



Abschlussbericht

**Umweltmonitoring 2020 -
Optimierung des immissionsöko-
logischen Umweltmonitorings im LfU**

OPTIMON



analytik



Abschlussbericht

**Umweltmonitoring 2020 -
Optimierung des immissionsöko-
logischen Umweltmonitorings im LfU**

OPTIMON

Projektlaufzeit: 01. April 2020 bis
30. September 2024

Impressum

Umweltmonitoring 2020 - Optimierung des immissionsökologischen Umweltmonitorings im LfU - OPTIMON

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de/

Projektleitung:

Korbinian Freier, Michael Gierig, Jutta Köhler, LfU

Autoren:

Christa Barkschat, Patricia Darmstadt, Korbinian Freier, Michael Gierig, Jutta Köhler, Margit Krapp, LfU

Analytik:

Umweltbundesamt Laboratories (U), Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Analytik Institut Rietzler (AIR), DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW)

Kooperationspartner:

Lech-Stahlwerke GmbH (LSW)
TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Umweltbundesamt GmbH Österreich (UBA-GmbH)
Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, Zugspitze
Umweltmonitoring Wäber

Bildnachweis:

Quelle LfU

Stand:

September 2024

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	12
1 Einleitung	14
2 Vorgehensweise und Ergebnisse	15
2.1 Arbeitspaket 1: UFS Schneesfernerhaus – Aushängeschild für den Schutz der Alpen	15
2.1.1 Vorgehensweise	15
2.1.2 Ergebnisse	18
2.2 Arbeitspaket 2: Erweiterung des Stoffspektrums – Erprobung von „Non-Target“-Techniken	25
2.2.1 Vorgehensweise	25
2.2.2 Ergebnisse	27
2.3 Arbeitspaket 3: Überprüfung der immissionsbezogenen Monitoring-Aktivitäten des LfU - Entwicklung eines Gesamtkonzeptes unter Einbeziehung der UFS	31
2.3.1 Vorgehensweise	31
2.3.2 Ergebnisse	32
2.4 Arbeitspaket 4: Stärkung der innerdeutschen und europäischen Zusammenarbeit	36
2.4.1 Vorgehensweise	36
2.4.2 Ergebnisse	36
2.5 Arbeitspaket 5: Fortführung und Weiterentwicklung der immissionsbezogenen Umweltkommunikation	37
2.5.1 Vorgehensweise	37
2.5.2 Ergebnisse	37
3 Umweltmonitoring in der Praxis: Luftqualitätsuntersuchungen im Umfeld der Lech-Stahlwerke Meitingen	38
3.1 Ausgangssituation	38
3.2 Aufgabenstellung	38
3.3 Zielsetzung	39
3.4 Messpunkte, Stoffspektrum und Methoden	39
3.5 Ergebnisse	43
3.5.1 Immissions- und Depositionsmessungen	43
3.5.2 Biomonitoring von Schadstoffen aus der Luft	45
4 Zusammenfassung	72
5 Konsequenzen aus den Ergebnissen – weiterer Handlungsbedarf	73

6	Literatur und Quellen	75
7	Anhang	78
7.1	Anhang Flammschutzmittel Analytik	78
7.2	Anhang Ergebnisse FSM-Innenraummessungen	81
7.3	Anhang PFAS Analytik	82
7.3.1	Anhang Feldblindwerte PFAS	87
7.3.2	Anhang Vergleich Bergerhoff – E-Bulk	88
7.4	Anhang Messpunkte Lech-Stahlwerke	90
7.5	Anhang Metalle in Graskultur	100
7.6	Anhang Löwenzahnscreening	116

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Hoch signifikant abnehmender Gehalt von BDE28 in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023 ($p < 0,005$).	19
Abb. 2:	Gehalt von BDE 209 in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Bei BDE 209 ist kein signifikanter Trend nachweisbar.	20
Abb. 3:	Gehalt von Decabromdiphenylethan (DBDPE) in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Es ist kein signifikanter Trend nachweisbar.	20
Abb. 4:	Gehalt von Hexabromcyclododecan (HBCD, Summe aller Isomere) in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Die Abnahme ist signifikant ($p < 0,1$).	21
Abb. 5:	Gehalt von Pentabromtoluol in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Die Daten weisen keinen signifikanten Trend auf.	21
Abb. 6:	Gehalt von Hexabrombenzol in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Die Daten weisen einen positiven Trend auf, der signifikant ist ($p < 0,1$).	22
Abb. 7:	Gehalte an Flammschutzmitteln in Innenraumlufte und an der Messterrasse der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS). Die Messungen wurden im März/April 2023 durchgeführt.	22
Abb. 8:	Gehalte der beiden neuartigen Flammschutzmittel Pentabromtoluol und Hexabrombenzol in Immissionsproben der Innenräume und der Messterrasse der UFS. Die Messungen wurden im März/April 2023 durchgeführt.	23
Abb. 9:	Gehalte an Organochlorpestiziden in Immissionsproben an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, Zugspitze Deutschland. Die angegebenen Werte geben den Median der Zeiträume 2012 bis 2017 und 2022 bis 2023 wieder.	24
Abb. 10:	Gehalte an Organochlorpestiziden in Immissionsproben am Sonnblick Observatorium, Hoher Sonnblick Österreich. Die angegebenen Werte geben den Median der Zeiträume 2012 bis 2017 und 2022 bis 2023 wieder.	24
Abb. 11:	Fertig eingerichteter Dauerbeobachtungsstandort in Nürnberg. © M. Krapp, LfU.	33
Abb. 12:	Messnetz Umweltmonitoring Stand 2024. Quelle: LfU, Geobasisdaten: Esri Data & Maps	35
Abb. 13:	Windrichtungsverteilung am Standort Lechkanal, Quelle: Schlussbericht Immissions- und Depositionsmessungen an den Lech-Stahlwerken Meitingen: https://www.bestellen.bayern.de/shoplif/luft_00215.htm	41
Abb. 14:	Messpunktekarte Untersuchungen Lech-Stahlwerke. Quelle: GoogleMaps.	42
Abb. 15:	Beprobungsplan für die fünf Messpunkte mit Angabe der Art und Dauer der verschiedenen Untersuchungsverfahren. Löwenzahn wurde an den Messpunkten nur in 2021 beprobt.	43
Abb. 16:	PCDD/F-Gehalte in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.	49
Abb. 17:	Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.	50
Abb. 18:	Gehalte der Indikator-PCB in Graskulturen dargestellt in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.	50

Abb. 19:	Gehalte der PAK in Graskulturen als Summe der 16 PAK nach EPA an den Messpunkten (MP) um die LSW. Dargestellt sind nur die fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen aus 2022. Die Proben aus 2021 konnten wegen zu hohen Bestimmungsgrenzen des beauftragten Labors nicht ausgewertet werden. Von der letzten Probe in 2022 am Referenz-MP liegt ebenfalls keine Analyse vor.	51
Abb. 20:	PCDD/F-Gehalte in Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.	51
Abb. 21:	Gehalte der dioxinähnlichen PCB im Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.	52
Abb. 22:	Gehalte der Indikator-PCB im Grünkohl in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.	52
Abb. 23:	Gehalte der PAK im Grünkohl als Summe der 16 PAK nach EPA an den Messpunkten (MP) um die LSW. Dargestellt ist nur die Messkampagne 2022. Die Proben aus 2021 konnten wegen zu hoher Bestimmungsgrenzen des beauftragten Labors nicht ausgewertet werden.	53
Abb. 24:	PCDD/F-Gehalte in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für PCDD/F.	54
Abb. 25:	Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für dlPCB.	54
Abb. 26:	Gehalte der Indikator-PCB in Graskulturen im Vergleich zum OmH und dem Futtermittel-Höchstgehalt für PCB.	55
Abb. 27:	Gehalte der PAK in Graskulturen als Summe der 16 EPA-PAK im Vergleich zum OmH.	55
Abb. 28:	PCDD/F-Gehalte in Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für PCDD/F.	56
Abb. 29:	Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für dlPCB.	56
Abb. 30:	Gehalte der Indikator-PCB in Grünkohl im Vergleich zum OmH und dem Futtermittel-Höchstgehalt für PCB.	57
Abb. 31:	Gehalte der PAK in Grünkohl als Summe der 16 EPA-PAK im Vergleich zum OmH.	57
Abb. 32:	PCDD/F-Gehalte in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.	58
Abb. 33:	Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.	59
Abb. 34:	PCDD/F-Gehalte im Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.	59
Abb. 35:	Gehalte der dioxinähnlichen PCB im Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.	60

Abb. 36:	Jahresmittelwerte der Cadmium-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg	61
Abb. 37:	Jahresmittelwerte der Aluminium-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg	62
Abb. 38:	Jahresmittelwerte der Chrom-Gehalte in Graskulturen an den LSW, im Hintergrund und an einer städtischen DBS	63
Abb. 39:	Jahresmittelwerte der Chrom-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg	64
Abb. 40:	Jahresmittelwerte der Niob-Gehalte in Graskulturen	64
Abb. 41:	Jahresmittelwerte der Niob-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg	65
Abb. 42:	Jahresmittelwerte der Vanadium-Gehalte in Graskulturen	65
Abb. 43:	Jahresmittelwerte der Vanadium-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg	66
Abb. 44:	Bariumgehalte in Graskultur und Löwenzahn	67
Abb. 45:	Cadmiumgehalte in Graskultur und Löwenzahn	68
Abb. 46:	Zinngehalte in Graskultur und Löwenzahn	69
Abb. 47:	PCB-gesamt in Löwenzahn und Graskultur	70
Abb. 48:	dl-PCB in Löwenzahn und Graskultur	70
Abb. 49:	Dioxine/Furane in Löwenzahn und Graskultur	71
Abb. 50:	PAK 2021 an DBS Augsburg und Ansbach	71
Abb. 51:	PAK 2021 an DBS Augsburg und Ansbach, bezogen auf 100%	71
Abb. 52:	Gehalte an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen in Feldblindwerten (FBW), die an den Standorten Eining (PP-Ball, Trichtersieb), Zugspitze (Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, UFS) und München Oberschleißheim (Deutscher Wetterdienst, DWD) in E-Bulksammlern genommen wurden. Außerdem wurde ein FBW im Bergerhoff-Becher in Eining genommen.	87
Abb. 53:	Gehalt an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen in Depositionsproben genommen mittels E-Bulk oder Bergerhoff. Gezeigt sind die monatlichen Proben von 2023 am Standort Neusling inklusive Trifluoressigsäure (TFA).	88
Abb. 54:	Gehalt an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Depositionsproben genommen mittels E-Bulk oder Bergerhoff. Gezeigt sind die monatlichen Proben von 2023 am Standort Neusling. Die Gehalte an inklusive Trifluoressigsäure (TFA) werden nicht dargestellt. In der Probe von Februar 2023 wurde ein Wert als Ausreißer klassifiziert und ebenfalls ausgeschlossen ($\text{PFMOPrA} = 0,719553811 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$).	89
Abb. 55:	Exposition der Graskulturen am Messpunkt Zollsiedlung. © M. Krapp, LfU.	91
Abb. 56:	Exposition der Graskulturen am Messpunkt Herbertshofen. © M. Krapp, LfU.	93
Abb. 57:	Exposition der Graskulturen am Messpunkt Lechkanal. © M. Krapp, LfU.	95
Abb. 58:	Exposition der Graskulturen am Messpunkt Naturschutzgebiet. © M. Krapp, LfU.	97
Abb. 59:	Exposition der Graskulturen am Referenzmesspunkt. © M. Krapp, LfU.	99
Abb. 60:	Aluminium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	102

Abb. 61:	Aluminium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	102
Abb. 62:	Arsen: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	102
Abb. 63:	Arsen: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	103
Abb. 64:	Barium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	103
Abb. 65:	Barium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	103
Abb. 66:	Bismut: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	104
Abb. 67:	Bismut: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	104
Abb. 68:	Cadmium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	104
Abb. 69:	Cadmium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	105
Abb. 70:	Cer: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	105
Abb. 71:	Cer: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	105
Abb. 72:	Kobalt: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	106
Abb. 73:	Kobalt: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	106
Abb. 74:	Chrom: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	106
Abb. 75:	Chrom: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	107
Abb. 76:	Kupfer: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	107
Abb. 77:	Kupfer: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	107
Abb. 78:	Eisen: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	108
Abb. 79:	Eisen: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	108
Abb. 80:	Quecksilber: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	108
Abb. 81:	Quecksilber: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	109
Abb. 82:	Lanthan: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	109
Abb. 83:	Lanthan: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	109
Abb. 84:	Mangan: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	110
Abb. 85:	Mangan: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	110
Abb. 86:	Niob: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	110
Abb. 87:	Niob: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	111
Abb. 88:	Nickel: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	111
Abb. 89:	Nickel: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	111
Abb. 90:	Blei: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	112
Abb. 91:	Blei: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	112
Abb. 92:	Antimon: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	112
Abb. 93:	Antimon: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	113
Abb. 94:	Zinn: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	113
Abb. 95:	Zinn: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	113
Abb. 96:	Thallium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	114
Abb. 97:	Thallium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	114

Abb. 98:	Vanadium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	114
Abb. 99:	Vanadium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	115
Abb. 100:	Zink: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS	115
Abb. 101:	Zink: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg	115

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Eckdaten der Probenahmen zur Überprüfung von Flammschutzmittelemissionen an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus und Ermittlung von Alternativstandorten ohne lokale Emissionsquellen.	16
Tab. 2:	Vergleich der unterschiedlichen Adsorptionsmaterialien für die Immissionskartuschen zur Bestimmung von Organochlorpestiziden.	17
Tab. 3:	Arithmetischer Mittelwert der Immissionskonzentrationen halogener Flammschutzmittel in pg/m^3 an der Zugspitze (UFS Schneefernerhaus) in den in der Tabelle angegebenen Messperioden. Fett markiert sind die Werte von Substanzen, bei denen sich Zunahmen in den Konzentrationen beobachten lassen.	18
Tab. 4:	Gehalt an Trifluoressigsäure (TFA) in Depositionsproben, die mittels Bergerhoff-Becher an den Standorten Zugspitze (UFS), Neusling (NES) und Ansbach (ANS) genommen wurden.	28
Tab. 5:	Gehalt an Trifluoressigsäure (TFA) in Depositionsproben (Gesamtdeposition), die mittels E-Bulk an folgenden Standorten genommen wurden: Grassau (GRA), Bidingen (BID), Möhrendorf (MOE), Neusling (NES), Ansbach (ANS), Zugspitze (UFS), Eining (EIN) und München – Oberschleißheim (OSH).	28
Tab. 6:	Depositionsraten von Trifluoressigsäure (TFA) an unterschiedlichen Standorten in Deutschland. Studie von Freeling et al. 2020. ES := Essen, GW := Greifswald, MO := München – Oberschleißheim, PD := Potsdam, SU := Stuttgart, SW := Schleswig, WK := Wasserkuppe, BR := Brocken. aNasse Deposition. b Gesamtdeposition. Die Proben wurden von Februar 2018 bis Februar 2019 gesammelt. Sammelzeitraum über einen Monat.	28
Tab. 7:	Gehalt an Perfluorbutansäure (PFBA) in Depositionsproben, die mittels Bergerhoff-Becher an den Standorten Zugspitze (UFS), Neusling (NES) und Ansbach (ANS) genommen wurden.	29
Tab. 8:	Gehalt an Perfluorbutansäure (PFBA) in Depositionsproben, die mittels E-Bulk an verschiedenen Standorten in Bayern: Grassau (GRA), Bidingen (BID), Möhrendorf (MOE), Neusling (NES), Ansbach (ANS), Zugspitze (UFS), Eining (EIN) und München – Oberschleißheim (OSH).	29
Tab. 9:	Wiederfindungsrate von PFAS in Depositionsproben aus Bayern sortiert nach Kettenlänge und Säuretyp.	30
Tab. 10:	Ausstattung und Analytik am Dauerbeobachtungsstandort Nürnberg	32
Tab. 11:	Beschreibung des Luftsammlers DIGITEL Low Volume Samplers DPA-SEQ.	33
Tab. 12:	Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) für Metalle in Graskultur (2013-2022) sowie überregionale $\text{OmH}_{\text{ür}}$ (jeweils in $[\text{mg}/\text{kg TS}]$)	48
Tab. 13:	Parameterspektrum der analysierten Flammschutzmittel	78
Tab. 14:	Luftkonzentrationen halogener Flammschutzmittel in pg/Nm^3 an der Zugspitze (UFS) von Oktober 2019 bis September 2023. Ein Messwert gilt als gültig, wenn er das Zweifache des Laborblindwerts oder des Feldblindwerts übersteigt. Der zweifache FBW oder LBW entspricht dann der Bestimmungsgrenze. War der Messwert niedriger, wurde dies mit < 2 FBW (a) oder < 2 LBW (b) eingetragen. War der Messwert niedriger als die instrumentelle Bestimmungsgrenze des Verfahrens (LOQ) wurde dies mit $< \text{LOQ}$ gekennzeichnet. Das Abbauprodukt von anti Dechloran Plus „aCl10DP“ lag immer unter der instrumentellen	

	Bestimmungsgrenze. Die Wiederfindung von BTBPE war nicht gegeben. Beide Substanzen können entsprechend nicht ausgewertet werden.	79
Tab. 15:	Ergebnisse der Kontrollmessungen von Flammenschutzmitteln in Immissionsproben an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS).	81
Tab. 16:	Substanzspektrum für externe Analytik 2021 von Depositionsproben (TZW).	82
Tab. 17:	Substanzspektrum für externe Analytik 2022 von Depositionsproben (TZW). Bestimmungsgrenze 1 ng/L.	83
Tab. 18:	Substanzspektrum für externe Analytik 2023 von Depositionsproben durch Analytik Institut Rietzler (AIR).	84
Tab. 19:	Überprüfung einzelner Materialien, die bei der Depositionsprobenahme verwendet werden.	85
Tab. 20:	Unterschiedliche Gehalte an PFAS in Teilen des Messsystems E-Bulk.	86
Tab. 21:	Elemente in Graskultur: Messwerte 2021 / 2022 je Standort und Kampagne in [mg/kg TS]; kursiv: Messwert unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (BG) mit Angabe BG; rot: Überschreitung des OmH	100

Kurzfassung

Das Projekt „OPTIMON – Umweltmonitoring 2020 - Optimierung des immissionsökologischen Umweltmonitorings im LfU“ verfolgte als ein Ziel ein Langzeitmonitoring sicherzustellen, das den atmosphärischen Eintrag von Stoffen erfasst. Dabei wurde ein Schwerpunkt auf persistente organische Schadstoffe (POP) gelegt. Entsprechend wurde das Monitoring an der Zugspitze, das bisher im Rahmen von verschiedenen Projekten erfolgt ist, in das immissionsökologische Messnetz eingegliedert und eine Referenzstation in Nürnberg eröffnet, um die Gehalte an POP in Außenluft sowohl in den Alpen als auch im Flachland zu überwachen. Im Gegenzug wurden bisherige Immissionsökologischen Messungen in ihrem Umfang reduziert, um entsprechende Kapazitäten verfügbar zu machen. Hierzu wurden Probenanzahlen reduziert, Sammelmethode evaluiert und Qualitätsmaßnahmen gesichert.

Die Immissionsmessungen zu polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF), bromierten und chlorierten Flammschutzmitteln (FSM) und Organochlorpestiziden (OCP) zeigen größtenteils abnehmende Konzentrationen. Keine Veränderung in den Außenluftkonzentrationen zeigen sich bei PCB-Konzentrationen der Zugspitze, sowie bei einigen FSM (BDE 209 und Pentabromtoluol (PBT)).

Für per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) zeigen die Messungen der Deposition, dass vor allem kurzkettige PFAS im bayerischen Messnetz gefunden werden. Während die Depositionsrate für die meisten PFAS eher gering ausfällt ($< 0,01 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$), ist die Deposition von Trifluoressigsäure (TFA) deutlich höher mit einem Median von $0,73 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ bis $0,76 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, je nach Sammelmethode (Bergerhoff bzw. E-Bulk). Diese Werte liegen deutlich über dem deutschen Median von $0,357 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. Damit bestätigen die Messungen die im Allgemeinen sehr hohen und ubiquitären Einträge von TFA. Zu erklären sind die Gehalte von TFA im Niederschlag zum großen Teil durch die photochemische Oxidation bestimmter Fluorkohlenwasserstoffe, sogenannter F-Gase, in der Atmosphäre. Da zukünftig fluorierte Gase mit geringerem Treibhauspotential wie R1234yf, R1234ze(E) und R1233zd(E) in z.B. Kälte- und Klimaanlage eingesetzt werden, die in der Atmosphäre zu TFA abgebaut werden, wird hier noch mit einer Zunahme gerechnet. Für TFA wurde zwar bisher keine ausgesprochene akute Toxizität nachgewiesen, allerdings stellt es eine höchst persistente und mobile Substanz dar, die bereits im Grundwasser nachgewiesen wurde.

Der Eintrag von persistenten Chemikalien in die Umwelt wird durch überregionale Einträge wesentlich mitbestimmt, was einen Abgleich mit bestehenden Monitoringaktivitäten in Bayern, Deutschland und Europa notwendig macht. Dies wurde ebenfalls als ein Projektziel festgelegt. Neben Zusammenarbeiten wie bei den Vorhaben PESPAT ([LINK](#)), Interreg-ProtectBats ([LINK](#)) und der Fortführung der Kooperation mit der Umweltbundesamt GmbH (UBA-GmbH) Österreich, wurde durch die amtsinterne Zusammenarbeit mit der Abteilung Luft, Lärm und Anlagensicherheit zu Untersuchungen an den Lechstahlwerken ein Abgleich und Austausch innerhalb Bayerns intensiv gefördert. Mit den standardisierten Verfahren der Bioindikation werden die Immissionsmessungen am Stahlwerk erfolgreich unterstützt und die betroffenen Bürger verständlich und nachvollziehbar informiert. Zusätzlich wurde der Austausch mit dem Luftmessnetz des Umweltbundesamtes Deutschland und des Deutschen Wetterdienstes im Rahmen der POP-Messungen etabliert. Für den deutschlandweiten Abgleich wurde unter anderem Gremienarbeit, die Leitung eines Workshops bei der Umweltbeobachtungskonferenz 2021 in engem Austausch mit der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Umweltbundesamt GmbH Österreich (UBA-Ö), Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Workshop zum Abschluss des Projektes im Juni 2024 genutzt.

Ein weiteres Projektziel ist die Stärkung des Beitrags Bayerns zur europäischen und internationalen Schadstoffregulierung. Hier wurde zunächst der Grundstein gelegt, dass die Messdaten der Zugspitze automatisch an die immissionsökologische Datenbank des LfU weitergeleitet werden. Eine Vorlage zur Übertragung älterer Daten wurde erarbeitet. Somit können die Daten zukünftig schneller abgerufen werden. Außerdem ist nun eine Schnittstelle möglich, um ausgewählte Daten beispielsweise an die IPCHEM weiterzuleiten und so leicht abrufbar zu machen für Recherchearbeiten im Rahmen von Beschränkungsverfahren der ECHA. Darüber hinaus wurden die Messdaten zu persistenten organischen Schadstoffen dem Global Monitoring Programm der UNEP über das Data Warehouse zur Verfügung gestellt.

Als viertes Ziel wurde die Verbesserung der immissionsbezogenen Umweltkommunikation zum Eintrag anthropogener Schadstoffe in die Umwelt verfolgt. In einem Kooperationsprojekt mit der Hochschule Macromedia wurde eine Publikation zum Thema Quecksilber erstellt, die leicht verständlich und optisch ansprechend, die Bedeutung des Umweltmonitorings vermittelt (https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_all_00170.htm). Ebenfalls wurde eine Publikation zum Thema Schadstoffe in den Alpen veröffentlicht, die die Messdaten und Bewertungen ansprechend und auch für Laien leicht verständlich darstellt (https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_all_00173.htm). Zusätzlich wurden Fachvorträge gehalten.

1 Einleitung

Das Verhalten von Chemikalien in der Umwelt ist höchst komplex und schwer vorherzusehen. Umweltmonitoring hilft bei der Aufklärung des Umweltverhaltens, dient der Überprüfung von Modellierungen sowie der Erfassung von Hintergrundkonzentrationen und der Erkennung von Trends. Auf diese Weise können problematische Stoffe identifiziert und ihre Entwicklung überwacht werden. Diese Erkenntnisse können in Regulierungsverfahren eingebracht und genutzt werden um Einträge so gering wie möglich zu halten. Dabei gilt: Je früher problematische Stoffe im Sinne eines Frühwarnsystems erkannt werden desto schneller kann eine Regulierung erfolgen.

Diese wichtigen Funktionen werden auch bei der Umsetzung des EU-Aktionsplans „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“ (EC 2021, [Link](#)) und dem dazugehörigen „Null-Schadstoff-Überwachungs- und Prospektivrahmen“ benötigt, um die Konzentration von Schadstoffen auf einen Gehalt zu reduzieren, der weder umwelt- noch gesundheitsschädlich ist.

Mit dem Standort der Sammelgeräte für die Immission und Deposition an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) auf der Zugspitze können seit 2005 wichtige Erfolge der Regulierung von potenziell problematischen Chemikalien nachgewiesen werden. Entwicklungen und Trends von Stoffkonzentrationen werden an die jeweils zuständigen Behörden gemeldet, um so den Einsatz von Substanzen frühzeitig zu begrenzen oder gänzlich durch Substitute zu vermeiden. Messungen an der UFS belegen, dass persistente organische Schadstoffe (POPs, persistent organic pollutants) auch in großer Entfernung zu ihren Emissionsorten in die Alpen transportiert werden können. Die meisten persistenten Umweltchemikalien werden dort in verhältnismäßig geringen Konzentrationen in der Luft gemessen. Trotz ihrer geringen Konzentrationen geben sie wichtige Hinweise über regionale und globale Entwicklungen in der Chemikalienanwendung.

Zusätzlich zeigt sich, dass durch die besonderen klimatischen Bedingungen auf der Zugspitze Schadstoffe über die atmosphärische Deposition verstärkt eingetragen werden können. Diese sogenannte Kältefalle aber auch weitere Faktoren wie Niederschlagsraten, Wechselwirkung der atmosphärischen Schichten und Extremwetterlagen beeinflussen den Transport von Chemikalien über die Atmosphäre in die Umwelt. Gerade POPs sind problematisch für Ökosysteme, da sie sich über Nahrungsketten anreichern. Dass POPs, aber auch Quecksilber als anorganischer Schadstoff, in alpinen Ökosystemen nachweisbar sind, konnte im Rahmen des Vorhabens PureAlps von 2016 bis 2020 sowie verschiedener Vorgänger-Projekte gezeigt werden (LfU 2021, [Link](#)).

Neben dem alpinen Standort an der UFS kann das LfU auf langjährige Messreihen aus dem immissionsökologischen Monitoring bis in die 1970er Jahre für das Flachland zurückgreifen. Dazu zählen die Dauerbeobachtungsstationen und das Depositionsmessnetz. Über diese Messnetze werden wichtige Hintergrundwerte bereitgestellt, die immer wieder zur Beurteilung von Emissionen herangezogen werden. Das aktive Biomonitoring mit Weidelgras und Grünkohl als Indikatorpflanzen hat eine hohe Praxisrelevanz und wird auch immer wieder zur vergleichenden Bewertung der Luftqualität eingesetzt (siehe Kapitel 3 zum Projekt Lech-Stahlwerke). Auch der Flughafen München setzt auf dieses Verfahren und vergleicht die dort gewonnenen Daten mit den Hintergrundwerten, die durch das bayerische Biomonitoring bereitgestellt werden.

