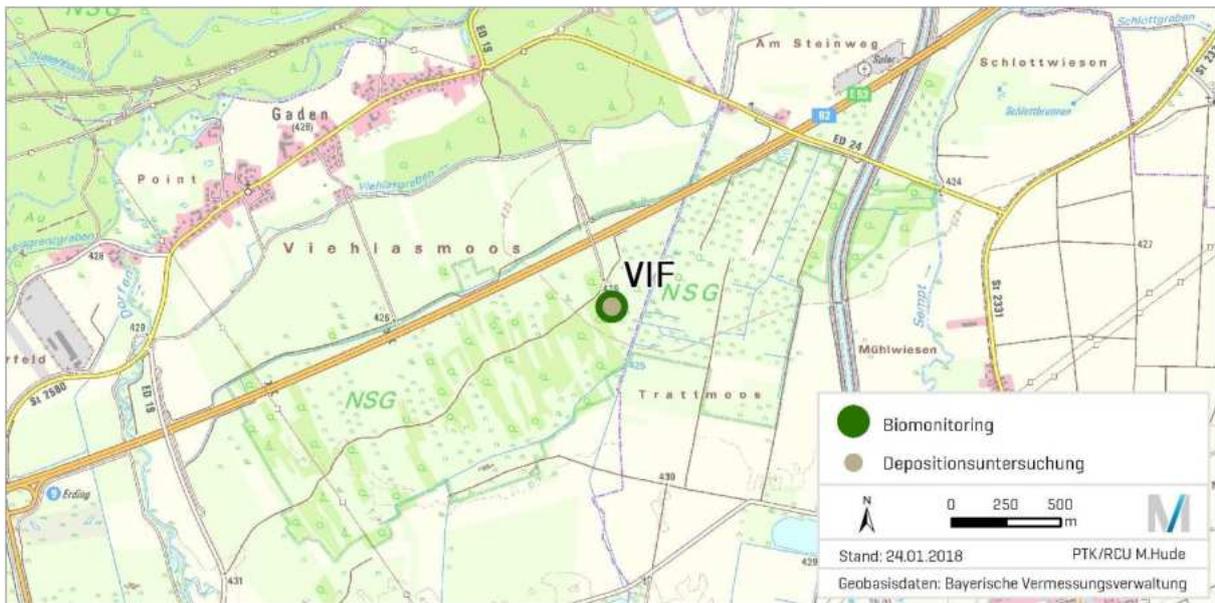
**Bild 9.2-4: MEF Karte (oben) und Foto (unten)**

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

### Messpunkt VIF

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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1). Der Messpunkt VIF pausierte im Jahr 2022.

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



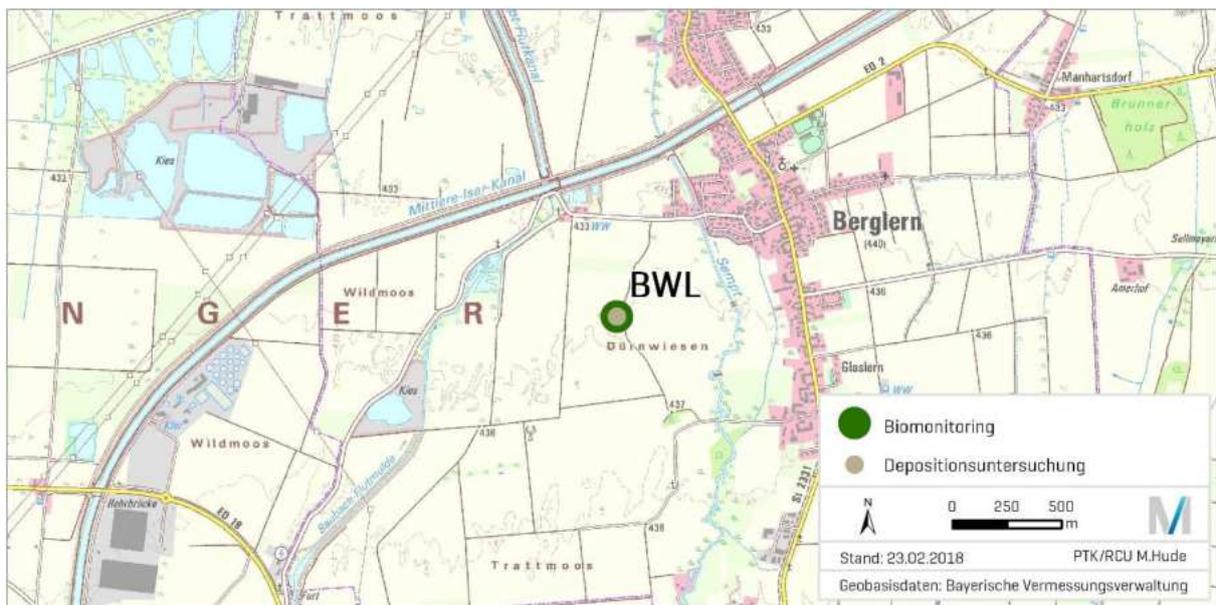
**Bild 9.2-5: VIF Karte (oben) und Foto (unten)**