Ziel des vorliegenden Projektes war die Optimierung des immissionsökologischen Umweltmonitorings am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) im Flachland wie in den Alpen. Dazu zählt die Erarbeitung eines langfristigen Monitoringkonzeptes für Umweltchemikalien in Atmosphäre und Deposition.

Der Eintrag von persistenten Umweltchemikalien wird durch überregionale Einträge mitbestimmt. Für ein effektives Umweltmonitoring ist daher ein intensiver Austausch und Abgleich verschiedener

nationaler als auch internationaler Monitoringaktivitäten notwendig. Eine europäische Zusammenarbeit ist wichtig um den Eintrag von Stoffen sinnvoll zu reduzieren, was letztendlich nur über einen Beitrag zur europäischen Chemikalienregulierung gewährleistet werden kann. Es gilt die Bereitstellung der gewonnenen Daten aus den Monitoringaktivitäten leicht verfügbar zu machen oder bestenfalls automatisiert in Regulierungsverfahren einfließen zu lassen. Gleichzeitig ist es wichtig die Wahrnehmung der Bedeutung von Umweltmonitoring in der Öffentlichkeit zu fördern. Die Aufgabe der immissionsbezogenen Umweltkommunikation zum Eintrag anthropogener Schadstoffe in die Umwelt ist es, aufzuklären ohne Ängste zu schüren und den Zweck einer Chemikalienregulierung verständlich zu machen.

In fünf Arbeitspaketen wurden diese Ziele realisiert und werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

2 Vorgehensweise und Ergebnisse

2.1 Arbeitspaket 1: UFS Schneefernerhaus – Aushängeschild für den Schutz der Alpen

2.1.1 Vorgehensweise

POP-Monitoring an der UFS - Regelbetrieb

Seit 2005 wird über diverse Projekte das Umweltmonitoring von persistenten Schadstoffen in der Atmosphäre und deren Eintrag über Deposition an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) gewährleistet. Im Rahmen des Projektes OPTIMON wurden die bisher projektgebundenen Aufgaben in ein gesichertes Langzeitmonitoring übergeben.

2020 bis 2024 wurden die Messungen durch das Projekt OPTIMON gewährleistet und seit 2022 in den Regelbetrieb überführt. Dazu zählen die Messungen von polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F), polychlorierten Biphenylen (PCB), säurestabilen halogenierten Flammenschutzmitteln (FSM) und Organochlorpestiziden (OCP). Substanzen der genannten Stoffgruppen werden sowohl in der Immission als auch in der Deposition bestimmt. Die Probenahmen werden einmal pro Quartal durchgeführt.

Die Vorbereitung der Probenahmekartuschen (am LfU und am UBA-Ö), die Probenahme, die Aufarbeitung der Proben, die Messungen in den jeweiligen Laboren und die Auswertung der Messdaten erfolgten nach den Methoden aus dem Pure Alps Bericht (siehe Abschlussbericht PureAlps, LfU 2021). Das Einzelsubstanzspektrum für Flammenschutzmittel ist unter Tab. 13 im Anhang gelistet.

Während der Projektlaufzeit wurden neben den regelmäßigen Wartungen (Filteraustausch und Wechsel von Kohleschiebern an den aktiven Luftsammlern) auch Reparaturen durchgeführt um den Regelbetrieb zu erhalten. Durch den Austausch einer Filtermatte und eines Thermoelements konnte 2021 ein Luftsammler wieder in Betrieb genommen werden. Reparaturen erfolgten auch an den Deposition-Kartusche-Sammelsystemen (AirLabs) der Firma Kroneis (Austausch von gebrochenen Glastrichtern in 2021, Erneuerung der Heizdrähte in 2023). Außerdem zeigte sich, dass die Kohleschieberpumpe des High-Volume-Sammlers in seiner Leistung abnahm und der benötigte Volumenstrom nicht mehr erreicht werden konnte. Dies machte einen Austausch der Kohleschieberpumpe mit einem neueren System notwendig. Es wurde ein Seitenkanalverdichter (Typ ASV0015-ASV0035) gewählt.

POP-Monitoring an der UFS - FSM Ausweichstandorte

Bromierte und chlorierte Flammschutzmittel (FSM) konnten in den Immissions- und Depositionsproben von 2017 bis 2020 (LfU 2021) in fast jeder Probe gefunden werden. Entsprechend wurden Messungen durchgeführt, die diffuse Emissionen aus direkten Quellen (wie z.B. Dämmmaterialien an den umliegenden Bauten) überprüfen sollten. Bei den polybromierten Diphenylethern (PBDE) ist außer für den DecaBDE (BDE 209) kein Einfluss zu erwarten, da diese bereits seit 2004 verboten sind und keine Anwendung mehr finden sollten¹. Bei neuartigen, bisher nicht regulierten Flammschutzmitteln ist ein Einfluss von Pentabromtoluol (PBT) und Hexabrombenzol (HBB) aus der Inneneinrichtung und dem Gebäude der UFS auf die Messungen an der Terrasse der UFS denkbar. Entsprechend wurden mittels aktivem Luftsammler (Leckelsammler) Raumluftproben in den Innenräumen der UFS genommen, inklusive Feldblindproben. Am LfU wurden in dem Zeitraum ungenutzte Büroräume als Vergleichskontrolle beprobt. Zusätzlich wurde an weiter abgelegenen Standorten (Schneefernerkopf und auf einem Schneefeld in 2 km Entfernung zur UFS) Depositionsmessungen mittels Trichter-Kartusche-System (AirLab Sammler der Firma Kroneis) genommen. Alle Probenahmen wurden durch den Einsatz von Feldblindproben qualitätsgesichert.

Tab. 1: Eckdaten der Probenahmen zur Überprüfung von Flammschutzmittelemissionen an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus und Ermittlung von Alternativstandorten ohne lokale Emissionsquellen.

Zeitraum	Messgerät	Matrix	Probenahmeort
24.03.2023 – 02.04.2023	Leckelsammler	Immission	Innenräume UFS: renovierter Bereich: Casino, Zimmer 1.14, Flur 1. Ug
03.04.2023 – 13.04.2023	Leckelsammler	Immission	Innenräume UFS: Umbau ca. 1996: UBA DWD Labor 3. Og, UBA Labor 4. Og, Wechselnutzerrlabor 5. Og
14.04.2023 – 25.04.2023	Leckelsammler	Immission	Innenräume UFS: Durchzugsbereich: Treppenhhaus 3. Og, Tunnel/Bhf, Vorraum Kammstollen
03.08.2022-20.06.2023 (3 Proben)	AirLab	Deposition	Schneefernerkopf Koordinaten: 648527 5252792
04.07.2023-03.01.2024 (2 Proben)	AirLab	Deposition	Schneefeld 2 km Entfernung „Standort Lawinenwarndienst“ Koordinaten: 649645 5252224

¹ Tetra-, Penta-, Hexa-, Hepta- und DecaBDE sind im Anhang A (Eliminierung) des [Stockholmer Übereinkommens](#) gelistet. In Europa wurden das Inverkehrbringen und die Verwendung von Hexa-, Hepta-, Penta- und TetraBDE bereits 2004 durch die [Richtlinie 2003/11/EG](#) verboten. Richtlinie 2003/11/EG wurde durch die EU [POP](#)-Verordnung ersetzt, welche seit 2019 auch DecaBDE beschränkt. Dort sind die PBDE in Anhang I gelistet.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/persistente-organische-schadstoffe-pop/pentabromdiphenylether-pbde>

OCP (Reduzierung der Proben, Methodenetablierung, Versuch PU- Schaum vs. XAD-Harz)

Die OCP Analytik wurde bis 2017 vom Helmholtz-Zentrum durchgeführt. Ende 2017 stieg der Kooperationspartner aus der OCP-Analytik von Immissions- und Depositionsproben der alpinen Standorte aus. Das LfU hat daraufhin die Methodik im hauseigenen Labor etabliert um die Analytik fortzuführen, die für die Umweltbeobachtung von hoch-relevanten POP wie DDT, Mirex und Endosulfan essentiell ist. Bis zur Etablierung der Methode wurden die Proben weiterhin genommen und als Rückstellproben gesammelt. Um die Summe der seit 2017 genommenen Proben abarbeiten zu können, bei gleichbleibenden Laborkapazitäten, wurde beschlossen die Proben zu Mischproben über ein Halbjahr zusammenzuführen. Zusätzlich wurde überprüft, ob sich die zeitaufwendige und kostenintensive Vorbereitung der Immissionskartuschen für die OCP-Probenahme verbessern lässt, indem günstigeres und in der Handhabung einfacheres Adsorptionsmaterial in die Kartuschen eingesetzt werden kann. Konkret: ob das XAD-2-Harz durch Polyurethan (PU)-Schaum ersetzt werden kann. Die Vorteile des PU-Schaums sind in Tab. 2 aufgezeigt.

Tab. 2: Vergleich der unterschiedlichen Adsorptionsmaterialien für die Immissionskartuschen zur Bestimmung von Organochlorpestiziden.

	XAD-2 Harz	PU-Schaum
Materialkosten beim Einkauf pro Kartusche	50 g = 100 €	2 Stück = 5 €
Vorreinigung	Soxhletextraktion 24 h 750 ml Lösemittel	ASE (accelerated solvent extraction) 1 h 50 ml Lösemittel
Extraktion der Probe	Soxhletextraktion 24 h 750 ml Lösemittel + dann Einengen des Extrakts ca. 5 h	ASE 1 h 50 ml Lösemittel + Einengen des Extrakts ca. 0,5 h

2.1.2 Ergebnisse

POP-Monitoring an der UFS

Flammschutzmittel – FSM

Die Ergebnisse zu den Gehalten von halogenierten Flammschutzmitteln (FSM) in Immissionsproben von 2019 bis 2023 sind in Tab. 14 zusammengefasst.

Tab. 3: Arithmetischer Mittelwert der Immissionskonzentrationen halogenerter Flammschutzmittel in pg/m³ an der Zugspitze (UFS Schneefernerhaus) in den in der Tabelle angegebenen Messperioden. Fett markiert sind die Werte von Substanzen, bei denen sich Zunahmen in den Konzentrationen beobachten lassen.

	2019-2023	2014-2019 (PureAlps, LfU 2021, S.241)	2012-2014 (EMPOP, LfU, S.65)
	pg/Nm ³		
BDE 28	0,056	0,102	0,334
BDE 47	0,253	0,214	0,200
BDE 100	0,045	0,101	<BG (0,01-0,51)
BDE 99	0,023	0,058	0,047
BDE 154	0,016	0,009	<BG (0,02-0,51)
BDE 153	0,014	0,033	<BG (0,01-0,54)
BDE 183	0,014	0,460	<BG (0,02-1,56)
BDE 209	0,801	0,853	<BG (0,03-7,24)
Summe Penta BDE (47, 99, 100, 153, 154)	0,352	0,415	0,402
Summe HBCD	0,467	0,553	<BG (0,08-4,13)
2,3,5,6-Tetrabrom-p-xylol	0,010	0,011	<BG(0,02-1,5
Pentabromtoluol	0,595	0,366	0,190
Hexabrombenzol	0,405	0,298	0,213
syn-Dechloran Plus	0,116	0,301	0,260
anti-Cl11-Dechloran Plus	0,018	0,024	kein Wert
anti-Dechloran Plus	0,393	1,120	0,436
Decabromdiphenylethan	2,060	1,300	n. b.a
^a n. b.: wegen Interferenzen nicht bestimmbar BG: Bestimmungsgrenze			

Das Abbauprodukt von anti Dechloran Plus „aCl10DP“ lag immer unter der instrumentellen Bestimmungsgrenze. BTBPE war nicht bestimmbar aufgrund einer zu geringen Wiederfindungsrate des ¹³C-markierten internen BTBPE-Standards.

Insgesamt liegen die Mediane der einzelnen Analyten in derselben Größenordnung wie im Zeitraum 2014-2019. Für einige Analyten, wie zum Beispiel BDE 28, sind deutliche Abnahmen erkennbar (Abb. 1).

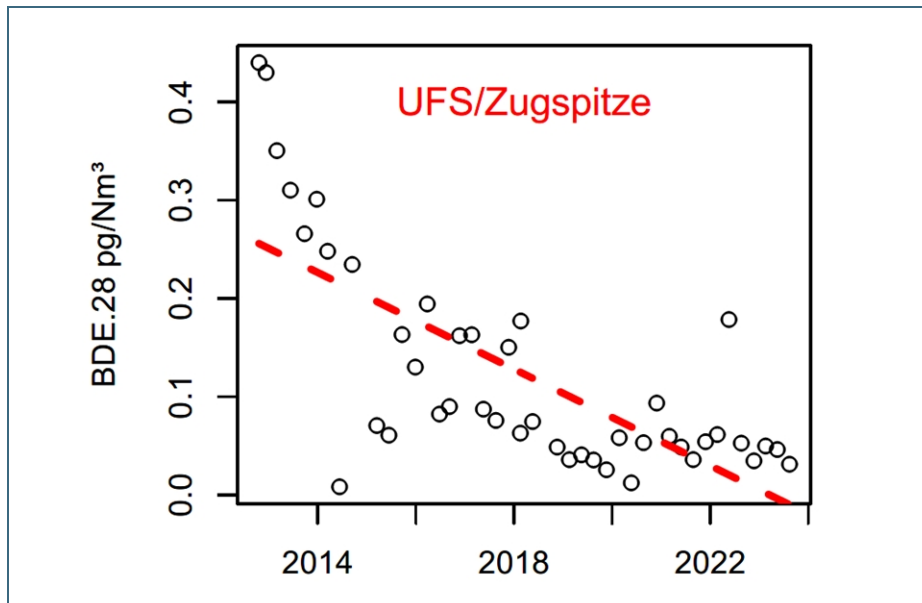


Abb. 1:
Hoch signifikant abnehmender Gehalt von BDE28 in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023 ($p < 0,005$).

Weniger eindeutig zeigt sich ein Abwärtstrend bei den in technischen Gemischen bis 2004 eingesetzten Tetra- und PentaBDEs sowie für BDE 209, HBCD und DBDPE (Abb. 2 bis Abb. 4). Die Ausnahmeregelungen in Herstellung und Verwendung, die lange für BDE 209 galten, wurden mit der Novelle der POP-Verordnung 2019 stark eingeschränkt. BDE 209 ist seit 2017 als POP klassifiziert und wird durch das Stockholmer Übereinkommen reguliert.

Für HBCD gilt in der EU seit 2016 ein Produktionsstopp und seit 2018 sind alle Ausnahmeregelungen für das Inverkehrbringen und die Anwendung von Neuprodukten gestrichen. Aktuell nachweisbare Mengen von HBCD stammen von Emissionen aus bestehenden Anwendungen (Gebäudedämmmaterial), sowie den Emissionen bei der Sanierung von Dämmungen und dem Eintrag durch Ferntransport. Vermutlich im Vorgriff auf eine anstehende Regulierung steigt der Gehalt von DBDPE, das als Ersatz für BDE 209 eingesetzt wird, in den Immissionsproben nur zögerlich. DBDPE ist derzeit noch nicht beschränkt, unterliegt aber einer laufenden Bewertung unter REACH². Typischerweise stellen sich Hersteller auf diese Situation bereits im Vorfeld ein und nehmen es sukzessive aus der Produktion beziehungsweise weichen auf Substitute aus.

² Die REACH - Verordnung (EG) 1907/2006] ist die Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe.

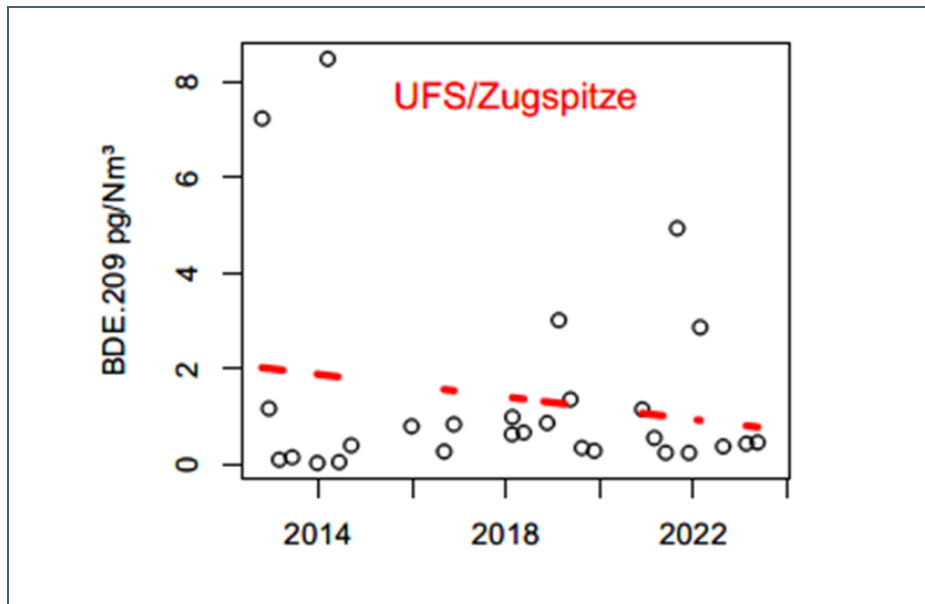


Abb. 2:
Gehalt von BDE 209 in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Bei BDE 209 ist kein signifikanter Trend nachweisbar.

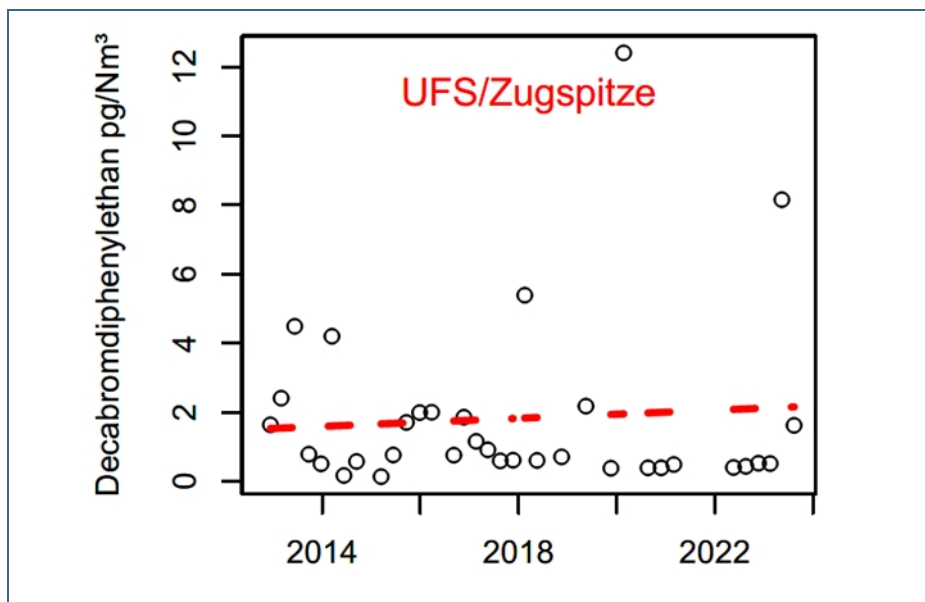


Abb. 3:
Gehalt von Decabromdiphenylethan (DBDPE) in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Es ist kein signifikanter Trend nachweisbar.

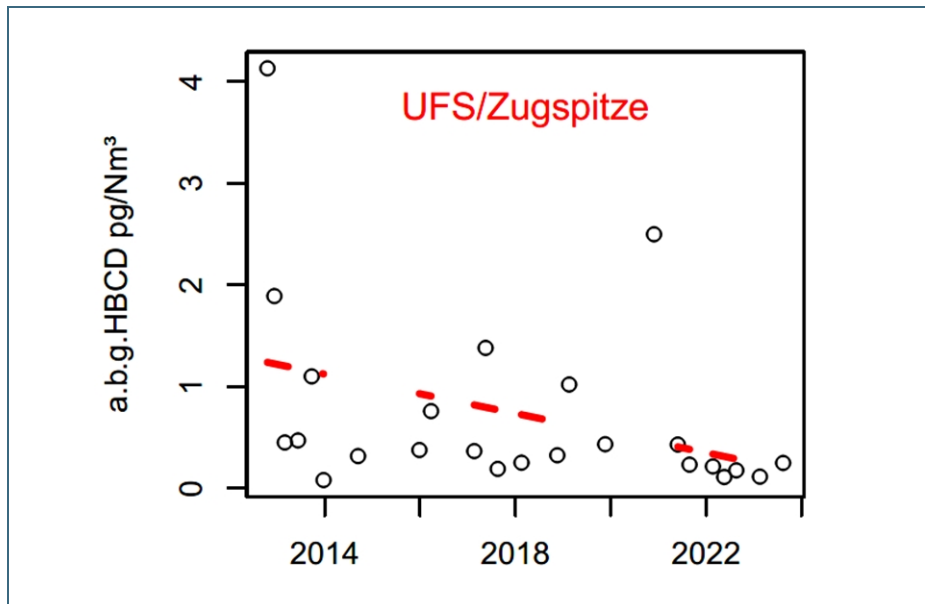


Abb. 4:
Gehalt von Hexabromcyclododecan (HBCD, Summe aller Isomere) in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Die Abnahme ist signifikant ($p < 0,1$).

Für alternative, derzeit nicht beschränkte Flammschutzmittel sind die Gehalte zwar auffällig, da die Mediane für den Zeitraum 2019 bis 2023 höher sind als für den Zeitraum 2012 bis 2019 (vgl. Tab. 3), ein signifikanter Aufwärtstrend ist aber aufgrund der hohen Streuung in den Daten noch nicht statistisch nachweisbar. Darunter fallen Hexabrombenzol und Pentabromtoluol (vgl. Abb. 5 und Abb. 6).

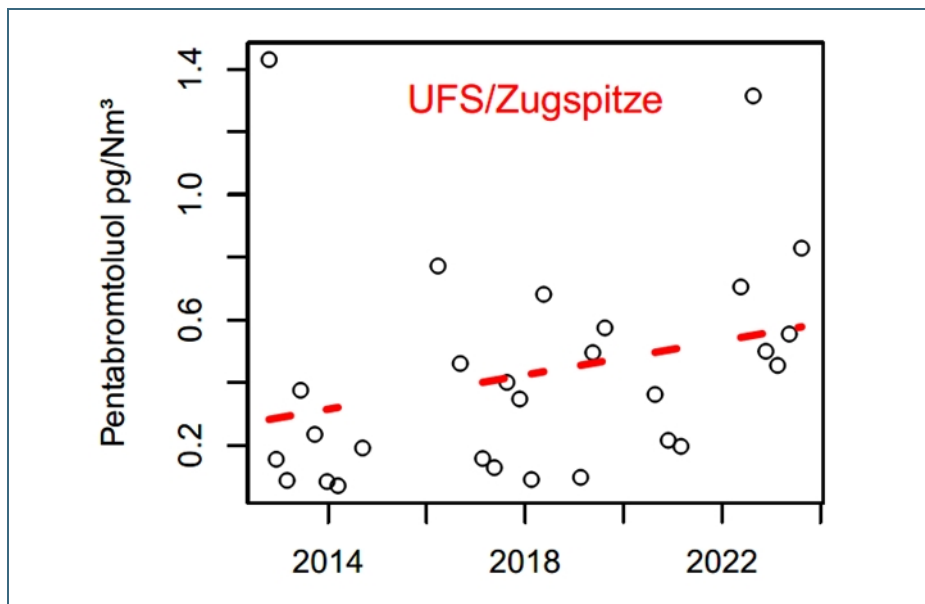


Abb. 5:
Gehalt von Pentabromtoluol in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Die Daten weisen keinen signifikanten Trend auf.

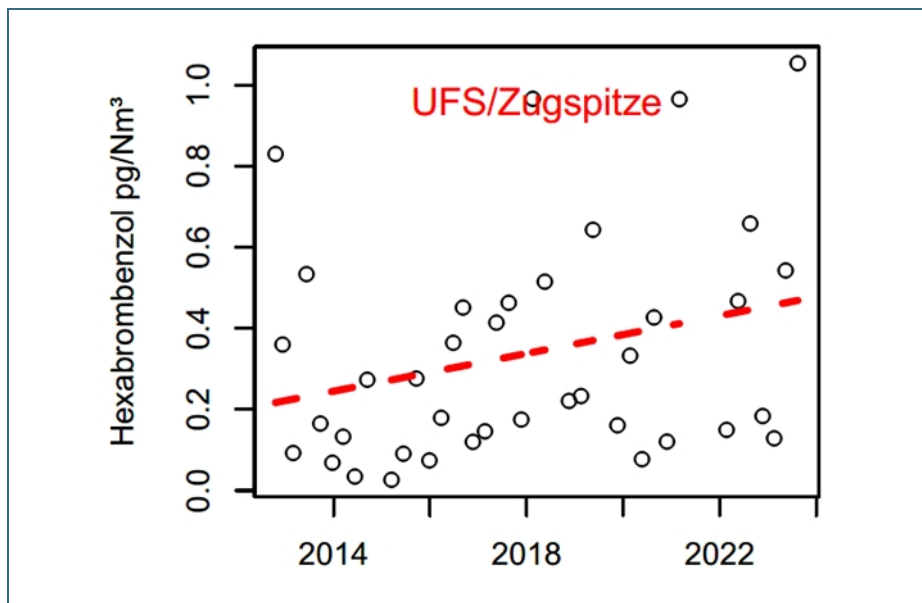


Abb. 6:
Gehalt von Hexabrombenzol in Immissionsproben der Zugspitze von 2012 bis 2023. Die Daten weisen einen positiven Trend auf, der signifikant ist ($p < 0,1$).

Alte FSM – kein Einfluss auf Messungen; neuartige FSM – Gebäude der UFS beeinflusst Messungen

Es kann davon ausgegangen werden, dass in einem geringen Maße auch an der UFS noch Geräte und Materialien in Gebrauch sind, die PBDE enthalten, jedoch kann man nicht von einer starken Belastung sprechen. PBDE sind hauptsächlich in hochschlagfestem Polystyrol (HIPS) und ABS Kunststoffen eingesetzt worden. Außerdem im Gehäuse und Leiterplatten von Elektrogeräten. Dabei betrug der Anteil im Kunststoff ca. 7 – 20 %.

Die Werte an der UFS sind wie erwartet im unteren Bereich (siehe Abb. 7). Insbesondere wenn man die Werte mit Raumluftmessungen vergleicht, die in Wohnräumen in Südbayern durchgeführt wurden (vgl. Wanner et al. 2008). Zu bedenken ist auch, dass an der Außenluft ein permanenter, sehr starker und in Innenräumen ein geringer Luftaustausch stattfindet. Der Einfluss der PBDE aus dem UFS-Inventar auf die Außenluftmessungen an der UFS kann demnach als gering eingestuft werden und bewegt sich im Bereich der Messunsicherheiten.

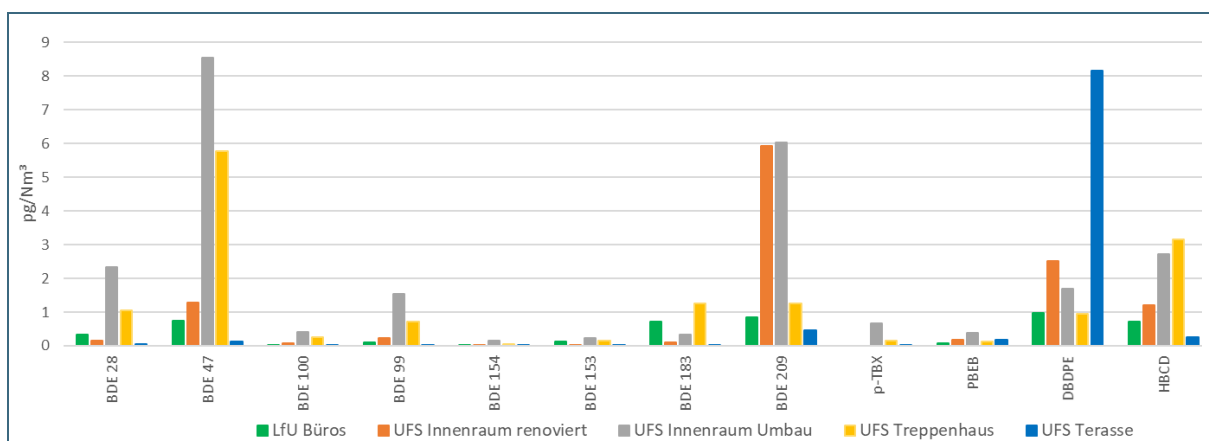


Abb. 7: Gehalte an Flammschutzmitteln in Innenraumluft und an der Messterrasse der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS). Die Messungen wurden im März/April 2023 durchgeführt.

Bei den neuartigen Flammschutzmitteln wie Pentabromtoluol und Hexabrombenzol kann eine Beeinflussung der Messungen an der Terrasse der UFS durch Emissionen aus der Inneneinrichtung und dem Gebäude der UFS als wahrscheinlich betrachtet werden. Die Emissionen dieser beiden genannten Stoffe sind derzeit die einzigen, bei denen wir einen Einfluss auf unsere Außenluftmessungen als relevant betrachten (siehe Abb. 8).

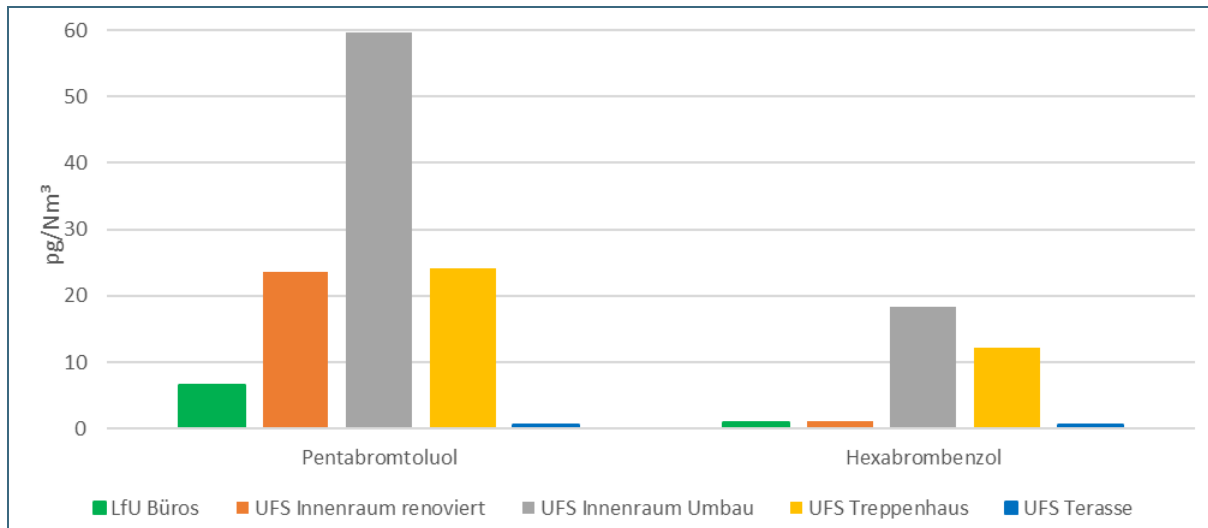


Abb. 8: Gehalte der beiden neuartigen Flammschutzmittel Pentabromtoluol und Hexabrombenzol in Immissionsproben der Innenräume und der Messterrasse der UFS. Die Messungen wurden im März/April 2023 durchgeführt.

Organochlorpestizide

Die Ergebnisse von jeweils acht Immissionsproben von der Umweltforschungsstation an der Zugspitze und dem Sonnblick Observatorium am Hohen Sonnblick der Jahre 2022 und 2023 inklusive der Feldblindwerte konnten auf ihren Gehalt an Organochlorpestiziden (OCP) bestimmt werden. Dabei wurden jeweils zwei Proben mit einer Probenahmedauer von 6 Wochen zusammengeführt. Damit werden pro Probe circa drei Monate abgedeckt. Die Mediane der Proben von 2022 bis 2023 zeigen einen geringeren Gehalt an OCP als der Median der Gehalte von 2012 bis 2017. Eine weitere Abnahme der OCP in Folge umfangreicher Regulierungen ist also wahrscheinlich. Dies gilt sowohl für die Zugspitze als auch für den Hohen Sonnblick (siehe Abb. 9 und Abb. 10). Dabei ist zu beachten, dass die Methode noch nicht vollständig validiert werden konnte. Darüber hinaus ist zu beachten, dass am SBO eine HCH-Quelle in unmittelbarer Nähe zu den Luftsammelgeräten besteht. Entsprechend können die Werte für die HCH-Isomere, die am SBO erfasst werden, nicht ausgewertet werden.

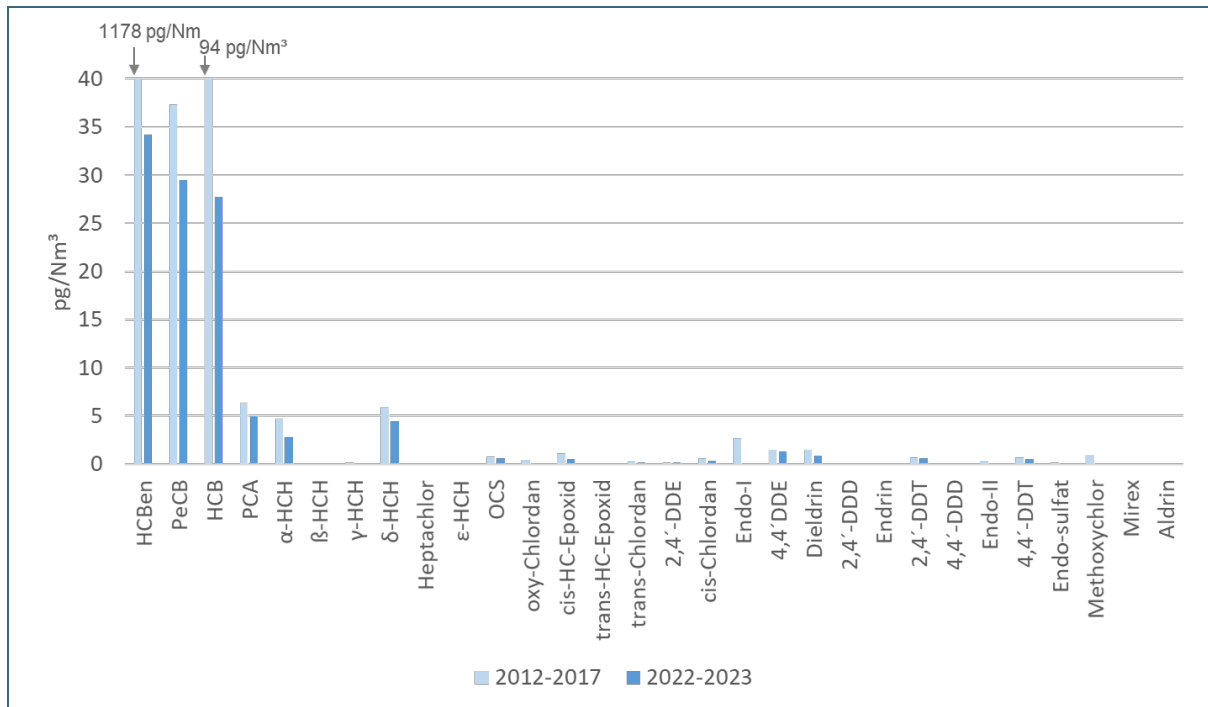


Abb. 9: Gehalte an Organochlorpestiziden in Immissionsproben an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, Zugspitze Deutschland. Die angegebenen Werte geben den Median der Zeiträume 2012 bis 2017 und 2022 bis 2023 wieder.

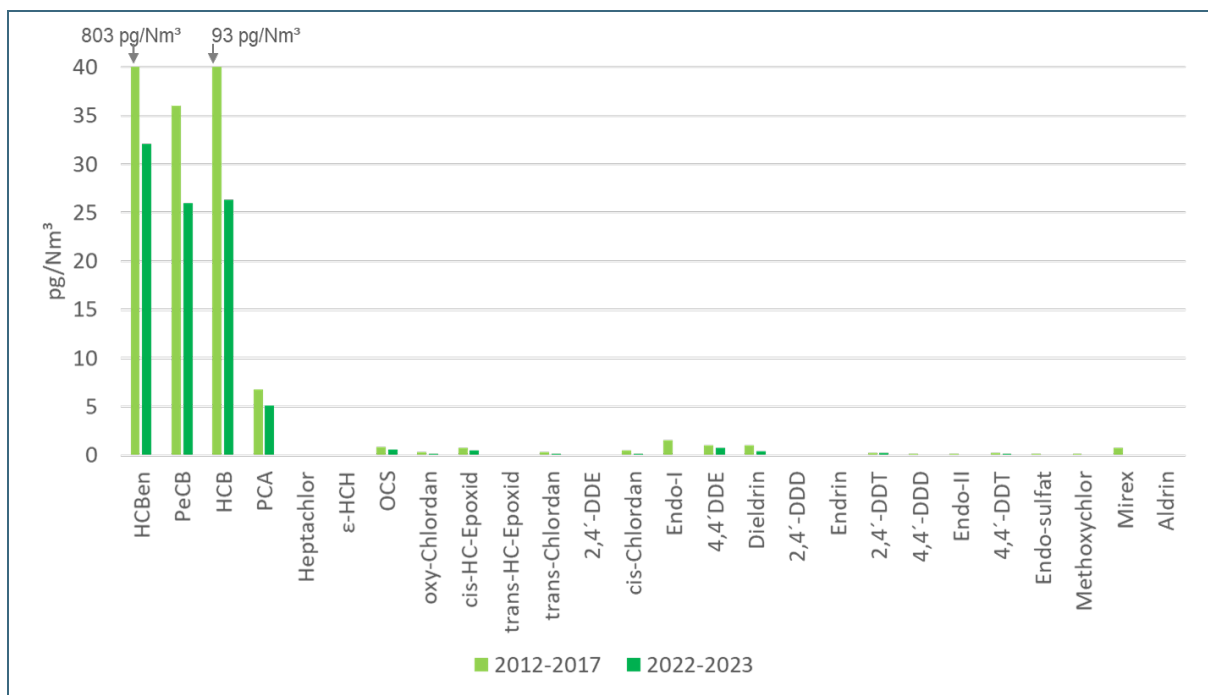


Abb. 10: Gehalte an Organochlorpestiziden in Immissionsproben am Sonnblick Observatorium, Hoher Sonnblick Österreich. Die angegebenen Werte geben den Median der Zeiträume 2012 bis 2017 und 2022 bis 2023 wieder.

Polychlorierte Biphenyle, Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane

Die Gehalte der Polychlorierten Biphenyle (PCB), Polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) wurden durch die Umweltbundesamt GmbH Österreich analysiert und in einem separaten Bericht veröffentlicht ([LINK](#)). Die Gehalte für PCDD/F zeigen sowohl in der Immission als auch der Deposition einen leicht abnehmenden Trend an der Zugspitze. Für die PCB-Gehalte konnte nur in den Depositionsproben ein schwacher, negativer Trend nachgewiesen werden. Die Immissionsproben zeigen keine signifikante Veränderung der PCB-Konzentrationen.

2.2 Arbeitspaket 2: Erweiterung des Stoffspektrums – Erprobung von „Non-Target“-Techniken

2.2.1 Vorgehensweise

Non-Target

Mittels non-target Analytik können theoretisch Verbindungen in einer Probe identifiziert werden, die vorher unbekannt sind. So können Umweltchemikalien gefunden werden, von denen zuvor nicht bekannt war, dass sie in relevanten Mengen in der Umwelt gefunden werden. Es zeigte sich, dass die non-target Analytik allerdings nicht geeignet ist, sofern die Substanzen nur im Spurenbereich vorkommen. Für die Immissions- und Depositionsproben befinden sich die Konzentrationen zumeist im ng/L Bereich, weshalb die non-target Analytik nicht weiter verfolgt wurde im Projekt. Für die Pflanzenschutzmittel konnte zumindest ein Suspect Screening durchgeführt werden. Bei diesem Ansatz wurden bereits bestehende Chromatogramme und Massenspektren für einen Datenbankabgleich genutzt. Durch den Abgleich von charakteristischen Spektren kann theoretisch der Gehalt von Schadstoffen in der Probe identifiziert werden. Diesen Vergleich führte Referat 75 mit E-Bulk Depositionsproben aus dem Jahr 2023 durch.

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) Messnetz

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) sind gemäß der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) definiert als fluorierte Stoffe, die mindestens ein vollständig fluoriertes Methyl- oder Methylen-Kohlenstoffatom (ohne ein daran gebundenes H/Cl/Br/I-Atom) enthalten (OECD 2021).

Aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften werden PFAS in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt, darunter Beschichtungen, Pestizide, Polstermöbel, Teppiche, Brandschutzmittel, Kosmetika und weitere. Die Messung von PFAS in der Umwelt ist aus mehreren Gründen von großer Bedeutung. Erstens sind PFAS sehr persistent, weshalb sie über lange Zeiträume in Böden, Gewässern und der Luft verbleiben können. Diese Persistenz brachte den PFAS auch die Bezeichnung der Ewigkeitschemikalien oder „Forever Chemicals“ ein. Messungen zeigen, dass Verbindungen aus der PFAS Gruppe ubiquitär verbreitet sind. Besondere Aufmerksamkeit bekommen die humanen Biomonitoringstudien, die eine Belastung des menschlichen Blutes zeigen (Göckener et al. 2020, Dufek et al. 2020).

Zweitens gibt es zunehmend Hinweise darauf, dass PFAS mit verschiedenen gesundheitlichen Problemen in Verbindung stehen, darunter hormonelle Störungen, Immunreaktionen und sogar bestimmte Krebsarten. Durch die Überwachung von PFAS in der Umwelt können potenzielle Gefahren frühzeitig erkannt und geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um die öffentliche Gesundheit zu schützen.

Dementsprechend sind die Messungen von PFAS entscheidend für die Entwicklung von Richtlinien und Regulierungen. Um fundierte Entscheidungen über den Umgang mit diesen Substanzen zu treffen, benötigen Behörden präzise Daten über deren Vorkommen und Konzentrationen in der Umwelt.

Um zur Klärung der Eintragspfade und des Umweltverhaltens beizutragen wurde in OPTIMON ein Messkonzept erstellt. Die Gesamtdeposition wird seit Januar 2020 in vierwöchigen Sammelperioden an acht verschiedenen Standorten Bayerns und auf der UFS erfasst. Die acht Messstandorte sind Teil der Dauerbeobachtungsstationen oder des Depositionsmessnetzes in Bayern (siehe Abb. 12). Daten aus einem bereits abgeschlossenen Projekt unter Leitung des Umweltbundesamtes³ zeigten für den Standort München-Oberschleißheim erhöhte Werte sowohl für Trifluoressigsäure (TFA) an, als auch für weitere PFAS (PFPrA, PFBA, PFPA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, DONA). Konzentrationen der PFAS und von TFA am Standort Oberschleißheim wiesen im Vergleich zu den übrigen Standorten in Bayern teilweise um den Faktor 10 höhere Gehalte auf. Die Daten aus der Messperiode 2018 scheinen eine besondere Belastung wiederzugeben. Um Proben vom Standort München-Oberschleißheim weiter miteinbeziehen zu können, unterstützte der Deutsche Wetterdienst die Probenahmekampagne im Jahr 2021.

Die Gesamtdeposition wird über einen Bulksammler mit Trichter-Flasche-System erfasst, der elektrisch temperiert wird (E-Bulk). Vergleichende Messungen werden mit Proben gemacht, die über Bergerhoffbecher die Gesamtdeposition erfassen. Der Bergerhoffbecher ist ein komplett offenes System, das anfällig für Verdunstungen ist. Ob dies die PFAS Gehalte in der Probenahme beeinflusst, werden die Messergebnisse zeigen. Die Monatsproben werden zu Quartalsmischproben zusammengefügt um die analytischen Kosten möglichst gering zu halten. Die Analytik wurde 2021 an das DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) vergeben. Es wurden 24 Einzelsubstanzen (siehe Tab. 18) durch das externe Labor Technologiezentrum Wasser (TZW) bestimmt.

Die ersten Messungen zeigten einen ungewollten PFAS-Eintrag, da PFAS Substanzen in den Feldblindwertproben nachgewiesen wurden (siehe Abb. 52). Entsprechend wurde eine umfangreiche Eintragsanalyse durchgeführt und einzelne Geräteteile der Messtechnik ausgetauscht, als auch der Reinigungsprozess der Probenahmegefäße und die Probenahme selber überprüft und überarbeitet. Seit 2023 bestehen nun verlässliche Probenahmesysteme. Zusätzlich wurde festgelegt, dass die Analytik bei externen Laboren immer durch 10 % verdeckter Doppelproben überprüft werden sollte, da im Austausch mit Kollegen und Kolleginnen anderer Bundesländer immer wieder Unstimmigkeiten bezüglich der Analytik von Spurenstoffen erwähnt wurden, auch wenn zertifizierte Auftragslabore beauftragt wurden.

Bei kompletter Verdunstung des Niederschlags im Bergerhoffbecher bzw. bei Niederschlagsmengen < 100 mL wurde auf 100 mL mit Reinstwasser aufgefüllt. Ab der Probenahme-Ende 22.03.2023 wurde auf 200 mL aufgefüllt. Die Mengen wurden entsprechend bei der Berechnung der Depositionsrate berücksichtigt.

³ Umweltforschungsplan UFOPLAN FKZ 3717413050: „Persistente Abbauprodukte halogener Treib- und Kältemittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogener Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial“

2.2.2 Ergebnisse

Non-Target bzw. Suspect Screening

In den E-Bulk Depositionsproben aus dem Jahr 2023 wurde durch das Suspect Screening keine auffällige Substanz entdeckt. Es wurden einige gängige PSM in nicht sonderlich hohen Konzentrationen wiedergefunden. Sonstige Substanzen waren nicht auffällig. Der Verkehrstracer 1,3-Diphenylguanidin, der regelmäßig in der Luft im urbanen Raum nachgewiesen wird, wurde auch hier gefunden. Da das Screening keine Besonderheiten zeigte, wurde es nicht weiterverfolgt. Da die Wiederfindung bei Substanzen im Spurenbereich durch das Suspect Screening sehr schwierig, beziehungsweise eine eindeutige Identifizierung von Spurenstoffen nicht möglich ist, ist es durchaus möglich, dass relevante Chemikalien zwar präsent aber nicht detektierbar waren.

Aktuell werden neue Adsorptionsmaterialien für die Luftprobenahme (z. B. polydimethylsiloxane PDMS- und 4Aminobenzonitrile, ABN-Adsorbentien) in der Wissenschaft diskutiert. Diese Materialien erfordern in der analytischen Bearbeitung keine destruktiven und selektiven Aufreinigungsschritte. Dadurch eignen sie sich für breit angelegte Suspect- und Non-Target-Analysen. Im Projekt OPTIMON konnten diese Materialien aus Zeitgründen nicht mehr getestet werden. (Vergleiche hierzu Röhler et al. 2021 und die [Norman Datenbank](#)).

PFAS Ergebnisse, inkl. TFA

Die bisherigen Ergebnisse zum Methodenvergleich Bergerhoffbecher und E-Bulk zeigen keine klaren Zusammenhänge (siehe Abb. 53 und Abb. 54 im Anhang). Tendenziell ist der Gehalt an TFA in Depositionsproben, die mittels E-Bulk erfasst wurden höher als in Bergerhoffproben. Dies lässt sich durch die stärkere Verdunstung (Re-Emission) bei den Bergerhoffbechern erklären. Der Effekt ist in den Proben von März, April, Mai, Juni, Juli zu beobachten. Im August, September und Oktober ist jedoch in den Proben der Bergerhoffbecher mehr TFA nachweisbar als in den E-Bulk-Proben (siehe Abb. 54).

In fast jeder Bergerhoffprobe (97 %) wurde TFA gefunden (Maximum = $6,91 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, Median = $0,732 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$). Gleiches gilt für die Depositionsproben, die mittels E-Bulk gesammelt wurden: hier wurde in 88 % der Proben TFA gefunden (Maximum = $4,33 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, Median = $0,755 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$). Die nachgewiesenen Konzentrationen liegen um mehrere Größenordnungen über den der übrigen nachgewiesenen PFAS. Eine Studie des TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser zum TFA-Gehalt in Depositionsproben aus Deutschland von 2018 gibt als Median über alle Standorte einen Gehalt von $0,357 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ an (Freeling et al. 2020, vgl. Tab. 6). Unsere Proben aus Bayern von 2023 zeigen eine höhere Depositionsrate von TFA, wenn man die Mediane vergleicht. Allerdings sind die Maxima in der TZW-Studie deutlich höher:

Median TFA deutschlandweit (Freeling et al. 2020) =	$0,357 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Median TFA Bayern (OPTIMON 2023) =	$0,755 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (E-Bulk)
	$0,732 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (Bergerhoff)
Max. TFA deutschlandweit (Freeling et al. 2020) =	$57,0 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$
Max. TFA Bayern (OPTIMON 2023) =	$4,33 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (E-Bulk)
	$6,91 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ (Bergerhoff)

Dabei muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den Proben der TZW-Studie um Nassdeposition („wet-only“) handelt während im Rahmen des Projektes OPTIMON die Gesamtd deposition gesammelt wurde.

Tab. 4: Gehalt an Trifluoressigsäure (TFA) in Depositionsproben, die mittels Bergerhoff-Becher an den Standorten Zugspitze (UFS), Neusling (NES) und Ansbach (ANS) genommen wurden.

Standort	Anzahl Proben	Anzahl Nachweis	Fundhäufigkeit in Prozent	Depositionsrate in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	
				Max	Median
UFS, NES, ANS	29	28	97%	6,910	0,732
UFS	7	7	100%	6,910	2,865
NES	11	10	91%	2,822	0,439
ANS	11	11	100%	2,480	0,610

Tab. 5: Gehalt an Trifluoressigsäure (TFA) in Depositionsproben (Gesamtd deposition), die mittels E-Bulk an folgenden Standorten genommen wurden: Grassau (GRA), Bidingen (BID), Möhrendorf (MOE), Neusling (NES), Ansbach (ANS), Zugspitze (UFS), Eining (EIN) und München – Oberschleißheim (OSH).

Standort	Anzahl Proben	Anzahl Nachweis	Fundhäufigkeit in Prozent	Depositionsrate in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	
				Max	Median
Alle	78	69	88%	0,755	4,333
GRA	11	10	91%	1,587	4,333
BID	11	10	91%	0,777	2,983
MOE	11	10	91%	0,479	1,784
NES	11	9	82%	0,474	2,071
ANS	10	8	80%	0,441	1,886
UFS	8	6	75%	2,414	4,019
EIN	9	8	89%	0,508	2,221
OSH	7	6	86%	1,842	2,429

Tab. 6: Depositionsraten von Trifluoressigsäure (TFA) an unterschiedlichen Standorten in Deutschland. Studie von Freeling et al. 2020. ES := Essen, GW := Greifswald, MO := München – Oberschleißheim, PD := Potsdam, SU := Stuttgart, SW := Schleswig, WK := Wasserkuppe, BR := Brocken. aNasse Deposition. b Gesamtd deposition. Die Proben wurden von Februar 2018 bis Februar 2019 gesammelt. Sammelzeitraum über einen Monat.

Standort	Max, $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	Median ($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)
ES ^a	14,4	0,452
GW ^a	50,0	0,237
MO ^a	57,0	0,554
PD ^a	7,46	0,205
SU ^a	20,7	0,302
SW ^a	22,0	0,290
WK ^a	24,3	0,387
All sites^a	57,0	0,357
BR ^b	35,3	0,774

Ebenfalls auffällig ist der Gehalt von Perfluorbutansäure (PFBA) in den Depositionsproben. In 86 % der Bergerhoff-Proben von der UFS und 55 % in Neusling und Ansbach wurde PFBA nachgewiesen, mit einem Maximalwert von 0,043 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ und einem Median von 0,0011 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. Ähnliche Fundhäufigkeiten sind in den E-Bulkproben gezeigt worden. Die maximale Depositionsrates liegt bei 0,013 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ und einem Median von 0,0014 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. Die Daten dazu sind in Tab. 7 und Tab. 8 zusammengetragen.

Tab. 7: Gehalt an Perfluorbutansäure (PFBA) in Depositionsproben, die mittels Bergerhoff-Becher an den Standorten Zugspitze (UFS), Neusling (NES) und Ansbach (ANS) genommen wurden.

Standort	Anzahl Proben	Anzahl Nachweis	Fundhäufigkeit in Prozent	Depositionsrates in $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	
				Max	Median
UFS, NES, ANS	29	18	62%	0,0425	0,0011
UFS*	7	6	86%	0,0425	0,0070
NES	11	6	55%	0,0063	0,0007
ANS	11	6	55%	0,0148	0,0011

* Bei sechs von sieben Proben wurde an der UFS PFBA nachgewiesen, allerdings konnte für diese Proben keine Depositionsrates berechnet werden, da die Niederschlagsmenge unbekannt ist. Diese Proben wurden bei der Auswertung der Minimal- und Maximalwerte nicht berücksichtigt.

Tab. 8: Gehalt an Perfluorbutansäure (PFBA) in Depositionsproben, die mittels E-Bulk an verschiedenen Standorten in Bayern: Grassau (GRA), Bidingen (BID), Möhrendorf (MOE), Neusling (NES), Ansbach (ANS), Zugspitze (UFS), Eining (EIN) und München – Oberschleißheim (OSH).