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

## Messpunkt BWL

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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1). Der Messpunkt BWL pausierte 2022.

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



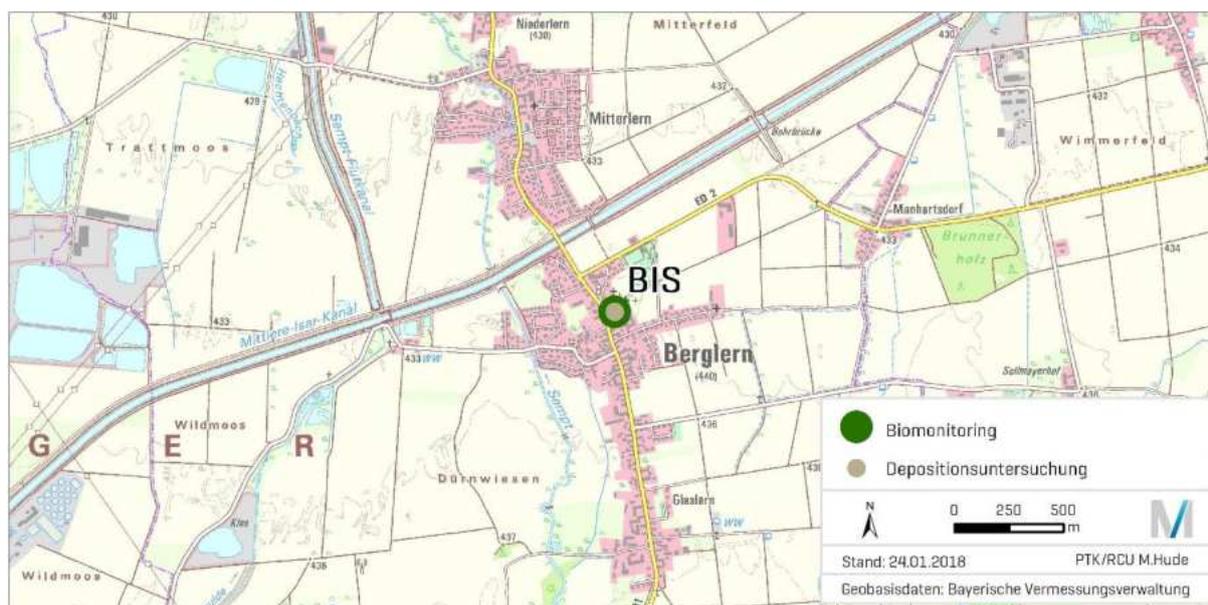
**Bild 9.2-6: BWL Karte (oben) und Foto (unten)**

[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 seitdem ca. 85 m und zu Parkplatz / Bushaltestelle etwa 60 m. Der Messpunkt liegt etwa 8 km östlich der nördlichen Start- und Landebahn des Flughafens (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1). 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

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 (Tabelle 2.1-1 und Bild 2.1-1). Die Verbindungsstraße ED7 liegt etwa 1 km in nördlicher Richtung, die nächsten Gehöfte liegen etwa 2 km in südlicher Richtung entfernt. Der Messpunkt RNL pausierte 2022.

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 2024

Graskultur 2024				
Aluminium [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,4				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	13	24	26	21
MWF	16	41	43	33
AWL	16	110	29	51
MEF	15	27	33	25
VIF	9,4	25	24	19
BWL	35	37	31	34
BIS	9,4	20	22	17
RNL	18	40	40	33
OmH:	79		568	Max. Immissions-Wert

Graskultur 2024				
Bismut [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,0025				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	0,0013	0,0013	0,0025	0,0017
MWF	0,0013	0,0039	0,0052	0,015
AWL	0,0036	0,0033	0,0041	0,0037
MEF	0,0030	0,0054	0,0038	0,0041
VIF	0,0013	0,0029	0,0031	0,0024
BWL	0,0013	0,0026	0,0034	0,0024
BIS	0,0013	0,0013	0,0029	0,0018
RNL	0,0013	0,0048	0,0051	0,0037
OmH:	0,0073			

Graskultur 2024				
Chrom [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,012				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	0,084	0,17	0,18	0,14
MWF	0,14	0,19	0,24	0,19
AWL	0,13	0,37	0,20	0,23
MEF	0,15	0,20	0,20	0,18
VIF	0,11	0,17	0,15	0,14
BWL	0,16	0,18	0,25	0,19
BIS	0,083	0,22	0,12	0,14
RNL	0,089	0,26	0,21	0,19
OmH:	0,37		57	Max. Immissions-Wert

Graskultur 2024				
Eisen [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,15				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	38	56	60	51
MWF	45	66	75	62
AWL	63	122	68	84
MEF	43	61	71	58
VIF	36	55	54	48
BWL	60	61	68	63
BIS	35	62	69	55
RNL	45	70	79	64
OmH:	104			Max. Immissions-Wert

Graskultur 2024				
Molybdän [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,007				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	0,28	0,51	0,45	0,41
MWF	0,29	0,53	0,56	0,46
AWL	0,33	0,69	0,53	0,52
MEF	0,30	0,46	0,56	0,44
VIF	0,27	0,50	0,40	0,39
BWL	0,30	0,49	0,60	0,46
BIS	0,28	0,59	0,53	0,47
RNL	0,26	0,53	0,55	0,45
OmH:	3,2		11,4	Max. Immissions-Wert

Graskultur 2024				
Nickel [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,015				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	1,3	1,9	1,9	1,7
MWF	1,3	2,0	2,2	1,8
AWL	1,4	2,4	2,0	1,9
MEF	1,4	1,8	2,2	1,8
VIF	1,4	2,0	1,6	1,7
BWL	1,4	2,3	2,0	1,9
BIS	1,2	2,4	1,9	1,8
RNL	1,2	2,0	1,8	1,7
OmH:	5,1		57	Max. Immissions-Wert

Graskultur 2024				
Blei [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,0025				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	0,041	0,059	0,081	0,060
MWF	0,073	0,077	0,104	0,085
AWL	0,044	0,135	0,117	0,099
MEF	0,041	0,076	0,081	0,066
VIF	0,029	0,056	0,072	0,052
BWL	0,052	0,064	0,083	0,066
BIS	0,032	0,074	0,091	0,066
RNL	0,050	0,075	0,10	0,076
OmH:	0,14	Höchstgehalt:	34	Max. Immissions-Wert: 0,9

Graskultur 2024				
Antimon [mg/kg TM] Bestimmungsgrenze: 0,004				
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	0,0065	0,0095	0,014	0,010
MWF	0,016	0,020	0,032	0,023
AWL	0,014	0,018	0,023	0,018
MEF	0,011	0,022	0,020	0,018
VIF	0,0071	0,010	0,013	0,010
BWL	0,010	0,010	0,016	0,012
BIS	0,0076	0,011	0,013	0,011
RNL	0,0085	0,012	0,017	0,013
OmH:				

Graskultur 2024				
Vanadium [mg/kg TM]		Bestimmungsgrenze: 0,007		
Messpunkt	1. Serie	3. Serie	5. Serie	Mittelwert
FMF	0,030	0,045	0,073	0,049
MWF	0,037	0,060	0,110	0,069
AWL	0,041	0,22	0,078	0,11
MEF	0,033	0,053	0,091	0,059
VIF	0,028	0,046	0,071	0,048
BWL	0,075	0,058	0,088	0,074
BIS	0,025	0,042	0,069	0,045
RNL	0,051	0,071	0,11	0,077
OmH:	0,15		11,4	Max. Immissions-Wert

Das Bismut-Maximum an Messpunkt MWF in Serie 3 wurde durch Nachanalyse überprüft und bestätigt. 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 Mittelwerte 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 2024 nicht auf.

Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG *kursiv* dargestellt (traten 2024 nur für Bismut auf).

## 9.4 Metalle in Grünkohl 2024

Grünkohl 2024									
[mg/kg TM]	Aluminium	Bismut	Chrom	Kupfer	Eisen	Molybdän	Blei	Antimon	Vanadium
BG	0,40	0,0025	0,012	0,050	0,15	0,007	0,0025	0,0040	0,007
OmH	38	0,023	0,39	2,7	172	7,8	0,12	0,035	0,090
Messpunkt									
FMF	27	0,023	0,28	1,1	53	4,2	0,090	0,042	0,051
MWF	48	0,043	0,38	2,2	100	5,2	0,095	0,065	0,095
AWL	35	0,022	0,29	1,3	66	2,4	0,10	0,047	0,064
MEF	49	0,025	0,36	1,2	66	3,0	0,12	0,050	0,092
VIF	22	0,012	0,30	1,1	82	7,1	0,054	0,025	0,056
BWL	27	0,014	0,41	1,1	60	5,0	0,062	0,029	0,055
BIS	14	0,008	0,19	0,85	44	2,7	0,043	0,015	0,042
RNL	53	0,042	0,44	1,4	101	3,4	0,12	0,051	0,12
"ein Immissionseinfluss ist anzunehmen, wenn der Messwert $\geq 1,5 \times \text{OmH}$ beträgt" (VDI 3857/2)									
Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG in kursiv dargestellt									

Grünkohl 2024		
[mg/kg FM]	Blei	Trockenrückstand
Messpunkt		(35 °C) [% OS]
FMF	0,019	20,7
MWF	0,018	19,2
AWL	0,022	21,7
MEF	0,026	21,3
VIF	0,012	21,9
BWL	0,012	19,3
BIS	0,009	21,2
RNL	0,022	18,5

Für den Vergleich mit dem Höchstgehalt für Blattkohl-Lebensmittel von 0,30 mg/kg FM (VO (EU) 2023/915; 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) wären mit dem halben Wert der BG *kursiv* dargestellt: kein Bleiwert 2024.

## 9.5 PAK in Graskultur (16 PAK nach EPA) 2024

Graskultur 2024			
Naphthalin [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	3,0	3,6	4,3
MWF	3,5	4,1	4,0
AWL	3,7	4,0	4,3
MEF	3,9	4,0	4,4
VIF	3,8	3,9	4,3
BWL	3,4	3,9	4,1
BIS	3,5	4,2	4,7
RNL	3,8	4,0	4,5

Graskultur 2024			
Acenaphthen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,68	0,56	0,79
MWF	0,75	0,55	1,04
AWL	0,73	0,56	1,19
MEF	0,74	0,97	1,05
VIF	0,56	0,69	0,99
BWL	0,54	0,63	1,14
BIS	0,68	0,69	1,04
RNL	0,62	0,72	1,07

Graskultur 2024			
Acenaphthylen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,82	0,61	0,52
MWF	0,41	0,53	0,68
AWL	0,48	0,60	0,58
MEF	0,68	0,83	0,67
VIF	0,72	0,64	0,59
BWL	0,52	0,66	0,63
BIS	0,63	0,52	0,53
RNL	0,58	0,70	0,57

Graskultur 2024			
Fluoren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	2,0	1,5	2,1
MWF	2,6	1,8	2,9
AWL	2,9	1,7	2,2
MEF	2,5	2,2	2,1
VIF	2,4	1,5	2,0
BWL	1,8	2,0	2,6
BIS	2,3	2,3	2,2
RNL	2,0	2,0	2,2