PFBA				Depositionsrates in µg/(m²*d)	
Standort	Anzahl Proben	Anzahl Nachweis	Fundhäufigkeit in Prozent	Max	Median
Alle	78	47	60%	0,0126	0,00141
Grassau	11	6	55%	0,00933	0,00199
Bidingen	11	4	36%	0,00465	0
Möhrendorf	11	7	64%	0,00448	0,00135
Ansbach	11	9	82%	0,00841	0,00276
UFS	10	1	10%	0,01256	0
Eining	8	7	88%	0,00516	0,00171
Oberschleißheim	7	6	86%	0,00523	0,00378
Neusling	11	8	73%	0,00414	0,00124

Bei den PFAS-Gehalten fällt auf, dass die kurzkettigen per- und polyfluorierten Carbonsäuren häufiger gefunden werden als längerkettige (vgl. Tab. 9). Insgesamt entspricht die vermehrte Wiederfindung von kurzkettigen PFAS gegenüber längerkettigen PFAS internationalen Beobachtungen (Pfothner et al. 2022, Gewurtz et al 2019, Pike et al. 2021). Zum einen bedingt durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Substanzen, die sich mit der Kettenlänge ändern in Bezug auf Flüchtigkeit und Wasserlöslichkeit, aber auch mit der Erklärung, dass kurzkettige PFAS als Alternative zu bereits verbotenen oder toxischeren, längerkettigen PFAS eingesetzt werden (Ivantsova 2024).

Vergleicht man die PFAS-Gehalte in den Depositionsproben von 2023 mit Proben aus 2018/2019 (LfU 2020) fällt auf, dass die Fundhäufigkeit für fast jede Einzelsubstanz abgenommen hat. PFOA wurde 2018/19 noch in allen Proben gefunden, während es 2023 nur noch in 23 % (E-Bulk) bzw. 14 % (Bergerhoff) der Proben detektiert wurde. Dies könnte teilweise durch die unterschiedliche Sensitivität der Analytik erklärt werden. Während 2018/19 die Bestimmungsgrenze (BG) bei 0,5 ng/L für die Einzelsubstanzen (LfU interne Analytik durch Referat 75) lag, konnte 2023 bei einzelnen Substanzen nur eine BG von 1 ng/L (siehe Tab. 18, externes Auftragslabor) gewährleistet werden. Zusätzlich wurde bei den Daten von 2018/2019 bereits die halbe BG als Fund gewertet.

Tab. 9: Wiederfindungsrate von PFAS in Depositionsproben aus Bayern sortiert nach Kettenlänge und Säuretyp.

Substanz	Säuretyp	# Kohlenwasserstoff	Fundhäufigkeit	
			E-Bulk	Bergerhoff
TFA	Carbonsäure	2	88%	97%
PFBA	Carbonsäure	4	60%	62%
PFPeA	Carbonsäure	5	5%	14%
HFPO-DA	Carbonsäure	6	3%	14%
PFHxA	Carbonsäure	6	22%	28%
PFHpA	Carbonsäure	7	37%	21%
PFOA	Carbonsäure	8	23%	14%
PFNA	Carbonsäure	9	1%	/
PFDA	Carbonsäure	10	/	/
PFUnA	Carbonsäure	11	/	/
PFDoA	Carbonsäure	12	/	/
DPOSA	Carbonsäure	13	/	/
PFPrA	Sulfonsäure	3	/	/
PFBS	Sulfonsäure	4	4%	7%
4:2 FTSA	Sulfonsäure	6	/	/
PFHxS	Sulfonsäure	6	1%	/
6:2 FTSA	Sulfonsäure	8	4%	/
PFOS	Sulfonsäure	8	3%	7%
8:2 FTSA	Sulfonsäure	10	/	/

Sowohl bei den Bergerhoff, als auch den E-Bulk-Proben ist kein eindeutiger Jahresgang bezüglich der Depositionsrate erkennbar. In keiner der Proben (sowohl Bergerhoff, als auch E-Bulk) wurde DPOSA, FBSA, PFBSA, PFDA, PFPrA, PFDoA, PFUnA, 4:2 FTSA, 5:3 FTCA oder 8:2 FTSA nachgewiesen.

In keiner der Bergerhoffproben wurde PFHxS, PFNA oder 6:2 FTSA nachgewiesen. In den E-Bulk-Proben wurde in drei von 78 Proben 6:2 FTSA nachgewiesen. Die Bestimmungsgrenze lag bei 0,001 µg/L und die nachgewiesenen Konzentrationen lagen knapp über der Bestimmungsgrenze (BG). PFHxS wurde mit 0,0017 µg/L (BG = 0,0005 µg/L) in der Juni-Probe aus Neusling nachgewiesen. PFNA wurde mit 0,00055 µg/L (BG = 0,0005 µg/L) in der Juni-Probe aus Bidingen detektiert.

In keiner der E-Bulkproben wurde PFPA nachgewiesen. In einer Bergerhoffprobe aus Ansbach (September) wurde ein Gehalt von 0,32 µg/L festgestellt, bei einer BG von 0,1 µg/L.

2.3 Arbeitspaket 3: Überprüfung der immissionsbezogenen Monitoring-Aktivitäten des LfU - Entwicklung eines Gesamtkonzeptes unter Einbeziehung der UFS

2.3.1 Vorgehensweise

Referenzstation für das POP-Monitoring im Flachland: Nürnberg

Als Teil der Entwicklung zu einem Gesamtkonzept des immissionsbezogenen Umweltmonitorings sollte im Rahmen des Projektes ein neuer Standort zur Umweltbeobachtung eröffnet werden, der das POP-Monitoring im Flachland repräsentieren soll. Es wurden im Rahmen des Projektes verschiedene Standorte auf ihre Eignung hin untersucht. Der Standort soll als Referenzstation für die POP-Messungen an der Zugspitze/UFS dienen. Der Standort soll also als erster Flachlandstandort neben Depositionsproben auch Immissionsproben liefern, die auf persistente Schadstoffe untersucht werden. Neben fallweise einzelnen Analysen von *Contaminants of Emerging Concern* (CEC), soll der Standort Proben liefern, die zum Abgleich auf das gleiche Profil getestet werden wie an der UFS (PCDD/F, PCB, OCP, FSM). Wichtige Kriterien für die Auswahl waren, dass der Standort urban oder suburban gelegen sein sollte und nicht durch eine dominierende Punktquelle beeinflusst wird, sondern eine urbane Mischbelastung widerspiegelt.

Durch eine Voranalyse wurden drei Städte in Betracht gezogen: Augsburg, Nürnberg und München. Zur Realisierung eines Standortes wurde in den Städten nach Plätzen mit entsprechender Nutzfläche, Anströmungsgegebenheiten und Infrastruktur gesucht. Dementsprechend haben sich vier konkrete Standorte ergeben, an denen orientierende Immissionsmessungen durchgeführt wurden:

1. Augsburg LfU
2. Augsburg Bourges-Platz
3. Nürnberg Muggenhof
4. München Johanniskirchen

Reduzierung des Probenumfangs

Neben der Einrichtung eines neuen Messstandortes wurden die bestehenden Stationen des immissionsökologischen Messnetzes dahingehend ausgewertet, ob sie weiterhin betrieben werden sollten. Zusätzlich wurde an anderen wichtigen Standorten überprüft, ob neue Stationen eingerichtet werden sollten.

Darüber hinaus wurde überprüft, ob die Probenanzahl reduziert werden kann. Dies wurde zum einen durch das Weglassen bestimmter Sammelmethode erreicht. Zum anderen wurde die Analytik an ausgewählten Standorten auf Jahres-Mischproben reduziert, sofern durch die Auswertung der Stoffgehalte sichergestellt werden konnte, dass durch die Reduzierung der zeitlichen Auflösung keine Informationen verloren gehen würden. Wo es möglich ist, werden Rückstellproben gelagert um eine nachträgliche genauere zeitliche Auflösung im monatlichen Bereich durchzuführen.

Zudem wurde überprüft, ob die Stickstoffmessungen an der Zugspitze auf das gleiche System umgestellt werden können, wie es auch im Flachland genutzt wird.

Ziel war es ebenso, dass die gewonnenen Daten von der Zugspitze automatisch in einer leicht zugänglichen Datenbank gespeichert werden, sodass die Daten schnell und einfach abrufbar sind.

Es wurde die gleiche Datenbank herangezogen, wie sie das immissionsökologische Messnetz bereits seit Jahren nutzt.

2.3.2 Ergebnisse

Referenzstation für das POP-Monitoring im Flachland: Nürnberg

Die Auswertung der orientierenden Immissionsmessungen zeigte, dass PCDD/F, PCB und PBDE am Standort Nürnberg Muggenhof in ausreichenden Konzentrationen nachgewiesen werden konnten. Zudem wird über diesen Standort die Abluft einer gewerblich und industriell geprägten Stadt erfasst, ohne durch eine Punktquelle dominiert zu werden. Dies soll die Wiederfindung von *Chemicals of Emerging Concern* (CEC) ermöglichen. Zusätzlich etablierte sich eine Kooperation mit der Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN). Im Zuge der Realisierung stellte sich heraus, dass der Standort Nürnberg Muggenhof durch eine zukünftige Großbaustelle für mehrere Jahre beeinflusst sein würde. Unter Mithilfe der SUN konnte ein Alternativstandort gefunden werden: Nürnberg Schniegling. In 500 m Entfernung zur LÜB-Station Nürnberg Muggenhof. Auf der Fläche stehen fünf neu angelegte Stromanschlüsse mit je zwei Steckdosen zur Verfügung. Der Standort wurde 2024 in Betrieb genommen, die Sammelmethode und die Substanzen, die gemessen werden sind in Tab. 10 aufgelistet. Entsprechend fiel die Wahl auf den Standort Nürnberg.

Von der Firma Digitel wurde ein Sammelgerät für das LfU so umgebaut, dass das Gerät über vier Wochen Luft über eine Kartusche saugen kann, ohne dass nach zwei Wochen händisch ein Filter ausgetauscht werden muss, da dies nun automatisiert gewechselt werden kann. Dies erspart einen Arbeitstag pro Monat.

Tab. 10: Ausstattung und Analytik am Dauerbeobachtungsstandort Nürnberg

Sammelgerät/-methode	Probenahmemedium	Untersuchte Substanzen
Bergerhoff	Deposition (Gesamt)	Metalle / PFAS
E-Bulk	Deposition (Gesamt)	Versauerung / Eutrophierung / Pflanzenschutzmittel / PFAS
Wet-Only	Nasse Deposition	Versauerung / Eutrophierung
Passivsammler	Immission	Ammoniak, NO ₂
Standardisierte Graskulturen	Anreicherung in Bioindikatoren	Dioxine & Furane / PCB / PAK / Metalle
Grünkohl	Anreicherung in Bioindikatoren	Dioxine & Furane / PCB / PAK
DIGITEL Low Volume Samplers DPA-SEQ (aktive Luftsammlung)	Immission (Kartusche)	POP (PCDD/F, PCB, hFSM)
Trichter-Flasche-System	Deposition (Gesamt)	POP (PCDD/F, PCB, hFSM)

Tab. 11: Beschreibung des Luftsamplers DIGITEL Low Volume Samplers DPA-SEQ.

DIGITEL Low Volume Samplers DPA-SEQ
– Kleinfiltersammelgerät (Low Volume Sampler, LVS) mit regeltem Durchfluss 2,3 m³/h zur Erfassung von Aerosolen für Filter mit Durchmesser 47 – 50 mm (Referenzsammler nach EN 12341) – Magazinfassungsvermögen für 20 Filter – Automatischer Filterwechsel mit entsprechenden Filterhaltern sowie 2 Filtermagazinen mit Schließmechanik – Erfassung der Filterraumtemperatur – Erfassung von Umgebungs-Druck, Temperatur und relativer Luftfeuchte – Druck- und Temperaturmessung hinter dem Filter – Interner Datenspeicher zur Speicherung der Sammelprotokolle – Menügeführte Durchflusskalibrierung – Menügeführter Dichtigkeitstest nach Druckanstiegsmethode – Ethernet- und USB-Schnittstelle



Abb. 11: Fertig eingerichteter Dauerbeobachtungsstandort in Nürnberg. Quelle: LfU.

Zukünftig soll hier die Immission und Deposition auf POPs oder POP-ähnliche Chemikalien überprüft werden, wie zum Beispiel der Gehalt von Organophosphor-Flammschutzmitteln, die vermehrt in Umweltproben gefunden werden (Saini et al. 2020, Ye et al. 2023) und u.a. als Ersatz für PBDE genutzt werden. Aktuell bereitet die ECHA ein Beschränkungsverfahren zu Organophosphaten⁴ vor (ECHA 2023) in Übereinstimmung mit den Anforderungen der Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit (EC 2022).

Reduzierung des Probenumfangs und Umstrukturierung des immissionsökologischen Messnetzes

Als generelle Strategie wurde festgelegt, dass das Messnetz nicht alleine aus Standorten bestehen sollte, die für eine Hintergrundbelastung repräsentativ sind, sondern auch diverse Belastungssituationen wiedergeben sollte (verkehrsnahe und urbane Standorte). Die Hintergrundbelastung ist besonders wichtig zur Bestimmung der Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH). Für die Berechnung der OmH sind nach VDI Richtlinie VDI 3857 Blatt 2 / Part 2 (2021) mindestens 30 Werte über 10 Jahre notwendig. Dies gibt einen festgesetzten Rahmen an Mindestprobenahmen und -orten. Die Maßnahmen wurden in mehreren Schritten über zwei Messjahre umgesetzt. Wo nicht notwendig, wurden die Proben der Bioindikatoren zur Reduzierung des analytischen Aufwandes als Jahresmischproben genommen. Beim Biomonitoring mit Graskulturen werden an den Standorten Weibersbrunn, Ansbach und Bidingen nun Jahresmischproben gewonnen. An den Standorten Grassau, und Kulmbach wurde das Biomonitoring mit Graskulturen eingestellt. Einzelserien, also monatliche Bestimmung der Schadstoffgehalte werden an den Standorten Eining und Nürnberg beibehalten. Einmal im Jahr wird in Nürnberg eine Doppelprobe zu Bestimmung der Standardabweichung/Messunsicherheit genommen. Die Grünkohlproben werden einmal jährlich in Eining, Ansbach, Nürnberg, Weibersbrunn und Bidingen genommen. In Nürnberg wird ebenfalls eine Doppelprobe zu Bestimmung der Standardabweichung/Messunsicherheit genommen. Vollständig eingestellt wurden die Untersuchungen an den Standorten Feilitzsch, Kaisheim, Prittriching, Möhrendorf und Augsburg. Durch diese Maßnahmen konnte der Probenumfang deutlich gesenkt werden.

An der UFS wurde ebenfalls dazu übergegangen, dass die Proben nicht mehr quartalsweise, sondern als Halbjahres- bzw. Jahresmischproben analysiert werden. Dies gilt bei Proben, wo keine sprunghaften Veränderungen erwartet werden, wie beispielsweise den OCP.

Das aktuelle Messnetz Umweltmonitoring ist in Abb. 12 dargestellt.

⁴ Es geht vor allem um die Organophosphate flame retardants (OPFRs) (tris(2-chloroethyl) phosphate (TCEP), tris(2-chloro-1-methylethyl) phosphate (TCPP) und tris[2-chloro-1 (chloromethyl)ethyl] phosphate (TDCP)).

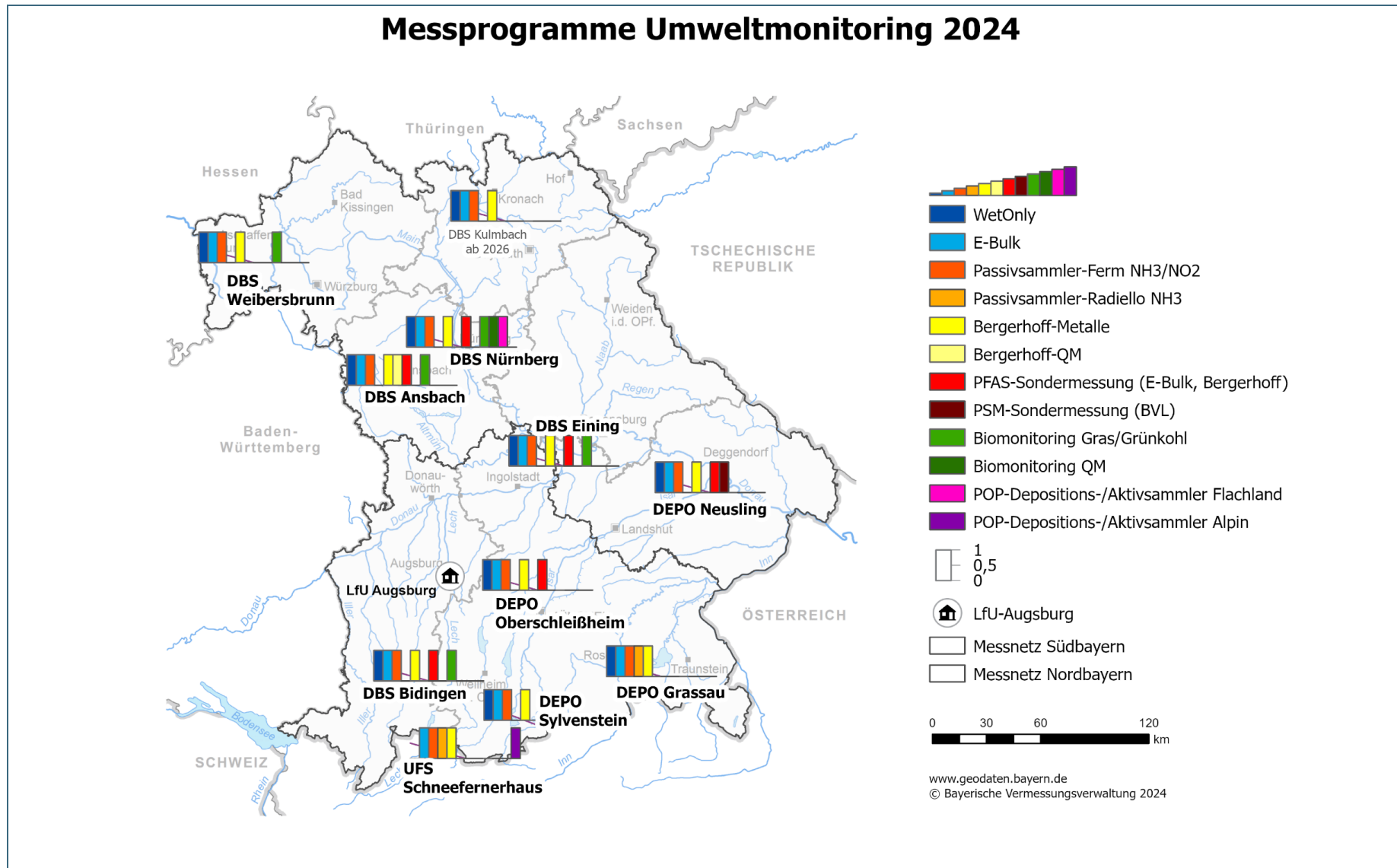


Abb. 12: Messnetz Umweltmonitoring Stand 2024. Quelle: LfU, Geobasisdaten: Esri Data & Maps

2.4 Arbeitspaket 4: Stärkung der innerdeutschen und europäischen Zusammenarbeit

2.4.1 Vorgehensweise

Das Arbeitspaket 4 sieht eine Verbesserung des Informationsaustausches zwischen Monitoringprogrammen innerhalb Bayerns, Deutschlands, Europas und weltweit vor. Der Informationsaustausch bezieht sich zum einen auf die Vernetzung mit relevanten Institutionen und Behörden und zum anderen auf die Verfügbarmachung und den leichten Zugang zu Messdaten.

Im Jahr 2020 war das LfU über die Messungen an der UFS Kooperationspartner der PESPAT Studie beteiligt. PESPAT steht für *Pan-European Study of Pesticides Atmospheric Transport*. An 31 Standorten und in 17 verschiedenen Ländern wurden mehr als 65 von derzeit verwendeten Pestiziden in der Luft bestimmt. Zusätzlich wurden über 300 PFAS untersucht. Die Studie wurde organisiert von der Masaryk-Universität, Brno (CZ), dem Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz (D), der Universität Grenoble (F), der Universität Helsinki (FI) und dem Nationalen Forschungsrat Italiens. Im Mai 2020 wurden an der UFS drei Immissionsproben genommen und an die Masaryk Universität gesendet.

Im Februar 2021 ist das Interregprojekt Bayern-Österreich protectBats zur Abklärung lokaler Aussterbeursachen der Kleinen Hufeisennase im Bayerisch-Tiroler Alpenraum angelaufen. Die Federführung des Projektes lag bei der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck mit dem Lehrstuhl für Molekulare Ökologie. Projektpartner aus Österreich sind die Koordinationsstelle für Fledermausschutz und -forschung in Österreich. Projektpartner aus Bayern waren die Koordinationsstelle für den Fledermausschutz in Südbayern, die Untere Naturschutzbehörde des Landkreises Garmisch-Partenkirchen und das Bayerische Landesamt für Umwelt.

2.4.2 Ergebnisse

Die internationale Bedeutung der Monitoringdaten zu POP in Immission und Deposition wird deutlich durch die Verwendung der Daten durch das Global Monitoring Programme der UN. Die Messdaten von der Zugspitze wurden an das Global POP Monitoring Programme (GMP)-Global Warehouse (DWH) gesendet und können international genutzt werden. Bei dem GMP-DWH handelt es sich um ein Online-Tool zur Speicherung und Visualisierung von Daten über POP-Werte. Das GMP DWH wurde vom Regionalzentrum des Stockholmer Übereinkommens in der Tschechischen Republik durch die Masaryk-Universität in Brunn, Tschechische Republik, unter der Leitung der Globalen GMP-Koordinierungsgruppe und auf der Grundlage von Kapitel 6 des Leitfadens für den Globalen Überwachungsplan für persistente organische Schadstoffe entwickelt ([Global Monitoring Plan of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: visualization and on-line analysis of data from the monitoring reports: GMP data warehouse \(pops-gmp.org\)](#)). Die Daten können unter folgendem Link eingesehen werden: https://data.pops-gmp.org/2020/all/#/gmp3/spatial-distribution#import_batch@115

Die Ergebnisse der PESPAT Studie zeigen, dass europaweit in den Immissionsproben Pflanzenschutzmittel gefunden werden, die laut Zulassungstests nicht dort zu finden sein würden. Persistenz und Ferntransport der PSM werden in der Regel unterschätzt. Die Daten unterstreichen die enorme Bedeutung des Umweltmonitorings für die Risikobewertung und Regulation von PSM.

Die Analytikergebnisse von protectBats geben Hinweise, dass vor allem die Schwermetalle Blei und Cadmium mit ausgestorbenen Populationen der Kleinen Hufeisennase korrelieren. Die Ergebnisse des Projekts werden in die weiteren Forschungsarbeiten der Universität Innsbruck einfließen und dienen den Projektpartnern zum langfristigen Fledermausschutz insgesamt. Der Projektbericht wurde bis Ende Juni 2022 erstellt und veröffentlicht ([LINK](#)).

LfU intern hat sich die Zusammenarbeit mit Referat 24 intensiviert, bedingt durch die Unterstützung zur Aufstellung von Leckelsammlern an den LÜB-Stationen um zu evaluieren, welcher Standort für eine neue Flachlandstation mit Immissionsmessgerät geeignet ist. In diesem Zusammenhang wurde ebenfalls der Austausch mit der SUN etabliert.

Weiterhin wurde mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) für die Depositionsprobenahme im Rahmen des PFAS-Monitorings zusammengearbeitet. Mit der Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf läuft aktuell eine Projektarbeit zum Thema Biomonitoring mit Löwenzahn. Regelmäßig wird ein intensiver Austausch über die aktive Teilnahme am VDI-Arbeitskreis und Mitarbeit an Richtlinien gewährleistet.

Darüber hinaus konnte ein intensiver Austausch bei der Umweltbeobachtungskonferenz im November 2021 stattfinden, indem ein Workshop zum Chemikalienmonitoring abgehalten wurde. Im Rahmen der gesamten Konferenz wurden vierundzwanzig Verbesserungsvorschläge zum Umweltmonitoring erarbeitet, die bereits veröffentlicht wurden (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/umwelt-und-energieforschung/umweltbeobachtungskonferenz/>). Der vollständig ausgearbeitete Bericht wurde 2022 veröffentlicht (https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Abschlussbericht-der-Umweltbeobachtungskonferenz-2021-barrierefrei.pdf).

Neben der Zusammenarbeit mit verschiedenen Behörden auf europäischer Ebene, stellen die Messungen an der Zugspitze einen wichtigen Anknüpfungspunkt zu internationaler Forschung dar. So wird durch die regelmäßigen Sitzungen des UFS Science Team ein intensiver Austausch gefördert. Zusätzlich wird über die Messungen im Alpenraum die Teilnahme an regelmäßig durchgeführten Veranstaltungen des Virtual Alpine Observatorium gewährleistet, wo die Messdaten des LfU 2023 vorgestellt wurden.

2.5 Arbeitspaket 5: Fortführung und Weiterentwicklung der immissionsbezogenen Umweltkommunikation

2.5.1 Vorgehensweise

Für die Akzeptanz und Unterstützung durch die Bevölkerung ist es wichtig, die Wahrnehmung und Bedeutung von Umweltmonitoring in der Öffentlichkeit zu fördern. Die Aufgabe der immissionsbezogenen Umweltkommunikation zum Eintrag anthropogener Schadstoffe in die Umwelt soll aufklären ohne Ängste zu schüren. Konkrete Umsetzung dieses Ziels wurde durch das Arbeitspaket 5 gesichert.

Schwerpunkt lag bei der Erstellung diverser Veröffentlichungen im Print-Bereich und Vorträgen. Dabei wurde versucht darauf zu achten sowohl nicht-fachliche Zielgruppen ebenso anzusprechen, wie auch Fachleute. Es gab eine Zusammenarbeit mit Journalistenschülern, eigene Veröffentlichungen, Vorträge auf Fachtagungen und als Abschlussveranstaltung einen Workshop zum Thema Umweltmonitoring.

2.5.2 Ergebnisse

Im Bereich der Umweltkommunikation wurde das Kooperationsprojekt mit der Macromedia Hochschule zu Quecksilber fertig gestellt. Ziel und Zweck dieser Zusammenarbeit war es, Wissenslücken zu füllen, indem verbesserte und leicht verständliche Information über Umweltchemikalien deren Monitoring, Stoffbewertung und Maßnahmen zur Regulierung vermittelt werden. Zusätzlich sollte Interesse geweckt werden, da gerade das Thema Stoffbewertung und Umweltchemikalien von der breiten Bevölkerung kaum oder als schwer greifbar und unzugänglich wahrgenommen werden. Über eine ansprechende Gestaltung des Layouts soll die Hemmschwelle sich mit dieser Thematik zu beschäftigen herabgesetzt werden. Und als drittes Ziel soll die Verbesserung der Wissenschafts- und

Risikokommunikation erreicht werden. Wissenschafts- und besonders Risikokommunikation ist sehr komplex und profitiert von dem intensiven Austausch zwischen Journalismus und Wissenschaft. Die Kooperation fördert das gegenseitige Verständnis und verbessert die Vermittlung wichtiger Themen an die Bevölkerung. Die entstandene Broschüre zum Thema Quecksilber kann hier ([LINK](#)) heruntergeladen werden. Als weiterer Print-Beitrag für ein breites Publikum ist der Kurzbericht zu Umweltmonitoringdaten aus den Alpen erstellt worden („Kurzbericht Schadstoffe in den Alpen – Wirkungen auf ein sensibles Ökosystem“). Die bereits erhobenen Messdaten wurden in einem leicht verständlichen Kurzbericht zusammengefasst und grafisch visualisiert. Der Bericht wurde in Schulen und Vereinen in Bayern beworben und kann im LfU-Shop heruntergeladen werden ([LINK](#)).

Bezüglich der Umweltkommunikation ist die UFS als einzigartiger Standort besonders geeignet, um Informationen zu Umweltmonitoring zu transportieren. So werden Besucher der UFS regelmäßig über die Arbeiten des LfU informiert. Zusätzlich werden die Informationen auf der Homepage zusammengefasst und in zweijährigen Berichten verfügbar gemacht (<https://schneefernerhaus.de/station/kontakt-informationsmaterial/zweijaehrige-wissenschaftliche-resultate/>). Auch in der Social-Web Präsenz der UFS werden regelmäßig die Themen des LfU und des Umweltmonitorings bespielt.

3 Umweltmonitoring in der Praxis: Luftqualitätsuntersuchungen im Umfeld der Lech-Stahlwerke Meitingen

3.1 Ausgangssituation

Die Lech-Stahlwerke GmbH (LSW) betreiben am Standort Meitingen, ca. 20 km nördlich von Augsburg ein Elektrostahlwerk und ein Warmwalzwerk zur Produktion von Qualitäts-, Bau- und Betonstahl. Als Rohstoffe werden Eisen- und Stahlschrotte eingesetzt, die in zwei Elektroschmelzöfen eingeschmolzen werden. Die LSW sind nach der 4. BImSchV immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig (gemäß Art. 10 der Industrieemissions-Richtlinie 2010/75/EU).

In einem immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren haben die LSW die Erhöhung der Produktionskapazität von derzeit 1.100.000 t/a auf 1.400.000 t/a Rohstahl und diverse Einzelmaßnahmen beantragt. Eine damit verbundene Öffentlichkeitsbeteiligung wurde im Januar 2021 im Online-Verfahren durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl und Vielfältigkeit der dabei eingegangenen Einwendungen wird der Genehmigungsprozess einige Zeit in Anspruch nehmen. Diese Zeit sollte genutzt werden, um im Umfeld der LSW in einem umfangreichen Monitoring mit Immissionsmessungen und Biomonitoringverfahren den aktuellen Umweltzustand zu erheben, die im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren vorgelegten Prognosen zu überprüfen sowie die möglichen Auswirkungen der Kapazitätssteigerung zu erkennen.

3.2 Aufgabenstellung

Das Messprogramm der Immissionsuntersuchungen ist speziell auf die mögliche Palette von Schadstoffen aus einem Stahlwerk ausgerichtet. Es beinhaltet die Konzentration von Feinstaub (PM₁₀), stahlwerkstypischen Schwermetallen und Benzo[a]pyren. Gleichzeitig wird untersucht, ob sich Schwermetalle oder organische Schadstoffe aus der Luft an Blattoberflächen von Pflanzen anreichern. Dazu wird ein Biomonitoring eingesetzt, wie es in Bayern auch für die Langzeitüberwachung von Schadstoffen Verwendung findet.

Die Messkampagne wurde in den Jahren 2021 und 2022 durchgeführt.

3.3 Zielsetzung

Im Rahmen der zweijährigen Luftqualitätsuntersuchungen im Umfeld der LSW wird die Klärung folgender Fragen bzw. die Umsetzung nachfolgender Ziele angestrebt.

- In welchem Maße ist die Bevölkerung in der Nachbarschaft des Stahlwerks betroffen?
- Die Untersuchungsergebnisse sind bzgl. BImSchG und Futter- und Lebensmittelgrenzwerten einzuordnen.
- Die Untersuchungsergebnisse sind bzgl. der Langzeitüberwachung von Schadstoffen in Bayern einzuordnen.
- Die aktuellen Ergebnisse sind mit den früheren Messungen vor Ort zu vergleichen.
- Lassen sich durch die Kapazitätserweiterung zusätzliche Belastungen im Umfeld des Stahlwerks erkennen bzw. prognostizieren?

3.4 Messpunkte, Stoffspektrum und Methoden

Die Messpunkte sind in der Karte (Abb. 14) in ihrer Lage zu den LSW eingezeichnet. Die Auswahl und Festlegung der exakten Messpunkte erfolgte im Rahmen mehrerer Ortstermine. Fotos der Messpunkte mit genauer Beschreibung sind im Anhang 8.4 aufgelistet.

Bestückung der Messpunkte und detaillierter Umfang der Immissionsmessungen

- **Messpunkt LSW_Her:** Meitingen-Herbertshofen, Feuerwehrhaus
- **Messpunkt LSW_Zoll:** Biberbach Zollsiedlung
- **Messpunkt LSW_Kan:** Langweid am Lech – Lechwerksiedlung, Kläranlage
- **Immissionsmessungen:**
 - PM₁₀-Fraktion des Schwebstaubs (als Tagesmittelwert)
 - PM₁₀-Inhaltsstoffe Aluminium, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Eisen, Kobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Vanadium, Zink, Zinn und Benzo[a]pyren (als 28-Tages-Mittelwert)
 - Quecksilber gasförmig (als 14-Tages-Mittelwert)
- **Depositionsmessungen:**
 - Quecksilber (als 28-Tages-Mittelwert)
- **Meteorologie:**
 - Im Rahmen der Immissionsmessungen werden meteorologische Messungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit nach VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2 über den entsprechenden Messzeitraum durchgeführt. Diese Messungen werden am Messpunkt LSW_Kan realisiert, der eine möglichst repräsentative Strömungscharakteristik für das Untersuchungsgebiet aufweist. Die Standardmesshöhe für die Größen Windrichtung und Windgeschwindigkeit beträgt 10 m über Grund.
- Untersuchungszeitraum: vom 01.04.2021 bis 31.03.2023 (2 Jahre)
- Auftragnehmer: TÜV SÜD Industrie Service GmbH
- Vor-Ort-Begehungen: am 11.03.2021 und 22.03.2021
- Die Aufstellung der Messcontainer mit den Probenahmegeräten erfolgte am 31.03.2021.
- Betreuungsaufwand während der Untersuchungen:
 - 14-täglich Austausch des Filtermagazins (für PM₁₀-Fraktion des Schwebstaubs)
 - 28-täglich Austausch des Bergerhoff-Bechers (für Quecksilber-Deposition)

Bestückung der Messpunkte und Umfang des Biomonitorings (Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen nach VDI-Richtlinie 3957 Blatt 2, Blatt 3 und Blatt 10)

- **Messpunkt LSW_Her:** Meitingen-Herbertshofen, Feuerwehrhaus
- **Messpunkt LSW_Zoll:** Biberbach Zollsiedlung
- **Messpunkt LSW_Kan:** Lechkanal, Langweid am Lech – Lechwerksiedlung
- **Messpunkt LSW_NSg:** Naturschutzgebiet (NSG) „Lechaue westlich Todtenweis“
- **Messpunkt LSW_Ref:** Referenz-Messpunkt Langweid am Lech – Grüngutsammelstelle Achsheim

- **Verfahren der standardisierten Graskultur** (nach Blatt 2) in fünf aufeinanderfolgenden je vierwöchigen Expositionen von Graskulturen von Kalenderwoche (KW) 17 bis KW 37:
 - Anreicherung von Metallen (Aluminium, Antimon, Arsen, Barium, Bismut, Blei, Cadmium, Cer, Chrom, Eisen, Kobalt, Kupfer, Lanthan, Mangan, Nickel, Niob, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zink und Zinn)
 - Anreicherung von polychlorierten Dibenzodioxinen/-furanen (PCDD/F), polychlorierten Biphenylen (PCB) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK)

- **Verfahren der standardisierten Grünkohlexposition** (nach VDI 3957 Blatt 3) in einer achtwöchigen Exposition von Grünkohl von KW 37 bis KW 45:
 - Anreicherung von polychlorierten Dibenzodioxinen/-furanen (PCDD/F), polychlorierten Biphenylen (PCB) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK)
 - Einsatz aktiver Biomonitoringverfahren im Bereich von Emissionsquellen (nach Blatt 10)
 - Paralleluntersuchungen in KW 29 und KW 37 zur Qualitätssicherung
 - Untersuchungszeitraum: 2021 und 2022 (2 Wachstumsperioden)
 - Auftragnehmer: UMW Umweltmonitoring Dr. Monica Wäber
 - Vor Ort-Begehungen: am 10.03.2021 und 11.03.2021
 - Einrichtung der Messstellen: in KW 16/2021
 - Untersuchungsbeginn: mit Exposition der Pflanzen in KW 17/2021
 - Letzte Probenahme mit Ernte der Grünkohlpflanzen: KW 45/2022

- **Betreuungsaufwand während der Untersuchungen:**
 - Probenahme mit Ernte des Pflanzenmaterials in KW 21, 25, 29, 33, 37 und 45
 - Düngefahrten in KW 19, 23, 27, 31, 35 und 41

Einsatz des Löwenzahnscreenings als Methode zum anlagenbezogenen Umweltmonitoring

- In NRW wird seit Ende der 2010er Jahre das Löwenzahnscreening eingesetzt. Die Erkenntnisse sollen Eingang in die neu zu verfassende VDI-Richtlinie 3957 Blatt 7 finden. Im Rahmen einer beim LfU durchgeführten Projektstudie der Fakultät Umweltingenieurwesen der Hochschule Weihenstephan Triesdorf beteiligt sich das LfU an der Entwicklung dieser VDI-Richtlinie
- Löwenzahnprobenahme in KW 21 und 25 2021 an den fünf LSW-Standorten sowie DBS Augsburg und Ansbach

- Entnahme einer Mischprobe je Termin und Standort
- Analytik der Löwenzahnproben auf Metalle sowie PCDD/F, PCB, PAK
- Bodenprobenahme in KW 21 2021; Analytik auf Metalle
- Probenahme und Aufbereitung durch Hochschule Weihenstephan-Triesdorf HSWT; Analytik durch LfU; Auszug aus Projektbericht in Anhang 8.5

Abb. 13 zeigt die Windrichtungsverteilung in Form einer Windrose für den Messzeitraum 01.04.2021 bis 31.03.2023. Im Messzeitraum dominieren westliche und östliche Windrichtungen. Hohe Windgeschwindigkeiten mit mehr als 4 m/s treten im Wesentlichen nur bei Wind aus westlichen bis südwestlichen Richtungen auf.

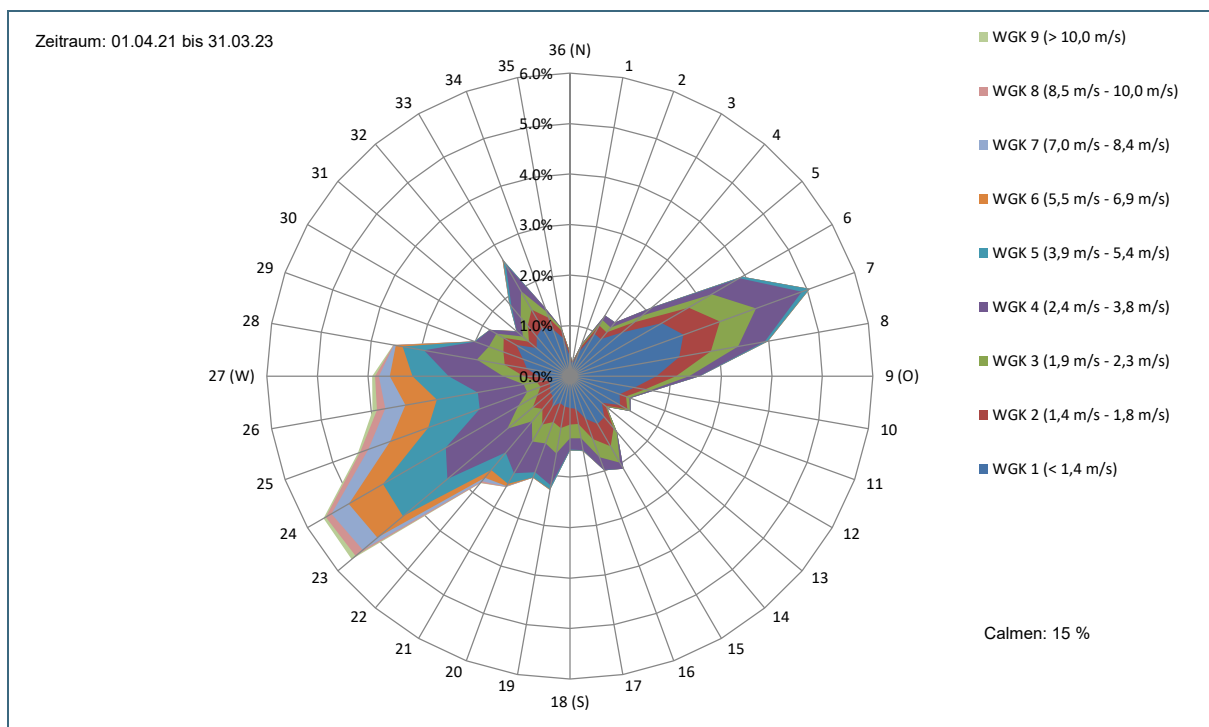


Abb. 13: Windrichtungsverteilung am Standort Lechkanal, Quelle: Schlussbericht Immissions- und Depositionsmessungen an den Lech-Stahlwerken Meitingen: https://www.bestellen.bayern.de/shop-link/lfu_luft_00215.htm

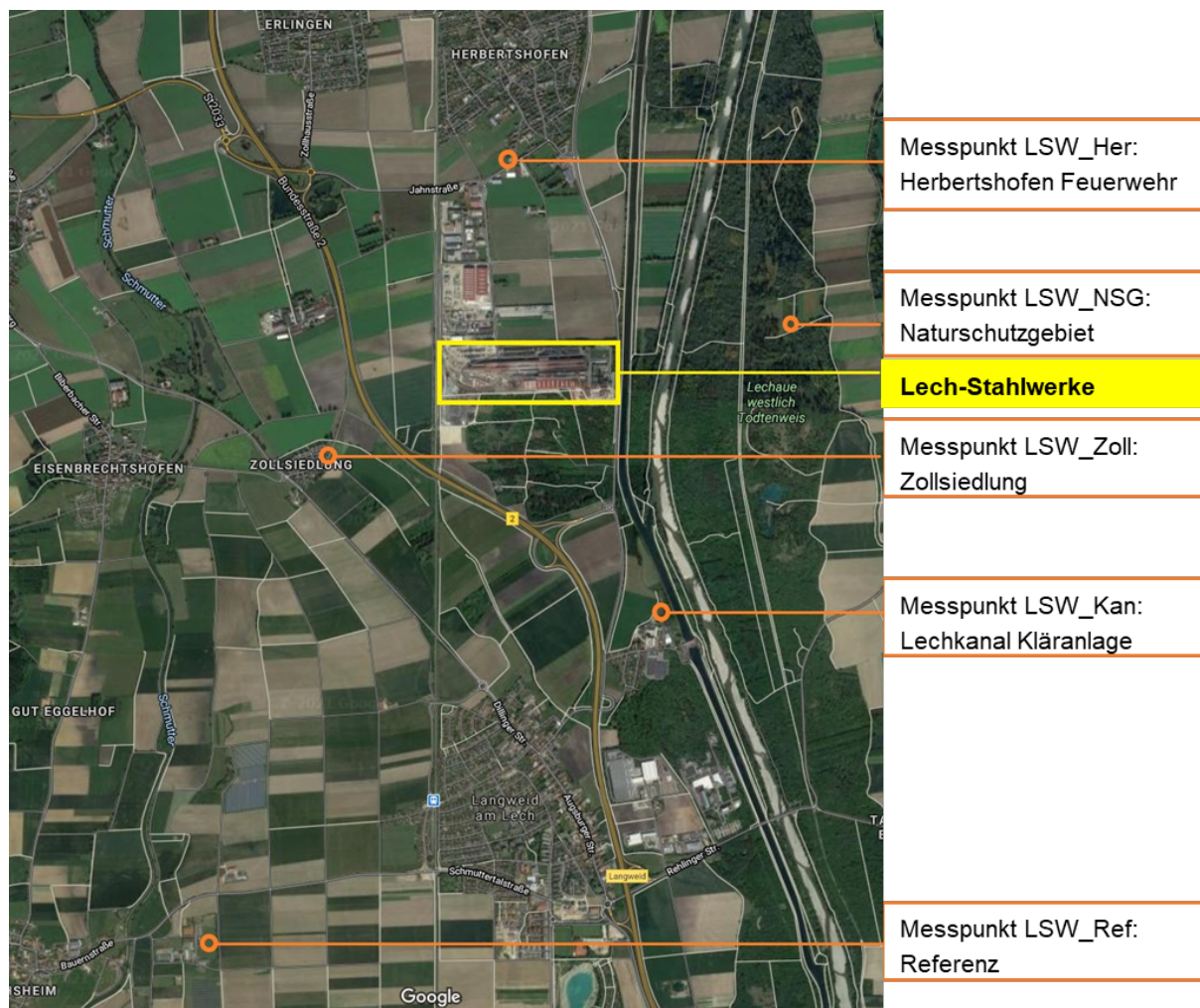


Abb. 14: Messpunktekarte Untersuchungen Lech-Stahlwerke. Quelle: GoogleMaps.

Bezogen auf die Lech-Stahlwerke, liegen die untersuchten Messstandorte nördlich, westlich, östlich und südlich des Werksgeländes. Der Messpunkt Herbertshofen liegt bei südlichem Wind, die Zollsiedlung bei Ostwind, das NSG Todtenweis bei Westwind und der Messpunkt am Lechkanal Kläranlage bei nördlichem Wind im Einflussbereich der Lech-Stahlwerke. Der Referenz-MP liegt ca. 4,3 km südwestlich, wo gemessene Schadstoffgehalte nicht mehr eindeutig der Emissionsquelle LSW zugeordnet werden können.

Beprobungsplan der Biomonitoringverfahren in den Jahren 2021 und 2022

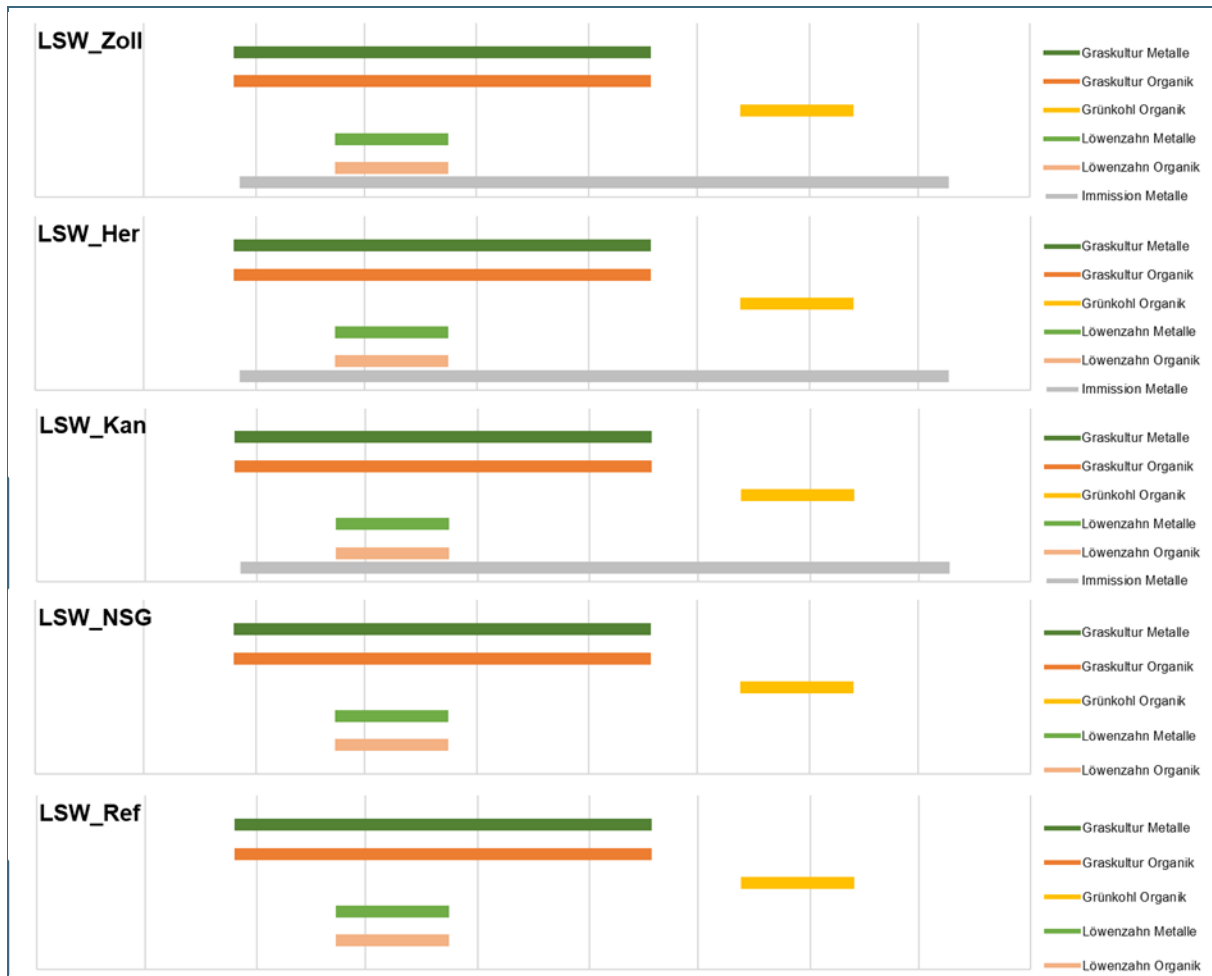


Abb. 15: Beprobungsplan für die fünf Messpunkte mit Angabe der Art und Dauer der verschiedenen Untersuchungsverfahren. Löwenzahn wurde an den Messpunkten nur in 2021 beprobt.

3.5 Ergebnisse

Bereits in den Jahren 2014/ 2015 wurden Immissionsmessungen an den drei Messpunkten LSW_Her, LSW_Zoll und LSW_Kan durchgeführt und in den Jahren 2007/2008 fand im Umfeld der LSW ein ausgedehntes Biomonitoring statt, bei dem auch alle aktuellen fünf Messpunkte untersucht wurden. Die veröffentlichten Ergebnisse der vormaligen Messungen des LfU ([2007–2008](#) bzw. [2014–2015](#)) zeigen, dass alle geltenden Grenz- und Zielwerte deutlich unterschritten wurden.

Die Ergebnisse der aktuell angesetzten Untersuchungskampagne können mit den früheren Untersuchungen verglichen werden. Dabei wird deutlich, dass die Immissionen der untersuchten Stoffe z.T. stark zurückgegangen sind. Im Detail werden die Ergebnisse in den folgenden Kapiteln dargestellt.

3.5.1 Immissions- und Depositionsmessungen

Zu den im Berichtszeitraum durchgeführten Immissions- und Depositionsmessungen liegt der Schlussbericht vor (Quelle: https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_luft_00215.htm).

Zusammengefasst lässt sich folgendes zu den Ergebnissen sagen:

Im Messzeitraum ergibt sich für alle drei Messstandorte eine mittlere Konzentration an Partikeln PM₁₀ von 13 µg/m³ bis 14 µg/m³, am Messpunkt MP2 bis 16 µg/m³. Der Messpunkt MP2 Zollsiedlung wurde im September und Oktober 2022 durch Bauarbeiten in der Siedlung beeinflusst, was zu geringfügig höheren Konzentrationen führte. Der Immissions(grenz)wert der 39. BImSchV⁵ beziehungsweise der TA Luft 2021⁶ von 40 µg/m³ für das Kalenderjahresmittel beziehungsweise Jahresmittel wird deutlich unterschritten.

Im gesamten Messzeitraum kam es nur am 01.01.2023 zu einer Überschreitung des Tagesmittelwerts von 50 µg/m³. Diese Überschreitung an allen Messstandorten ist auf die Auswirkungen des Silvesterfeuerwerks zurückzuführen. Die Anforderung, dass an maximal 35 Tagen im Jahr ein Tagesmittelwert von 50 µg/m³ überschritten werden darf, wird sicher eingehalten.

Als besondere Einflussgrößen auf die PM₁₀-Konzentrationen an allen Messstandorten stellten sich eine Saharastaubepisode im März 2022 sowie das Silvesterfeuerwerk 2022/2023 heraus, die zu auffälligen Immissionsspitzen führten.

Neben der Ermittlung der Konzentration von PM₁₀ mit dem Referenzverfahren wurden die tageweise anfallenden Filterproben in einem weiteren Schritt auf Inhaltsstoffe analysiert. Dazu wurden jeweils für einen Zeitraum von vier Wochen (28 Tage) Mischproben gebildet und gemeinsam auf den Gehalt an ausgewählten Elementen (Metalle und Halbmetalle) sowie Benzo(a)pyren (BaP) analysiert.

Für die Staubinhaltsstoffe Blei, Arsen, Cadmium, Nickel, Chrom, Vanadium, Mangan sowie ihre Verbindungen sowie für BaP liegen für eine Bewertung Beurteilungsmaßstäbe in Form von Grenz-, Ziel-, Prüf- und Richtwerten vor. Für den Vergleich mit den Beurteilungswerten ist jeweils der Mittelwert über ein Jahr zu bilden.

Die Auswertung der Messergebnisse der Staubinhaltsstoffe ergab für alle drei Messstandorte und alle oben aufgeführten Schadstoffe eine deutliche Unterschreitung der Beurteilungswerte. Im Mittel liegen die Konzentrationen in einem für ländliche bis städtische Gebiete typischen Bereich.

Bei Benzo(a)pyren (BaP) wurden die höchsten Messwerte an den Standorten Zollsiedlung und Herbertshofen mit größerer Nähe zu Wohngebieten und die niedrigsten am Standort Kläranlage ermittelt. Kleinf Feuerungsanlagen, die mit festen Brennstoffen wie Holz betrieben werden, sind die Hauptemissionsquelle für BaP. Der Verlauf für die Konzentration an BaP weist erwartungsgemäß einen stark ausgeprägten Jahresgang entsprechend der Heizperiode auf. Entsprechend wurden in den beiden Winterperioden 2021/2022 und 2022/2023 die höchsten Werte gemessen.

Weiterhin wurde die Konzentration an gasförmigem Quecksilber ermittelt. Die Messwerte lagen meist unter der Bestimmungsgrenze von 1 ng/m³. Dies entspricht auch der üblichen Konzentration an Quecksilber in der Umgebungsluft. Der für die Bewertung heranzuziehende Beurteilungswert der LAI von 50 ng/m³ ⁷ wird weit unterschritten.

Die ermittelte Deposition an Quecksilber liegt an den drei Messstandorten im Bereich der Bestimmungsgrenze bis maximal 0,02 µg/(m² Tag). Der Immissionswert der TA Luft in Höhe von 1 µg/(m² Tag) wird weit unterschritten.

⁵ Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmenge – 39. BImSchV) vom 25.01.2010

⁶ Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021

⁷ Immissionswerte für Quecksilber, Quecksilberverbindungen: Bericht des Unterausschusses „Wirkungsfragen“ des LAI, verabschiedet in seiner 89. Sitzung vom 25.–27.10.1995

Der Vergleich mit Ergebnissen von Referenzstationen für ländliche, städtische und verkehrsnahe Standorte zeigt, dass die ermittelten Konzentrationen und Depositionen im Fall von Quecksilber im typischen Bereich von ländlichen bis städtischen Standorten liegen.