Graskultur 2024			
Phenanthren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	8,2	9,2	10,4
MWF	10,0	9,5	11,7
AWL	9,8	9,7	11,5
MEF	11,0	11,4	12,2
VIF	8,7	8,3	10,9
BWL	7,3	9,6	9,6
BIS	9,6	9,6	10,0
RNL	8,6	10,8	11,3

Graskultur 2024			
Anthracen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,27	0,39	0,56
MWF	0,32	0,47	0,68
AWL	0,38	0,63	0,51
MEF	0,42	0,57	0,50
VIF	0,38	0,53	0,55
BWL	0,28	0,43	0,45
BIS	0,46	0,59	0,67
RNL	0,36	0,55	0,54

Graskultur 2024			
Fluoranthen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	2,0	2,1	2,8
MWF	2,5	2,5	3,4
AWL	2,5	2,4	3,4
MEF	3,9	2,7	4,1
VIF	2,2	2,2	2,9
BWL	1,8	2,1	2,9
BIS	2,8	1,9	3,1
RNL	2,1	2,3	3,1

Graskultur 2024			
Pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	2,4	1,9	2,0
MWF	2,4	2,2	4,4
AWL	2,0	1,8	3,1
MEF	3,5	2,3	3,4
VIF	1,6	1,8	2,4
BWL	1,6	2,4	2,5
BIS	2,1	1,7	2,6
RNL	1,8	2,0	2,8

Graskultur 2024			
Benz[a]anthracen [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,30	0,32	0,49
MWF	0,38	0,35	0,48
AWL	0,31	0,34	0,53
MEF	0,35	0,39	0,74
VIF	0,28	0,36	0,57
BWL	0,29	0,34	0,53
BIS	0,43	0,38	0,71
RNL	0,23	0,35	0,59

Graskultur 2024			
Chrysen [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,54	0,41	0,89
MWF	0,54	0,66	1,32
AWL	0,69	0,58	0,99
MEF	0,87	0,79	1,51
VIF	0,47	0,40	1,32
BWL	0,65	0,56	1,06
BIS	0,67	0,52	1,04
RNL	0,60	0,50	1,01

Graskultur 2024			
Benzo[b]fluoranthen [ $\mu\text{g}/\text{kg TI}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,54	0,49	0,86
MWF	0,56	0,37	1,06
AWL	0,68	0,47	0,93
MEF	1,01	0,69	1,30
VIF	0,50	0,38	0,73
BWL	0,52	0,48	0,75
BIS	0,59	0,42	0,96
RNL	0,41	0,39	0,81

Graskultur 2024			
Benzo[k]fluoranthen [ $\mu\text{g}/\text{kg TI}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,21	0,11	0,44
MWF	0,20	0,19	0,64
AWL	0,27	0,20	0,54
MEF	0,50	0,23	0,51
VIF	0,20	0,21	0,43
BWL	0,23	0,23	0,44
BIS	0,30	0,20	0,52
RNL	0,22	0,20	0,51

Graskultur 2024			
Dibenz[ah]anthracen [ $\mu\text{g}/\text{kg T}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,050	0,050	0,13
MWF	0,050	0,050	0,13
AWL	0,050	0,050	0,16
MEF	0,11	0,12	0,13
VIF	0,12	0,10	0,050
BWL	0,050	0,12	0,050
BIS	0,12	0,11	0,050
RNL	0,050	0,10	0,050

Graskultur 2024			
Benzo[ghi]perylene [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,17	0,24	0,48
MWF	0,23	0,35	0,69
AWL	0,37	0,27	0,62
MEF	0,49	0,39	0,61
VIF	0,25	0,35	0,52
BWL	0,27	0,29	0,46
BIS	0,34	0,25	0,46
RNL	0,28	0,24	0,60

Graskultur 2024			
Indeno[1,2,3-cd]pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,20	0,17	0,44
MWF	0,20	0,22	0,54
AWL	0,23	0,19	0,54
MEF	0,49	0,23	0,53
VIF	0,20	0,21	0,42
BWL	0,20	0,20	0,39
BIS	0,32	0,22	0,42
RNL	0,27	0,19	0,53