Zur Bewertung der Produktionsauslastung der Lech-Stahlwerke kann die Rohstahlproduktion herangezogen werden. Bezogen auf die mittlere Produktion von 2015 bis einschließlich 2022, lag die Produktion in den Jahren 2021 und 2022 bei 105 % beziehungsweise 84 %. Für das Jahr 2015 ergeben sich auf dieser Basis 104 %. Die Rohstahlproduktion im Jahr 2022 lag damit wahrscheinlich konjunkturbedingt niedriger als in den Vorjahren.

3.5.2 Biomonitoring von Schadstoffen aus der Luft

Biomonitoringverfahren mit standardisierten Pflanzen sind relativ einfach und kostengünstig durchzuführen. Richtig eingesetzt und nach den vorgeschriebenen Richtlinien angewandt, liefern sie Aussagen zur Anreicherung von Metallen und organischen Schadstoffen über den Luftpfad. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse unterstützen die Bewertung der Immissionssituation vor Ort, in der landwirtschaftlich genutzten Umgebung und der Betroffenheit der Bevölkerung. Eine Stärke des pflanzlichen Biomonitorings ist es, die Anwohner in der Nachbarschaft einer Industrieanlage verständlich und nachvollziehbar über mögliche Auswirkungen von Schadstoffimmissionen auf Basis von vor Ort gewonnenen Messdaten zu informieren.

Dioxine (PCDD) und Furane (PCDF) entstehen als unerwünschte Nebenprodukte bei der Verbrennung organischer Stoffe in Gegenwart von Chloriden, z. B. bei der Verbrennung von Kunststoffen. Natürliche Quellen für Dioxine und Furane sind z. B. Waldbrände. Die Müllverbrennung trug in den 1980er-Jahren zur Verbreitung von Dioxinen und Furanen in der Umwelt bei. Industrieanlagen, wie z. B. Elektrostahlwerke weisen mehrere Quellen, auch für diffuse Emissionen auf. Inzwischen sorgen Einhausungen, Filter- und Abgasreinigungsanlagen für das Abscheiden der Schadstoffe und die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte. Dagegen verursachen heute die kleinen Feuerungsanlagen von Privathaushalten (Hausbrand) und Kleinverbrauchern neben den thermischen Prozessen der Metallherstellung einen erheblichen Teil der Dioxinbelastung der Umwelt.

Der Eintrag von Dioxinen und Furanen über den Luftpfad in den Boden und in Pflanzen führt über die Nahrungskette schließlich zu einer Anreicherung im Menschen und kann eine Reihe gesundheitsschädigender Wirkungen auslösen.

Polychlorierte Biphenyle (PCB) sind in der Natur nicht vorkommende persistente organische Schadstoffe mit insgesamt 209 Einzelsubstanzen (Kongenere). Der Großteil dieser Kongenere gilt als toxisch bzw. krebserregend. Einige Kongenere weisen aufgrund ihrer chemischen Struktur dioxinähnliche Wirkungen auf, sie werden als **dioxinähnliche PCB (dl-PCB)** zusammengefasst. Die **nicht-dioxinähnlichen PCB** werden als Summe von sechs bestimmten **Indikator-PCB**, multipliziert mit dem Faktor fünf betrachtet. Im Unterschied zu den Dioxinen und Furanen sind die PCB bewusst in technischen Gemischen in bestimmten Industriebereichen zum Einsatz gebracht worden. Als Schmierstoffe, Hydrauliköle oder Isolationsmittel in Transformatoren und Kondensatoren oder in sogenannten offenen Anwendungen in Farben, Dichtungen und Weichmachern sind sie damit genauso ubiquitär (allgegenwärtig) verbreitet wie die Dioxine und Furane. Die Herstellung von PCB ist in Deutschland seit 1978, weltweit seit 1985 verboten.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind eine Gruppe von etwa 10.000 Verbindungen, die ebenfalls zu den schwer abbaubaren organischen Schadstoffen zählen. Die PAK sind Bestandteil von Verkehrsabgasen und entstehen unter anderem bei der Kokserzeugung und der Holzverbrennung (Hausbrand). Sie binden sich an Ruß und Staubpartikel. Einzelne Verbindungen gelten als stark krebserzeugend.

Für die Palette von rund 20 untersuchten **Metallen bzw. Elementen** gibt es zahlreiche Quellen. Viele Elemente sind Bestandteile der Erdkruste. Deren Verwitterungsprodukte (Bodenstäube) können mit dem Wind über kurze aber auch über längere Distanzen (z. B. Saharastaub) verfrachtet werden. Weitere Quellen für metallische Elemente sind z. B. der Straßenverkehr, Energieerzeuger oder produzierende und verwertende Industriebetriebe.

Bewertungsgrundlagen für die Untersuchungsergebnisse organischer Schadstoffe

Die Analysenergebnisse werden mit EU-Grenzwerten für Futtermittel⁸, hier Futtermittel-Ausgangserzeugnisse pflanzlichen Ursprungs, sowie mit EU-Auslöse- und EU-Höchstwerten für Lebensmittel⁹, hier Gemüse, verglichen. Außerdem können sie den langjährigen Untersuchungen im bayerischen Hintergrund gegenübergestellt werden. Dafür dienen die Messergebnisse der immissionsökologischen Dauerbeobachtungsstationen (DBS). Um Messwerte einzelner Expositionsserien bewerten zu können, gibt es Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH), die in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3857 Blatt 2¹⁰ abgeleitet werden. Sie repräsentieren die Hintergrundbelastungen Bayerns sowie deren Schwankungen. Anhand der OmH lässt sich beurteilen, ob eine über die Hintergrundbelastung hinausgehende Immissionswirkung vorliegt. Von einem Immissionseinfluss ist erst dann auszugehen, wenn ein gemessener Elementgehalt abzüglich der Standardunsicherheit den OmH überschreitet.

Die Analysenergebnisse für das Biomonitoringverfahren sind auf die Gras-Trockensubstanz mit 0 % Restfeuchte bezogen. Die EU-Futtermittelgrenzwerte sind im Original auf 12 % Feuchtigkeitsgehalt bezogen, deshalb werden diese zum besseren Vergleich auf 0 % Feuchtigkeitsgehalt umgerechnet:

Aktionsgrenzwert dioxinähnliche PCB (dl-PCB)¹

0,35 ng/kg (bei 12 % Feuchtigkeitsgehalt)	entspricht 0,40 ng/kg TS
---	--------------------------

Aktionsgrenzwert PCDD/F¹

0,5 ng/kg (bei 12 % Feuchtigkeitsgehalt)	entspricht 0,57 ng/kg TS
--	--------------------------

Höchstgehalt PCDD/F¹

0,75 ng/kg (bei 12 % Feuchtigkeitsgehalt)	entspricht 0,85 ng/kg TS
---	--------------------------

Höchstgehalt für die Summe der PCDD/F und der dl-PCB nach EU-Verordnung¹

1,25 ng/kg (bei 12% Feuchtigkeitsgehalt)	entspricht 1,42 ng/kg TS
--	--------------------------

Höchstgehalt Indikator-PCB¹

10 µg/kg (bei 12 % Feuchtigkeitsgehalt)	entspricht 11,36 µg/kg TS
---	---------------------------

⁸ Verordnung (EU) Nr. 277/2012 der Kommission vom 28. März 2012 zur Änderung der Anhänge I und II der Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Höchstgehalte und Aktionsgrenzwerte für Dioxine und polychlorierte Biphenyle

⁹ Empfehlung der Kommission (2013/711/EU) vom 3. Dezember 2013 zur Reduzierung des Anteils von Dioxinen, Furanen und PCB in Futtermitteln und Lebensmitteln

¹⁰ VDI-Richtlinie 3857 (Blatt 2) (07/2021) Beurteilungswerte für immissionsbedingte Stoffanreicherungen in standardisierten Graskulturen - Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte ausgewählter anorganischer Luftverunreinigungen

Für den Vergleich mit Lebensmittelwerten sind die Untersuchungsergebnisse bezogen auf Frischgewicht dargestellt.

Auslösewert in Gemüse für PCDD/F² 0,30 ng/kg Frischgewicht

Auslösewert in Gemüse für dl-PCB² 0,10 ng/kg Frischgewicht

Sofern ein Auslösewert überschritten wird, ist es angezeigt, die Kontaminationsquelle zu ermitteln und für ihre Eindämmung oder Beseitigung zu sorgen

Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH)	Graskulturen	Grünkohl
PCDD/F WHO-TEQ (2005) in ng/kg TS	0,097	0,40
PCB WHO-TEQ (2005) in ng/kg TS	0,225	0,14
DIN-PCB * 5 in µg/kg TS	4,6	9,2
16 EPA-PAK in µg/kg TS	35	312

Die Bewertung anhand der Futter- bzw. Lebensmittelwerte ist bei Bioindikatoren nur bedingt möglich, da die rechtlich festgelegten Werte nur für Futtermittel oder für Pflanzen gelten, die zur Lebensmittelzubereitung verwendet werden. Bioindikatoren sind unter standardisierten Bedingungen gezogene Pflanzen, die der Anzeige von Schadstoffanreicherungen aus der Luft dienen. Aus Überschreitungen der Grenzwerte in Bioindikator-Pflanzen können keine unmittelbaren Folgemaßnahmen gefordert werden, nach VDI-Richtlinie geben sie jedoch den Hinweis darauf, dass Futtermittel bzw. Lebensmittelpflanzen, die an den betroffenen Standorten gewonnen werden, untersucht werden sollten.

Das Prinzip der Bioindikation bei Anwendung in einer emittentenbezogenen Untersuchung erlaubt es außerdem, immissionsbedingte Stoffanreicherungen sowohl zeitlich als auch räumlich zu erfassen und bei entsprechender Lage der Messpunkte einer Quelle zuzuordnen.

Bewertungsgrundlagen für die Untersuchungsergebnisse von Metallen

Die Analysenergebnisse werden den Ergebnissen der parallelen Untersuchungen im bayerischen Hintergrund gegenübergestellt. Werden immissionsbedingte Stoffanreicherungen erkannt, werden die Daten außerdem - wenn vorhanden - mit Futtermittelgrenzwerten verglichen. Die Bewertung anhand von Futtermittelwerten ist nach VDI-Richtlinie jedoch nur bedingt möglich, da eine Überschreitung dieser Grenzwerte in Bioindikatoren nur den Hinweis darauf geben kann, dass geeignete Futtermittel bzw. Lebensmittelpflanzen untersucht werden sollten. Zur Einordnung von Messwerten können daher Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) dienen.

Für Quecksilber, Cadmium, Arsen und Blei sind Futtermittelgrenzwerte festgelegt. Sie sind durch EU-Richtlinien als unerwünschte Stoffe in der Tierernährung in ihrem Höchstgehalt in Futtermitteln begrenzt. Nach Anhang I der Richtlinie¹¹ und ihren Änderungen gelten folgende Werte, bezogen auf 12 % Feuchtigkeitsgehalt:

¹¹ RL 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung

Quecksilber	0,1 mg pro kg Futtermittel-Ausgangserzeugnis pflanzlichen Ursprungs entspricht 0,11 mg pro kg TS
Cadmium	1 mg pro kg Futtermittel-Ausgangserzeugnis pflanzlichen Ursprungs entspricht 1,1 mg pro kg TS
Arsen	2 mg pro kg Futtermittel-Ausgangserzeugnis pflanzlichen Ursprungs entspricht 2,3 mg pro kg TS
Blei	30 mg pro kg Grünfutter entspricht 34 mg pro kg TS.

Zudem definiert die Richtlinienreihe VDI 2310 maximale Immission-Werte zum Schutz der landwirtschaftlichen Nutztiere für eine ganze Reihe von Metallen.

Die bayerischen OmH werden vom LfU aus eigenen Untersuchungen zur Verfügung gestellt, da es nur für wenige Metalle gesetzliche Grenzwerte gibt. Sie sind aus mehrjährigen Ergebnissen der immissionsökologischen Dauerbeobachtung an unbelasteten Standorten berechnet und werden regelmäßig aktualisiert. Die Grundlagen zur Berechnung sind im Internet beschrieben: https://www.lfu.bayern.de/luft/schadstoffe_luft/schwermetalle/ergebnisse/doc/omh_graskultur.pdf. bzw. finden sich in VDI-Richtlinie 3857 Blatt 2. Hieraus wurden auch überregionale OmH (OmH_{ür}) mit wesentlich größerer Datengrundlage entnommen und als Bewertungsmaßstab eingefügt, da die bayerischen OmH wegen des Bezugs auf unbelastete Hintergrundstandorte tendenziell sehr niedrig liegen (Tab. 12).

Element	OmH	OmH _{ür}
Al	37	56
As	0,18	0,23
Ba	10	11
Bi	0,010	-
Cd	0,052	-
Ce	0,054	-
Co	0,77	0,70
Cr	0,19	0,51
Cu	5,8	8,8
Fe	79	103
Hg	0,0080	0,011
La	0,033	-
Mn	87	-
Nb	0,0053	-
Ni	5,3	-
Pb	-	0,36
Sb	-	-
Sn	0,10	-
Tl	-	-
V	0,090	0,15
Zn	36	41

Tab. 12: Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte (OmH) für Metalle in Graskultur (2013-2022) sowie überregionale OmH_{ür} (jeweils in [mg/kg TS])

Für Antimon, Blei und Thallium konnte kein OmH berechnet werden, da zu wenige quantifizierte Messwerte verfügbar waren

Ergebnisse der Untersuchung organischer Parameter in den Jahren 2021 und 2022

Zunächst sind die einzelnen Ergebnisse der jeweils sechs Untersuchungskampagnen der Jahre 2021 und 2022 mit den Biomonitoringpflanzen abgebildet. Die Abb. 16 bis Abb. 19 zeigen die untersuchten organischen Parameter Dioxine/Furane (PCDD/F), dioxinähnliche polyzyklische Biphenyle (dl-PCB), Indikator-PCB und polychlorierte aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in den fünf aufeinanderfolgenden Graskulturkampagnen und die Abb. 20 bis Abb. 23 in der achtwöchigen Grünkohlkampagne.

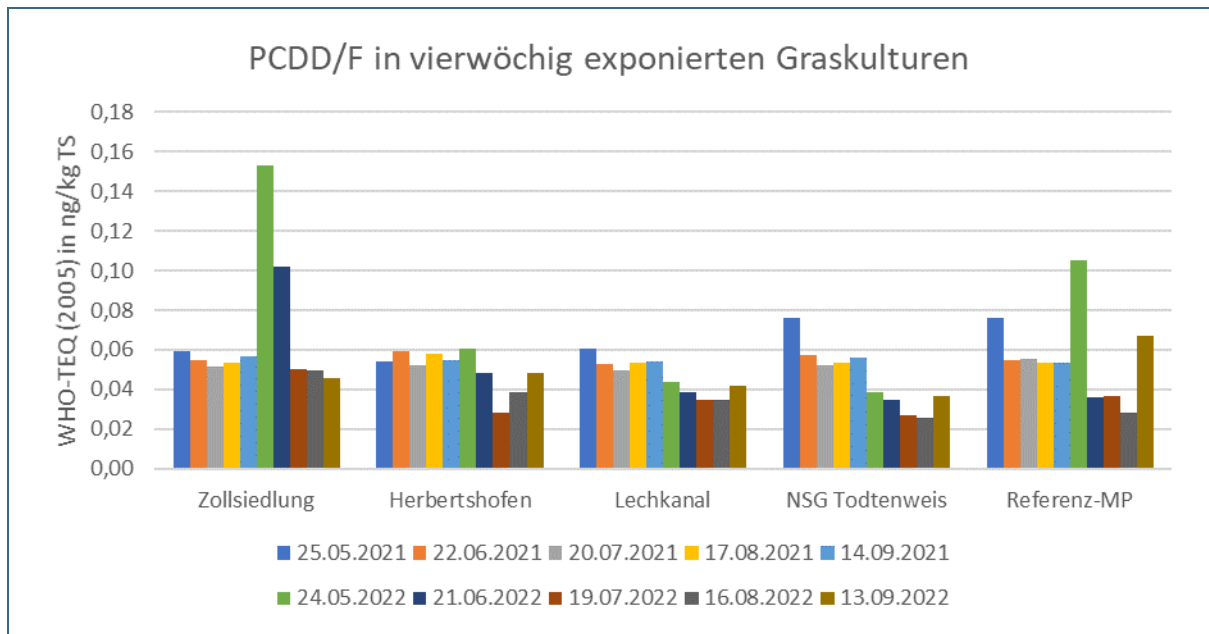


Abb. 16: PCDD/F-Gehalte in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.

Bis auf einzelne höhere Werte im Mai und Juni 2022 am Messpunkt (MP) Zollsiedlung und im Mai 2022 am Referenz-MP sind die PCDD/F-Ergebnisse recht einheitlich niedrig an allen untersuchten Standorten. Die Werte 2022 liegen noch unter den Werten von 2021.

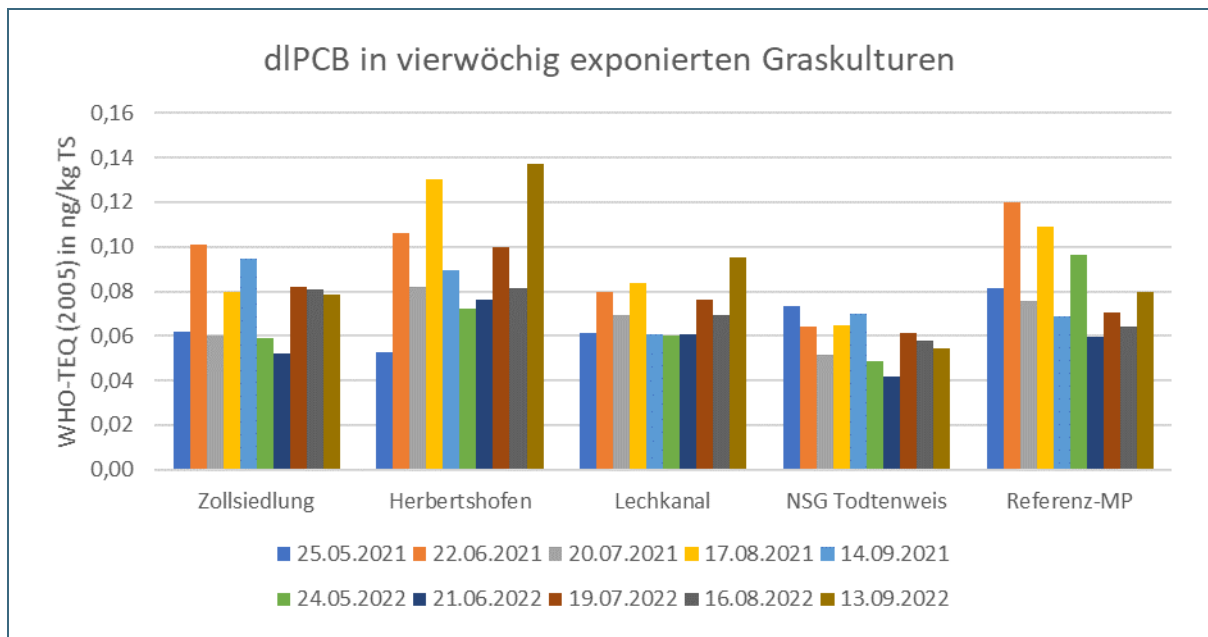


Abb. 17: Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.

Die dioxinähnlichen PCB zeigen in beiden Messjahren an allen untersuchten Standorten leicht schwankende Ergebnisse ohne einheitlichen Trend.

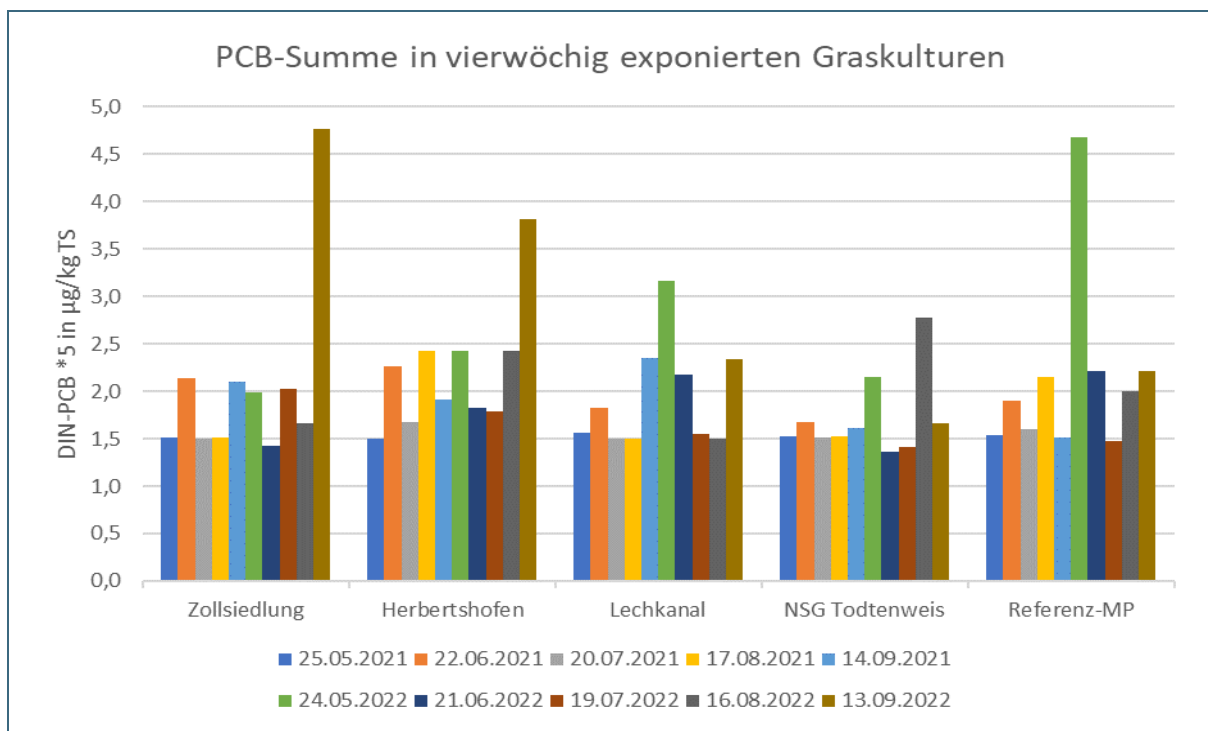


Abb. 18: Gehalte der Indikator-PCB in Graskulturen dargestellt in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.

Die Ergebnisse aus dem ersten Untersuchungsjahr liegen an allen MP auf annähernd gleichem Niveau. Im zweiten Untersuchungsjahr treten einzelne höhere Messwerte im Mai und August/September an unterschiedlichen MP auf.

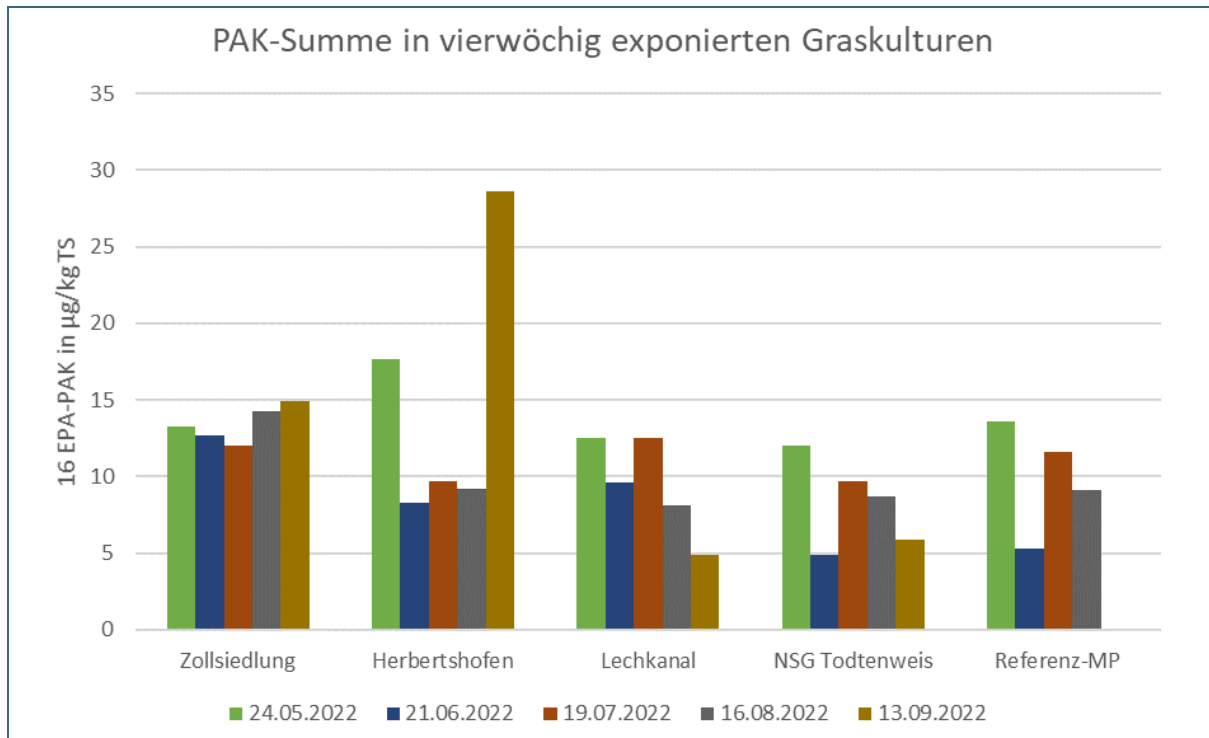


Abb. 19: Gehalte der PAK in Graskulturen als Summe der 16 PAK nach EPA an den Messpunkten (MP) um die LSW. Dargestellt sind nur die fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen aus 2022. Die Proben aus 2021 konnten wegen zu hohen Bestimmungsgrenzen des beauftragten Labors nicht ausgewertet werden. Von der letzten Probe in 2022 am Referenz-MP liegt ebenfalls keine Analyse vor.

Im Vergleich der untersuchten Standorte sind die Ergebnisse am Messpunkt Zollsiedlung einheitlich über alle Messkampagnen. Dagegen zeigen die Werte an den anderen MP höhere Schwankungen im Jahresverlauf.

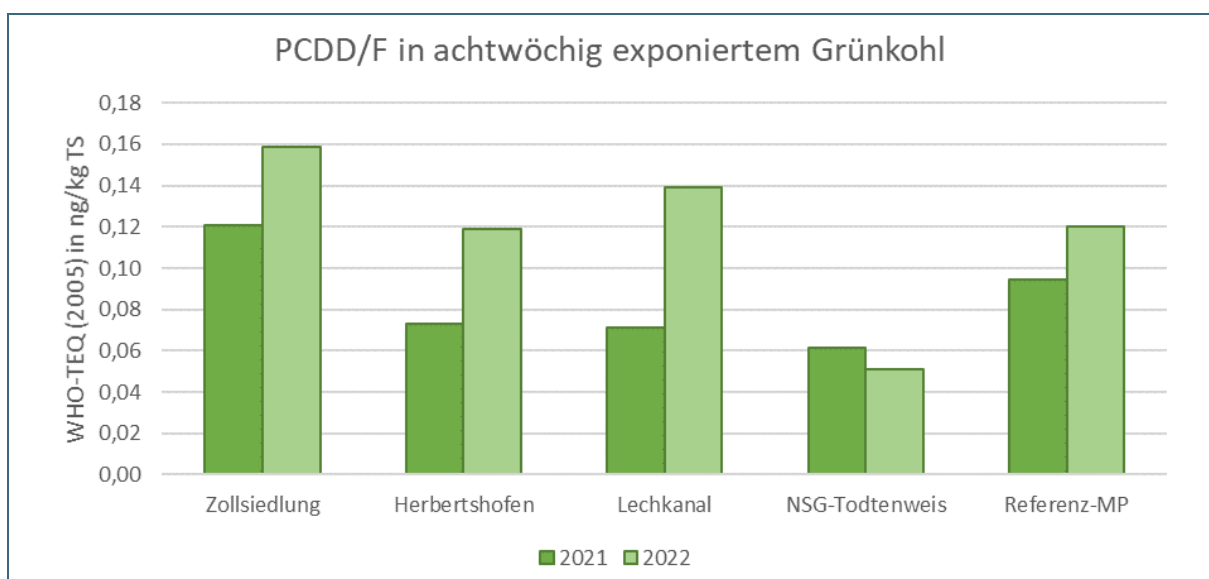


Abb. 20: PCDD/F-Gehalte in Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.

In beiden Untersuchungsjahren sind Unterschiede der PCDD/F-Gehalte zwischen den verschiedenen MP erkennbar. 2022 sind die Gehalte an allen MP höher als 2021, bis auf den MP im NSG Todtenweis, der in beiden Jahren vergleichbar niedrige Werte aufweist.

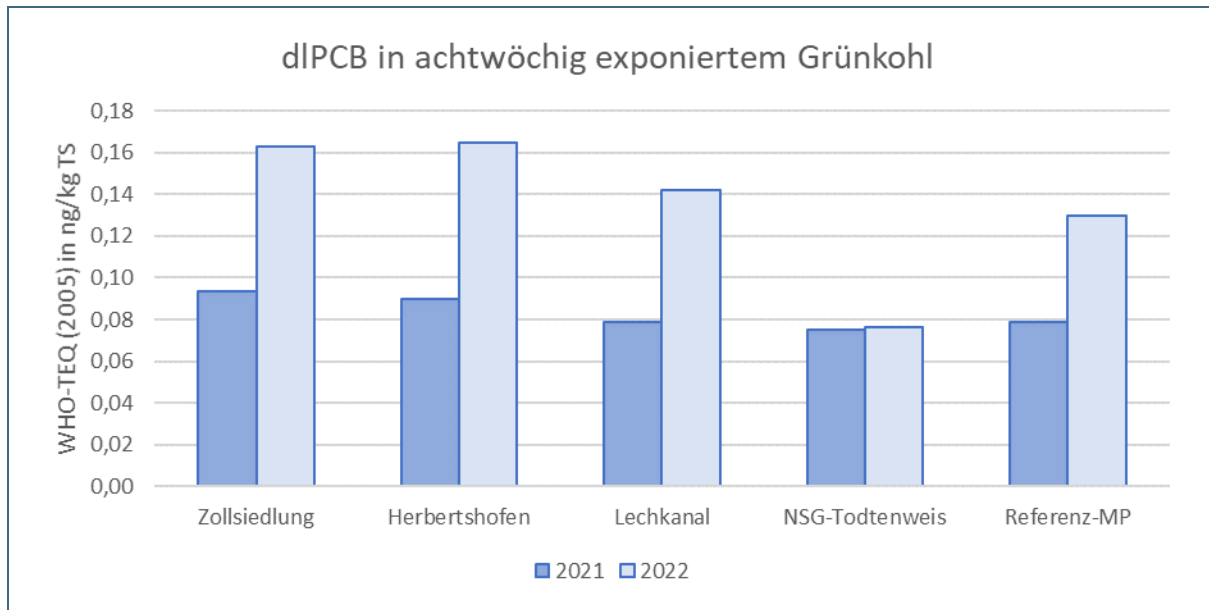


Abb. 21: Gehalte der dioxinähnlichen PCB im Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.

Auch die dioxinähnlichen PCB fallen 2022 höher aus als 2021, bis auf den MP im NSG Todtenweis. Dort sind die Gehalte in beiden Jahren gleich niedrig. Damit liegen die Werte in 2021 an allen MP auf annähernd gleichem Niveau.

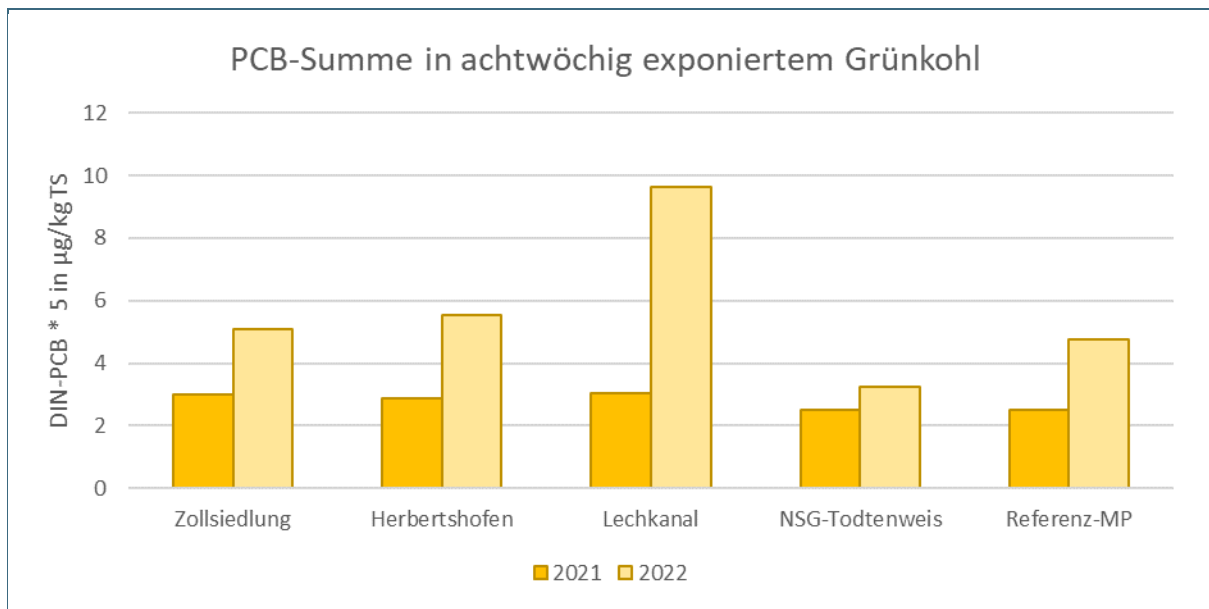


Abb. 22: Gehalte der Indikator-PCB im Grünkohl in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW.

Die Ergebnisse der nicht-dioxinähnlichen PCB liegen 2022 an allen MP über denen in 2021. Den höchsten Messwert erreicht der Standort am Lechkanal, im NSG Todtenweis werden in beiden Jahren die niedrigsten Werte gemessen.

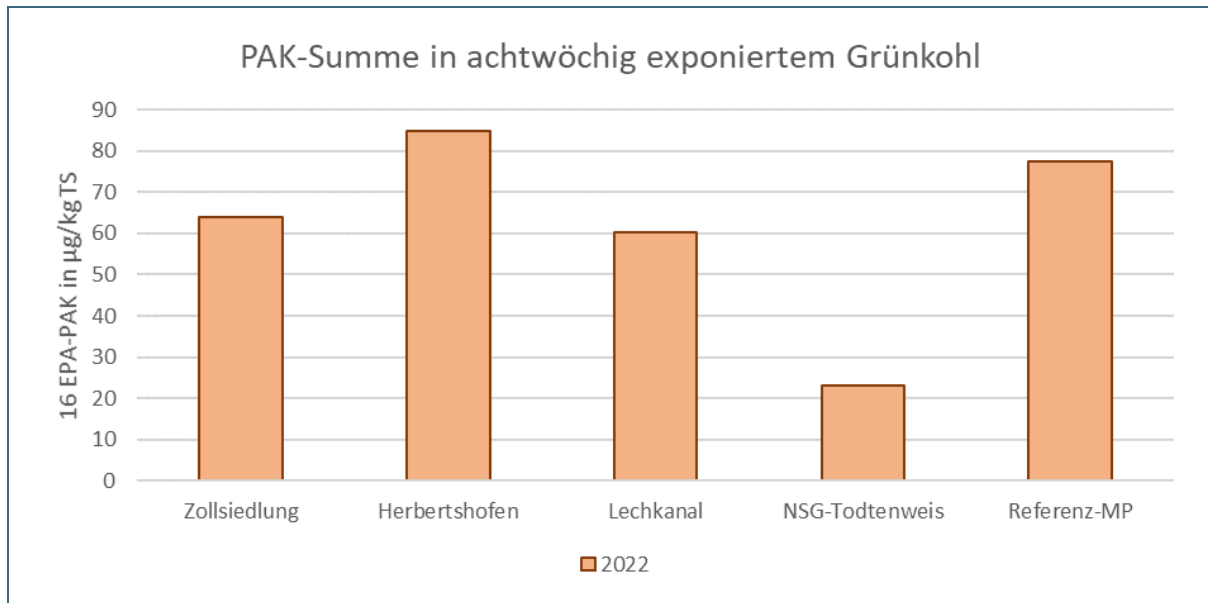


Abb. 23: Gehalte der PAK im Grünkohl als Summe der 16 PAK nach EPA an den Messpunkten (MP) um die LSW. Dargestellt ist nur die Messkampagne 2022. Die Proben aus 2021 konnten wegen zu hoher Bestimmungsgrenzen des beauftragten Labors nicht ausgewertet werden.

Bei den PAK zeigt die Probe aus dem NSG Todtenweis den eindeutig niedrigsten Gehalt. Die höchsten Werte werden am Standort Herbertshofen und am Referenz-MP gemessen.

Aufgrund der Anordnung der Messpunkte um die LSW und der Windrichtungsverteilung im Untersuchungszeitraum würden bei erhöhten Schadstoffemissionen aus den LSW die MP Zollsiedlung und NSG Todtenweis am höchsten beaufschlagt werden. Der Referenz-MP sollte mit deutlichem Abstand die geringsten Schadstoffgehalte aufweisen. Die Ergebnisse aus beiden Untersuchungsjahren zeigen, dass sowohl bei den Graskulturen als auch beim Grünkohl kein Standort durch überdurchschnittlich hohe Werte auffällt, die den LSW zuzuordnen wären. Lediglich im 2022er Grünkohl gab es am MP Lechkanal etwas höhere PCB-Gehalte. Die MP um die LSW einschließlich des Referenz-MP bilden insofern die regionale Hintergrundbelastung für die untersuchten Schadstoffe ab. Deshalb lassen sich aus den Ergebnissen Mittelwerte bilden, um sie mit den mittleren Hintergrundwerten der ländlichen Dauerbeobachtungsstationen (DBS) zu vergleichen.

Vergleich mit früheren Untersuchungen an den LSW und Einordnung der Ergebnisse anhand von Beurteilungswerten

Neben den Ergebnissen der aktuellen Untersuchung 2021 und 2022 sind in den Abb. 24 bis Abb. 27 für Graskulturen und Abb. 28 bis Abb. 31 für Grünkohl auch die vorherigen Untersuchungen im Umfeld der LSW von 2007 und 2008 dargestellt. Als Mittelwerte werden sie den mittleren Gehalten an im ländlichen Hintergrund gelegenen DBS gegenübergestellt. Um auf die zeitliche Entwicklung der Immissionswirkung eingehen zu können, sind auch die über die Jahre gewonnenen Ergebnisse der ländlichen DBS (hier seit 2018) und die der städtischen Stationen München (2007 und 2008) und Ansbach (2018 bis 2022) gezeigt. Die in den Diagrammen eingezogenen Linien stehen für die Höhen der EU-Grenzwerte für Futtermittel und der OmH.

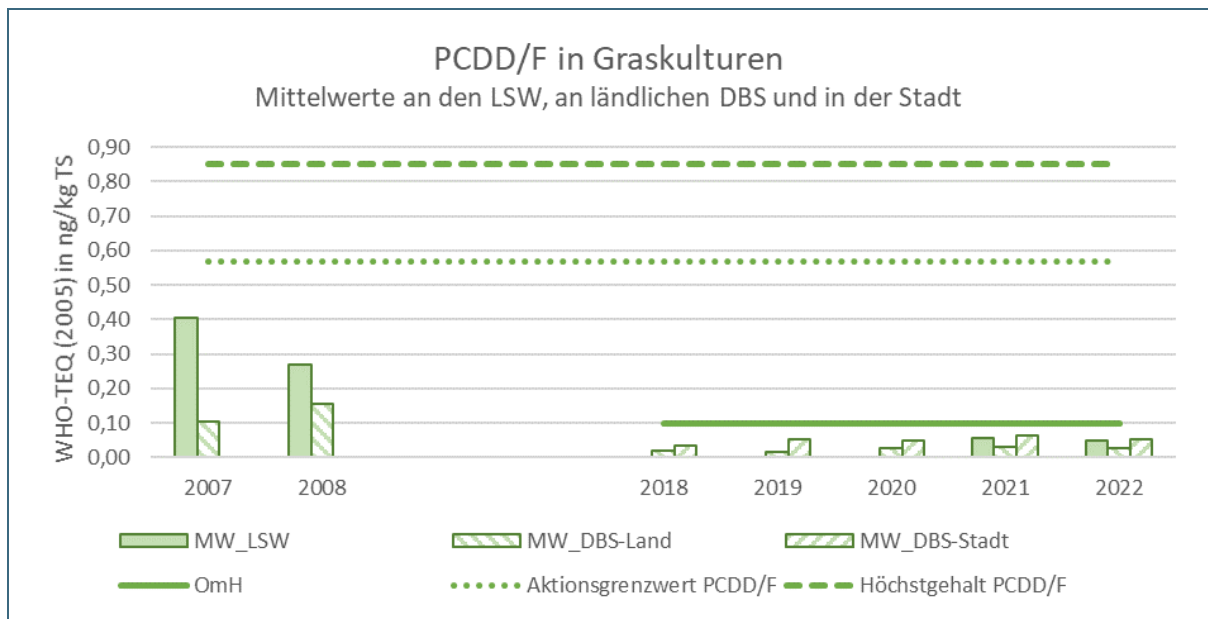


Abb. 24: PCDD/F-Gehalte in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für PCDD/F.

Die mittleren PCDD/F-Gehalte in Graskulturen an den Messpunkten (MP) um die LSW sind gegenüber den Untersuchungen von 2007 und 2008 deutlich zurückgegangen. Sie liegen, ebenso wie die Mittelwerte an den ländlichen DBS und in der Stadt weit unterhalb der Futtermittelgrenzwerte und auch unterhalb des OmH. In den Untersuchungsjahren 2021 und 2022 sind die PCDD/F-Gehalte um die LSW etwa zwischen den Werten der ländlichen und der städtischen DBS einzuordnen.

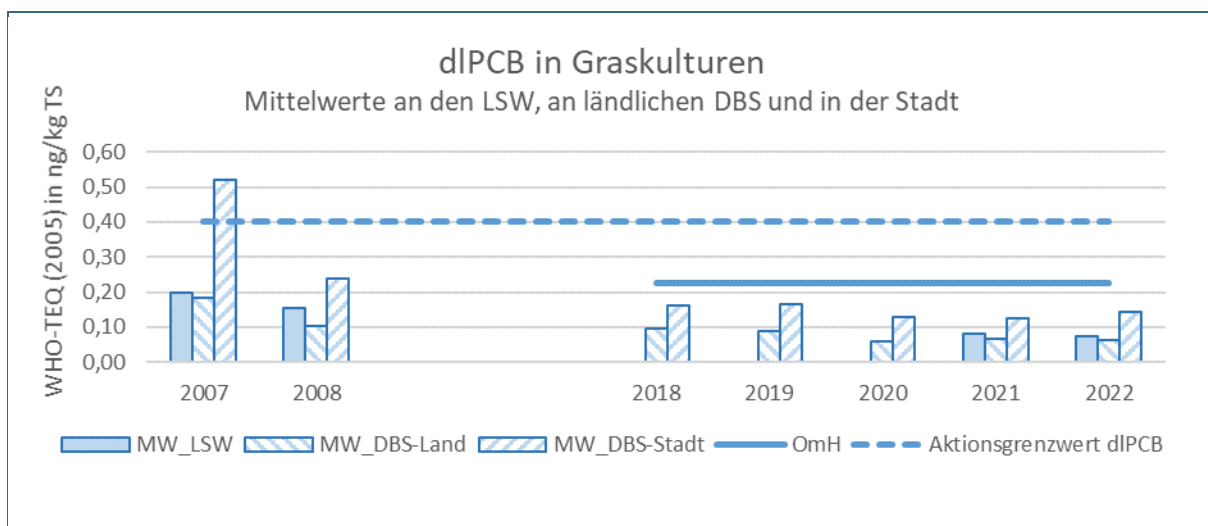


Abb. 25: Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für dIPCB.

Die Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen lagen schon 2007 und 2008 nur etwa auf Höhe der Hintergrundgehalte der ländlichen DBS und deutlich unter den Messwerten in der Stadt. An allen untersuchten Standorten sind die Gehalte weiter zurückgegangen und unterschreiten den Aktionsgrenzwert für Futtermittel und den OmH.

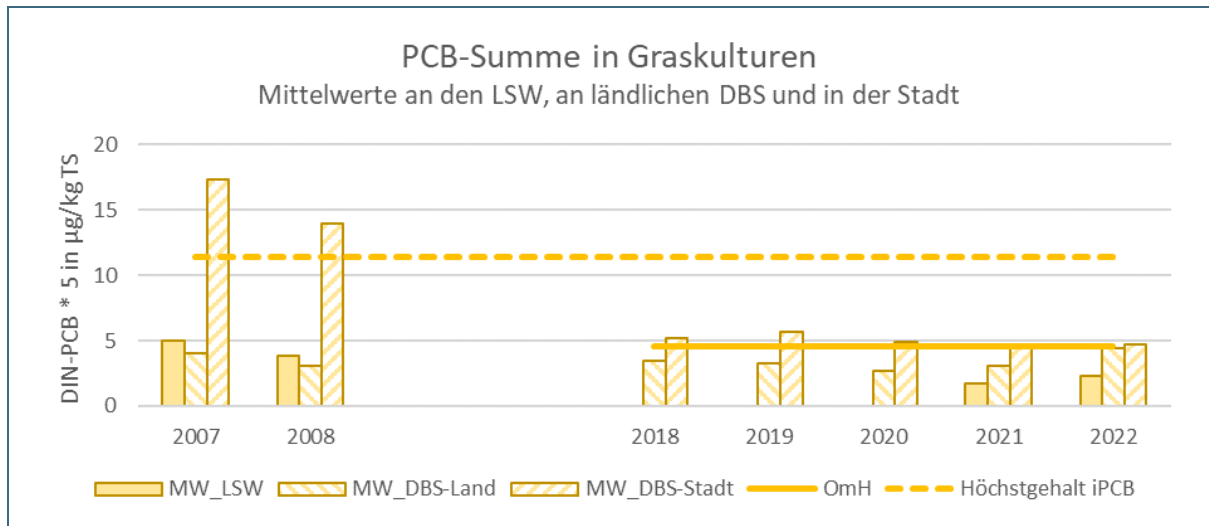


Abb. 26: Gehalte der Indikator-PCB in Graskulturen im Vergleich zum OmH und dem Futtermittel-Höchstgehalt für PCB.

Die Gehalte der nicht-dioxinähnlichen PCB sind 2021 und 2022 an den MP um die LSW niedriger als im Hintergrund und am städtischen Standort. Gegenüber den Untersuchungen 2007 und 2008 sind sie noch weiter zurückgegangen und liegen unterhalb des Höchstgehaltes für Futtermittel und des OmH.

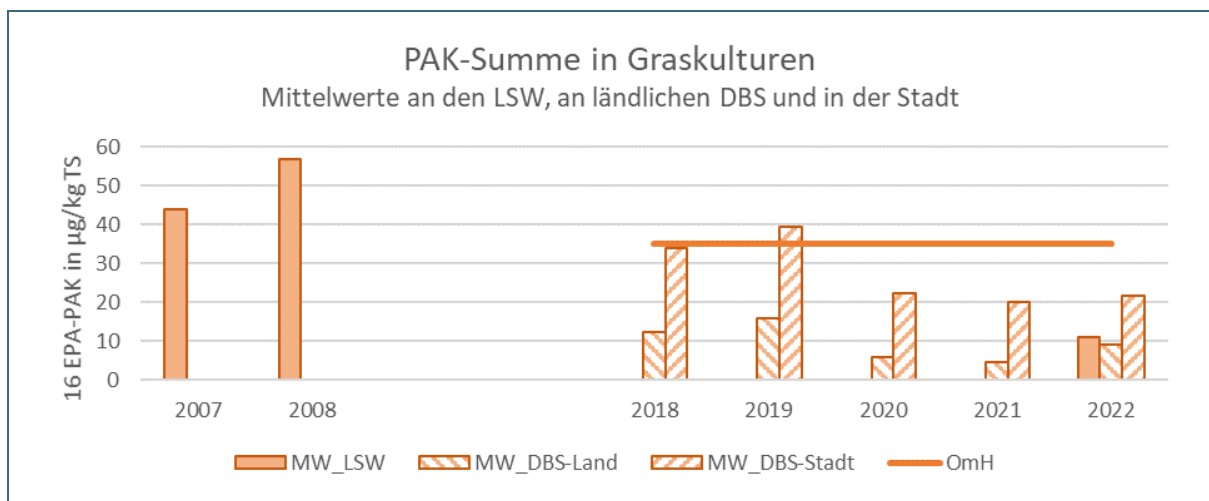


Abb. 27: Gehalte der PAK in Graskulturen als Summe der 16 EPA-PAK im Vergleich zum OmH.

Für die PAK-Gehalte in Graskulturen an den MP um die LSW gibt es nur die Werte aus 2022, die auf dem Niveau der ländlichen DBS der letzten Jahre liegen. Sie haben im Vergleich zu den Untersuchungen 2007 und 2008 stark abgenommen, der OmH wird unterschritten. Für PAK gibt es keine Bewertung nach der Futtermittelverordnung.

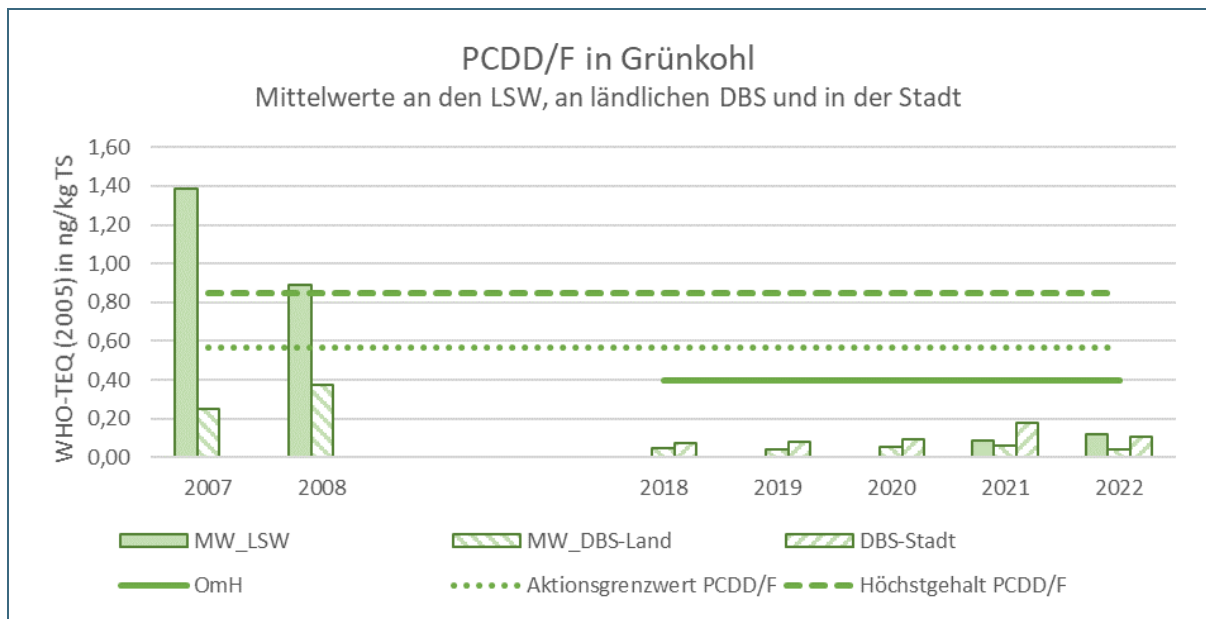


Abb. 28: PCDD/F-Gehalte in Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für PCDD/F.

Im Grünkohl ist, ebenso wie in den Graskulturen der Rückgang der PCDD/F-Gehalte im Vergleich zu den Untersuchungen 2007 und 2008 unverkennbar. Auch an den ländlichen Hintergrundstationen sind die Werte erfreulicherweise zurückgegangen und liegen deutlich unterhalb der Futtermittelgrenzwerte und des OmH. Die Gehalte an den MP um die LSW 2021 und 2022 lassen sich auf diesem niedrigen Niveau im Bereich der übrigen Standorte in Bayern einordnen.

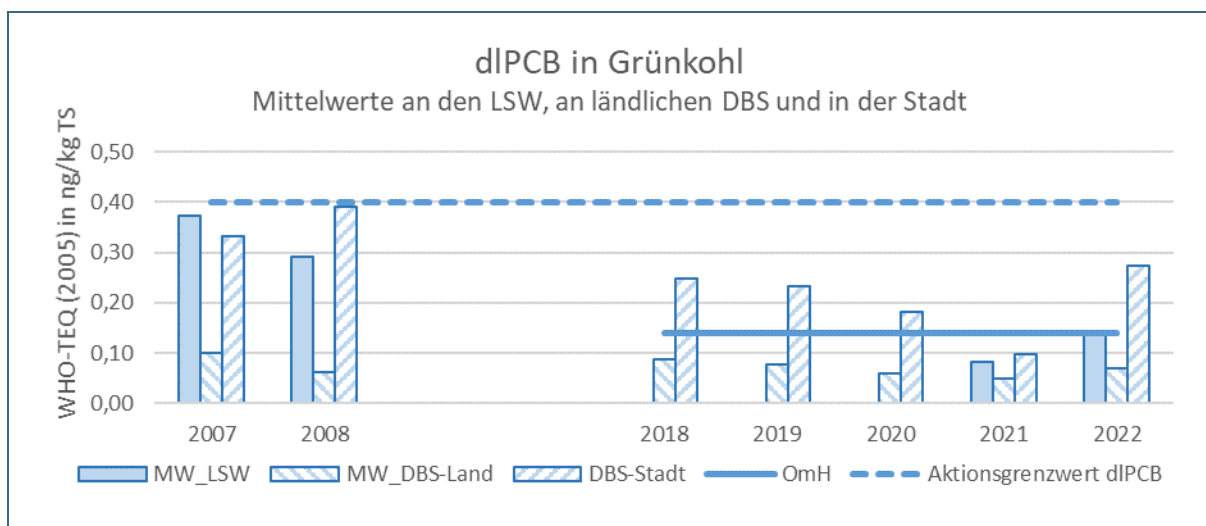


Abb. 29: Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO im Vergleich zum OmH und den Futtermittelgrenzwerten für dIPCB.