Graskultur 2024			
Benzo[a]pyren [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ] Bestimmungsgrenze: 0,1			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	0,27	0,20	0,34
MWF	0,24	0,22	0,44
AWL	0,38	0,24	0,44
MEF	0,60	0,36	0,39
VIF	0,25	0,29	0,38
BWL	0,26	0,24	0,39
BIS	0,37	0,31	0,38
RNL	0,26	0,26	0,55
OmH / Serie	0,53	0,33	0,70

Graskultur 2024			
PAK4 [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ]		Bestimmungsgrenze: 0,1	
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	1,7	1,4	2,6
MWF	1,7	1,6	3,3
AWL	2,1	1,6	2,9
MEF	2,8	2,2	3,9
VIF	1,5	1,4	3,0
BWL	1,7	1,6	2,7
BIS	2,1	1,6	3,1
RNL	1,5	1,5	3,0
OmH / Serie	2,5	2,1	4,5

Graskultur 2024			
Summe 16 PAK (EPA) [ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ]			
Messpunkt	1.-3. Serie	4. Serie	5. Serie
FMF	22	22	27
MWF	25	24	34
AWL	25	24	32
MEF	31	28	34
VIF	23	22	29
BWL	20	24	28
BIS	25	24	29
RNL	22	25	31
OmH / Serie	33	30	43

Benzo[a]pyren-, PAK4- und S16PAK-Werte, die abzüglich Standardunsicherheit  $u$  den OmH überschreiten würden, wären blassorange unterlegt. Sie traten 2024 nicht auf.

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) 2024

Grünkohl 2024																				
[ $\mu\text{g}/\text{kg TM}$ ]	Naphthalin	Acenaphthen	Acenaphthylen	Fluoren	Phenanthren	Anthracen	Fluoranthren	Pyren	Benzo[a]anthracen	Chrysen	Benzo[b]fluoranthren	Benzo[k]fluoranthren	Benzo[e]pyren	Dibenz[a,h]anthracen	Benzo[ghi]perylen	Indeno[1,2,3-cd]pyren	Summe 16 PAK (EPA)	PAK4	Gefriertrocknung	Frischmasse
BG	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
OmH													2,6				145	29		
Messpunkt																				
FMF	9,7	1,9	0,48	3,8	19	1,2	21	14,5	2,7	9,0	3,4	1,6	1,4	0,26	1,5	1,7	93	16	21	75
MWF	9,2	1,7	0,49	3,2	17	1	19	14,3	2,7	9,3	3,5	1,6	1,6	0,29	1,7	1,9	88	17	19	83
AWL	10,3	1,9	0,53	4,8	22	1,4	23	16,3	4,0	10,8	4,3	2,0	1,9	0,32	2,0	2,3	108	21	23	78
MEF	11,2	2,0	0,53	4,4	27	1,5	26	17,2	3,5	11,3	3,5	1,7	1,7	0,32	1,9	2,2	116	20	21	71
VIF	9,4	1,5	0,51	4,0	23	1,0	26	16,1	2,8	8,7	3,0	1,6	1,4	0,23	2,0	2,2	103	16	19	81
BWL	10,1	1,6	0,42	3,7	22	1,0	26	16,5	3,4	9,7	2,7	1,4	1,3	0,20	1,3	1,5	102	17	21	74
BIS	10,4	1,4	0,50	4,2	31	2,0	22	14,3	4,6	9,2	2,8	1,5	1,5	0,13	1,2	1,5	107	18	22	82
RNL	9,9	1,6	0,60	4,2	25	1,3	23	15,8	4,1	11,5	3,3	2,1	1,9	0,35	2,1	2,4	108	21	19	84

**blassorange:** Ein Immissions Einfluss liegt vor, wenn ein Gehalt abzüglich Standardunsicherheit  $u$  (18% für Benzo[a]pyren, 35% für PAK4, 20% für S16PAK) den OmH überschreitet. Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG) sind mit dem halben Wert der BG in *kursiv* dargestellt.

Benzo[a]pyren-, PAK4- und S16PAK-Werte, die abzüglich Standardunsicherheit  $u$  den OmH überschreiten würden, wären blassorange unterlegt. Sie traten 2024 nicht auf.