Die Gehalte der dioxinähnlichen PCB im Grünkohl lagen schon 2007 und 2008 deutlich höher als an den ländlichen Hintergrundstationen und vergleichbar mit den Werten am städtischen Standort. Die Messwerte am städtischen Standort bleiben während der vergangenen fünf Jahre zwar immer noch erhöht und überschreiten den OmH, die Gehalte im Grünkohl an den MP um die LSW sind heute deutlich niedriger und liegen unter dem Aktionsgrenzwert für Futtermittel und nur in 2022 knapp über dem OmH.

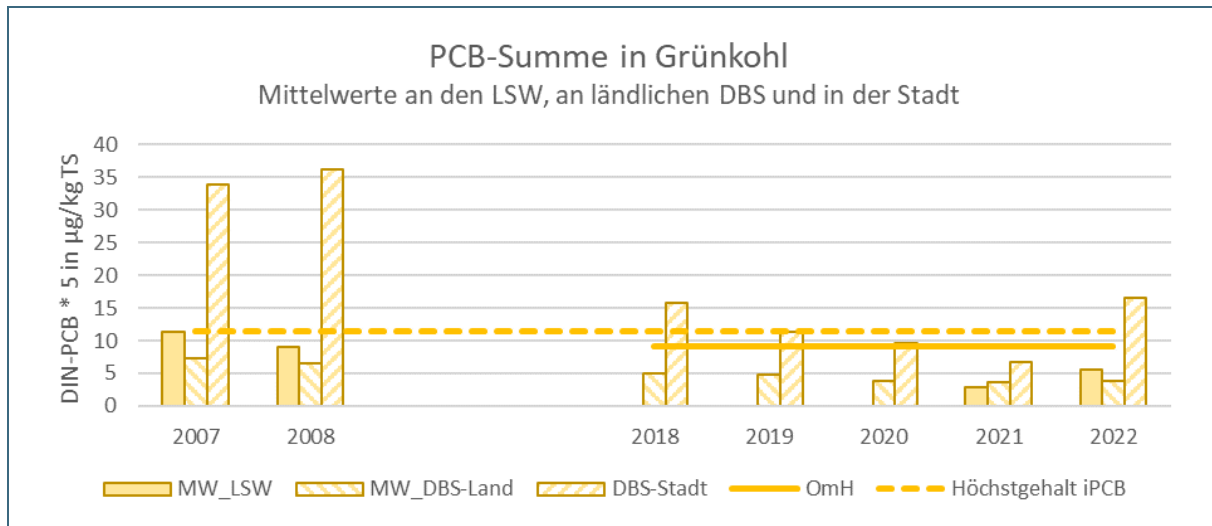


Abb. 30: Gehalte der Indikator-PCB in Grünkohl im Vergleich zum OmH und dem Futtermittel-Höchstgehalt für PCB.

Die Gehalte der nicht-dioxinähnlichen PCB haben auch im Grünkohl an den MP um die LSW und an ländlichen Hintergrundstationen seit 2007/2008 weiter abgenommen. Nur gelegentlich überschreiten die Gehalte an städtischen Standorten auch heute noch den OmH und den Höchstgehalt für Futtermittel.

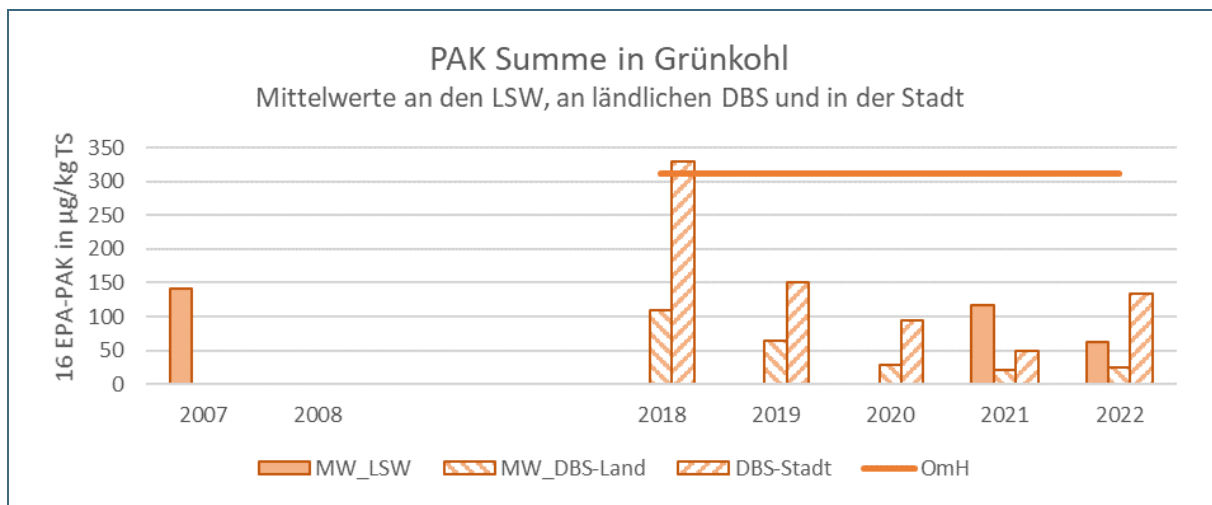


Abb. 31: Gehalte der PAK in Grünkohl als Summe der 16 EPA-PAK im Vergleich zum OmH.

Im Grünkohl liegen die PAK-Gehalte an den MP um die LSW etwa auf Höhe des städtischen Standorts der letzten Jahre oder darunter und unterschreiten den OmH. Sie fallen auch niedriger aus als im Untersuchungsjahr 2007.

Die Gehalte der organischen Schadstoffe PCDD/F, PCB und PAK in Graskulturen und Grünkohl unterschreiten sowohl die Höchstgehalte als auch die jeweiligen Auslöse- und Aktionsgrenzwerte dieser Stoffgruppen nach der Futtermittelverordnung sehr deutlich. Die Werte im Umfeld der LSW liegen auf ähnlich niedrigem Niveau wie seit vielen Jahren an den ländlichen und städtischen DBS. Im Vergleich zu den früheren Untersuchungen 2007 und 2008 haben die Stoffgehalte in den Biomonitoringpflanzen

deutlich abgenommen. Im Umfeld der LSW deutet demnach nichts auf eine emittentenbezogene Anreicherung mit organischen Schadstoffen hin.

Werden die Messergebnisse der organischen Parameter auf das Frischgewicht der Bioindikator-Pflanzen bezogen, so können sie in Bezug zu den gesetzlichen Grenzwerten für pflanzliche Lebensmittel¹² eingeschätzt werden. Sollten in Gras und Grünkohl Überschreitungen der jeweiligen Auslösewerte festgestellt werden, muss nach der Ursache für die Kontaminationen gesucht werden. Die Auslösewerte werden in den Untersuchungen 2021 und 2022 weder in Graskulturen noch in Grünkohl erreicht, somit sind im Umfeld der LSW keine emittentenbezogenen Anreicherungen organischer Schadstoffe zu befürchten. In den früheren Untersuchungen 2007 und 2008 wurden die Ergebnisse nicht bezüglich der Lebensmittel-Grenzwerte beurteilt.

Die Abb. 32 und Abb. 33 stellen die Untersuchungsergebnisse organischer Parameter in den Graskulturen, die Abb. 34 und Abb. 35 in Grünkohl dar. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten sind weder bei den Graskulturen noch beim Grünkohl bedeutend.

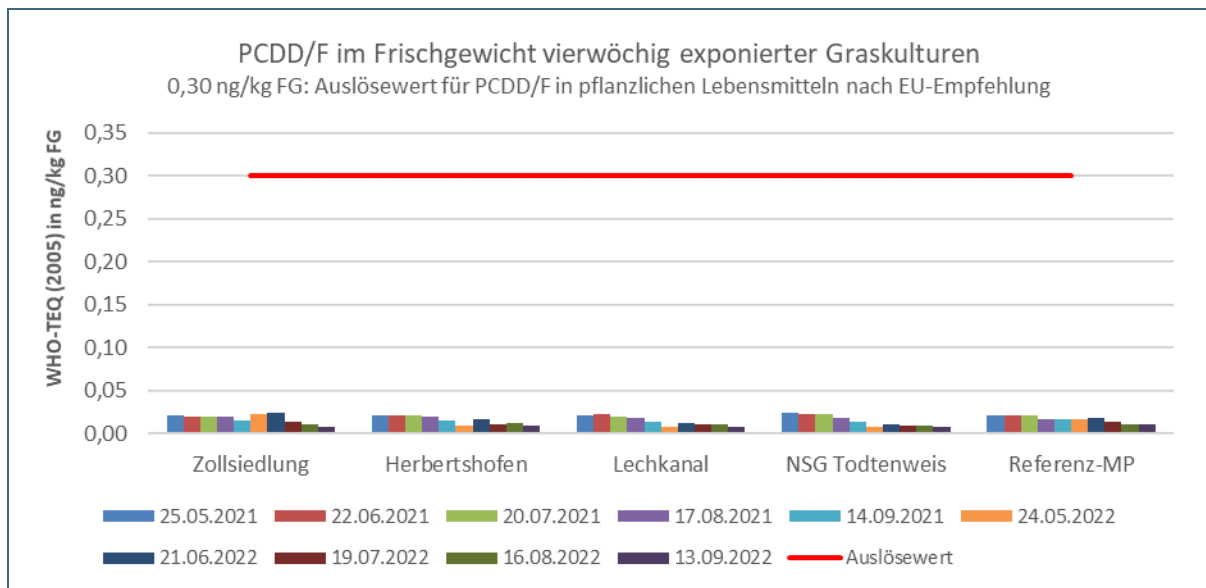


Abb. 32: PCDD/F-Gehalte in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.

¹² EU-Empfehlung 2013/711/EU

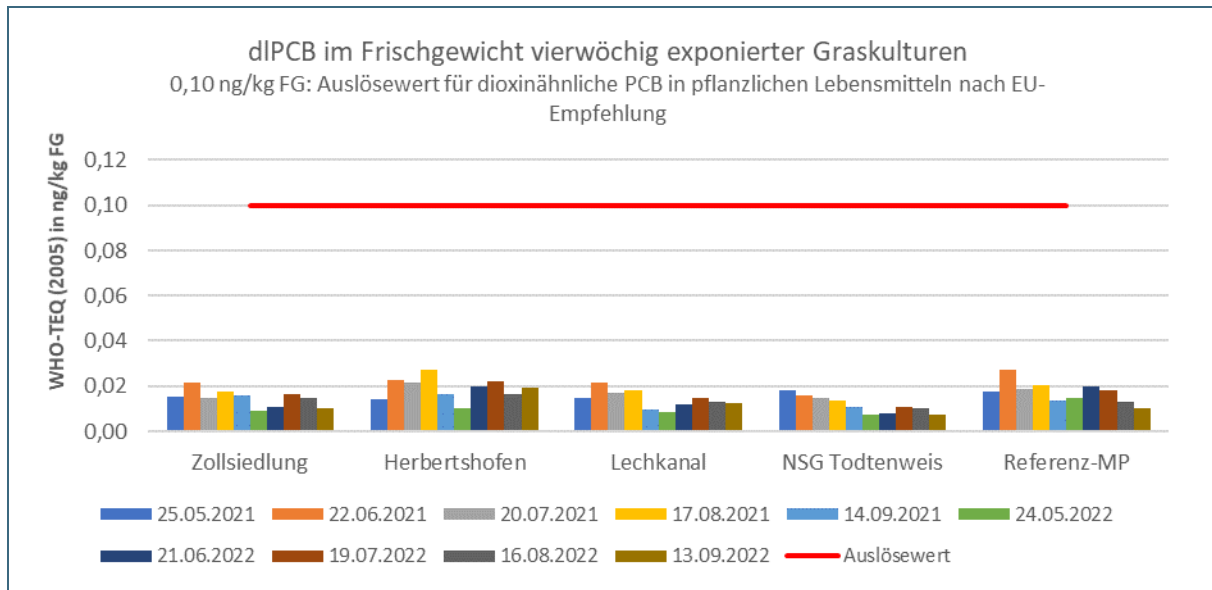


Abb. 33: Gehalte der dioxinähnlichen PCB in Graskulturen dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den jeweils fünf aufeinanderfolgenden Probenahme-Kampagnen der Jahre 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.

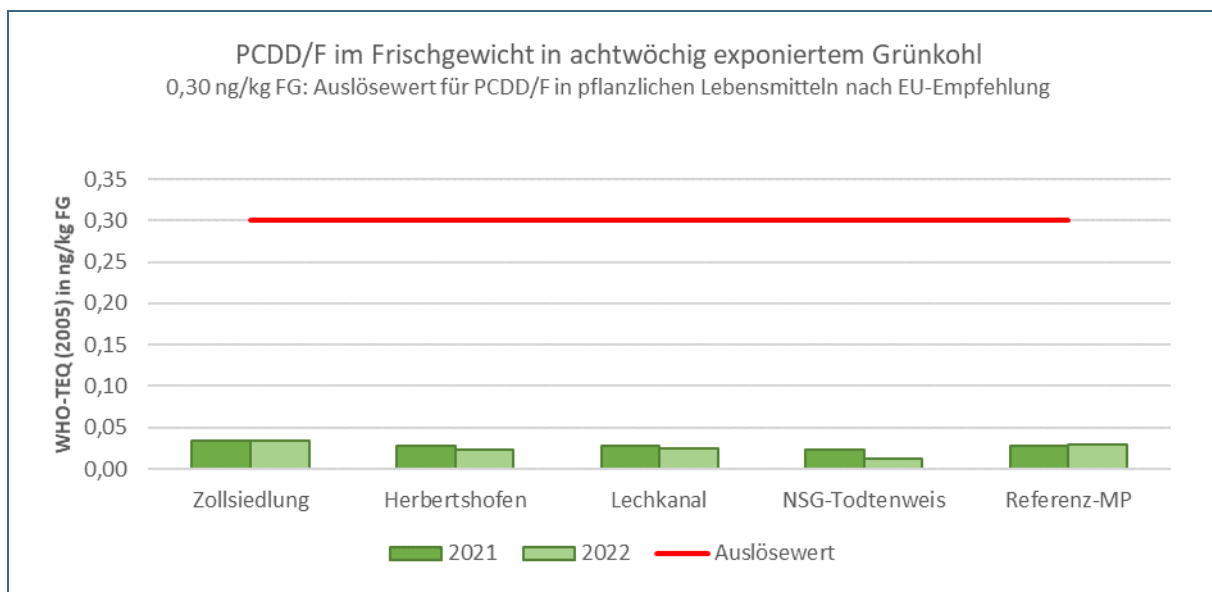


Abb. 34: PCDD/F-Gehalte im Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.

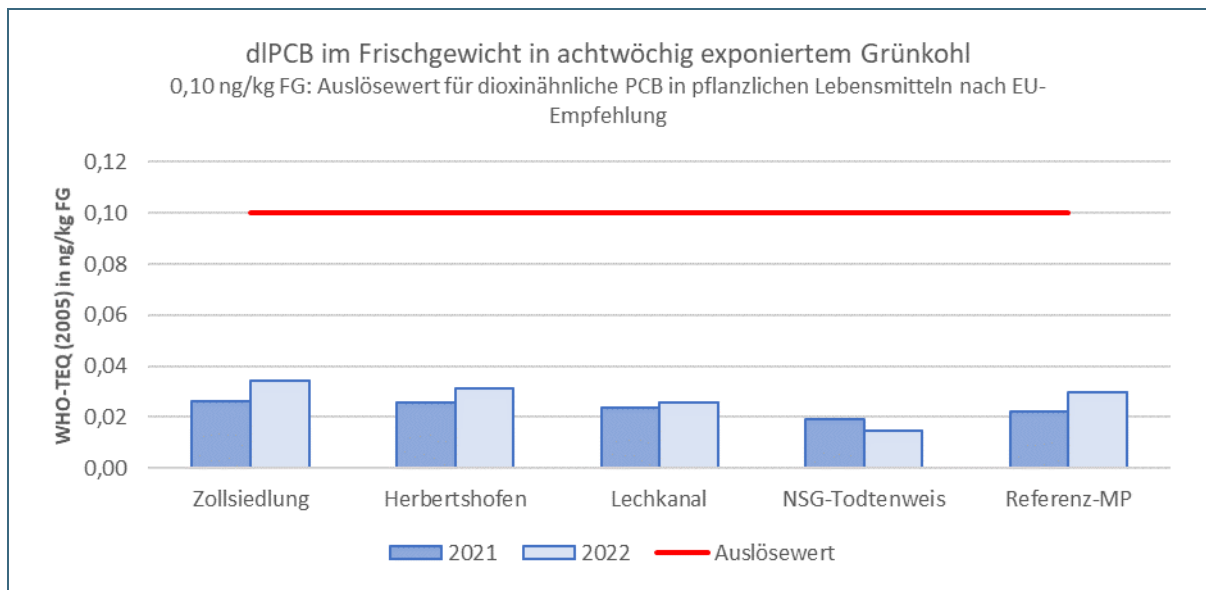


Abb. 35: Gehalte der dioxinähnlichen PCB im Grünkohl dargestellt als Toxizitätsäquivalente nach WHO in den beiden Probenahme-Kampagnen 2021 und 2022 an den Messpunkten (MP) um die LSW im Vergleich zum Lebensmittel-Grenzwert.

Ergebnisse der Untersuchung von Metallen in den Jahren 2021 und 2022

In den folgenden Abbildungen (Abb. 36 bis Abb. 43) sind für einige Metalle exemplarisch die Jahresmittelwerte der Untersuchung im Umfeld der LSW von 2007 / 2008 den Ergebnissen von 2021 / 2022 gegenübergestellt. Daneben sind zur Einordnung die Ergebnisse der nahegelegenen DBS Augsburg bzw. der im Hintergrund gelegenen DBS und der städtischen DBS dargestellt, sowie – soweit vorhanden – die OmH und ggf. überregionale OmH. **Die Futtermittelgrenzwerte werden weit unterschritten und daher in den Grafiken nicht dargestellt.** Diagramme für die nicht dargestellten Elemente finden, sowie die Messwerte an den LSW 2021 / 2022 mit markierten OmH-Überschreitungen (Tab. 21) finden sich im Anhang 8.5.

Elemente ohne Überschreitung des OmH in den Jahren 2021 / 2022

Für die Elemente Arsen, Bismut, Cadmium, Kobalt, Kupfer, Nickel und Zinn traten keine Überschreitungen des OmH auf.

Die Jahresmittelwerte 2021 / 2022 im Umfeld der Lechstahlwerke liegt für alle genannten Elemente im Bereich der Hintergrund-DBS Augsburg, vgl. exemplarisch Abb. 36.

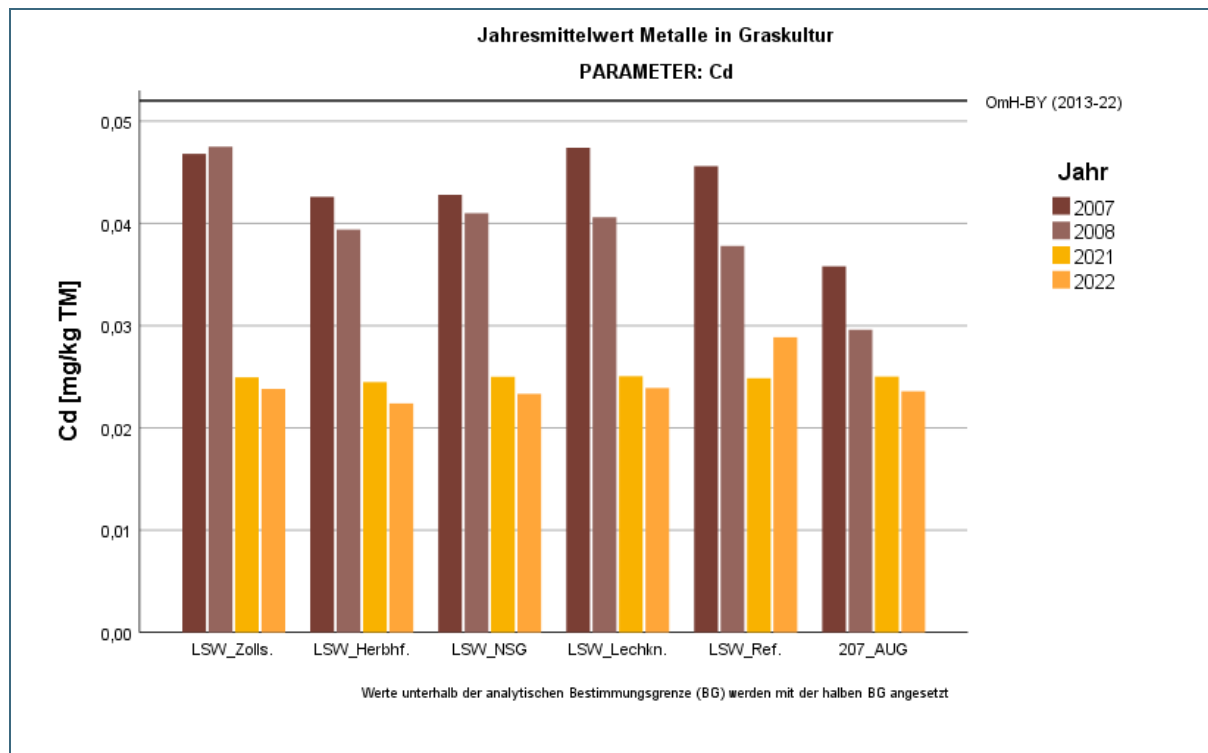


Abb. 36: Jahresmittelwerte der Cadmium-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg

Elemente mit vereinzelter Überschreitung von OmH_{BY}

Für die Elemente Aluminium, Barium, Cer, Quecksilber, Lanthan, Mangan und Zinn sind vereinzelte Überschreitungen des OmH festzustellen. Allerdings sind die Überschreitungen meist geringfügig und treten beispielsweise auch am Referenzstandort auf (Tab. 21 in Anhang 8.5). Für Aluminium, Cer, Quecksilber und Lanthan liegt das Wertenniveau an den Standorten der Lechstahlwerke über dem Niveau der DBS Augsburg. Allerdings finden sich für Aluminium, Cer und Lanthan die höchsten Jahresmittelwerte am Referenzstandort (vgl. exemplarisch Abb. 37). Viele der genannten Elemente sind u.a. geogenen Ursprungs und damit eher abhängig vom geogenen Staubeintrag als durch lokale Emittenten beeinflusst (s.u. „Elemente ohne deutliche Abnahme von 2007/2008 nach 2021/2022“).

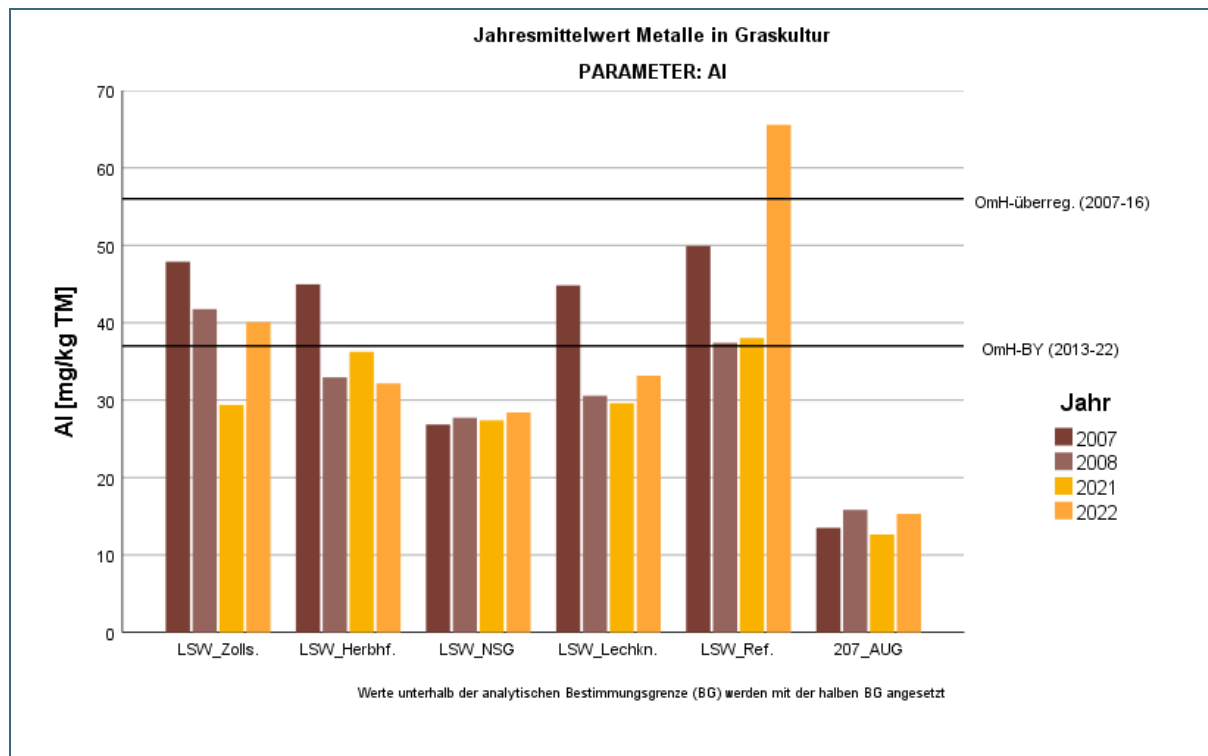


Abb. 37: Jahresmittelwerte der Aluminium-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg

Elemente mit zahlreichen Überschreitungen des OmH

Für die Elemente Chrom, Eisen, Niob und Vanadium sind zahlreiche Überschreitungen des OmH festzustellen (Tab. 21 in Anhang 8.5). Allerdings haben sich im Vergleich zu den Messungen der Jahre 2007 / 2008 die Gehalte v.a. von Chrom 2021 / 2022 deutlich verringert (Abb. 39).

Die Chrom-Gehalte im Umfeld der LSW liegen auf etwas höherem Niveau als die Gehalte an der städtischen Station Ansbach; die ländlichen DBS zeigen deutlich niedrigere Werte (Abb. 38). Der OmH für Chrom mit 0,19 mg/kg wird bei 75 % der LSW-Messwerte 2021 / 2022 überschritten. Auch die Messwerte der verkehrsbeeinflussten DBS Ansbach überschreiten den OmH erheblich. Allerdings ist der OmH für Chrom sehr niedrig, da rund 60% der berücksichtigten Messwerte unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze liegen. Der überregionale OmH_{ür} mit wesentlich größerer Datenbasis liegt im Vergleich dazu mit 0,51 mg/kg deutlich höher und der OmH des industriell geprägten Bundeslandes NRW liegt sogar bei 2,8 mg/kg.

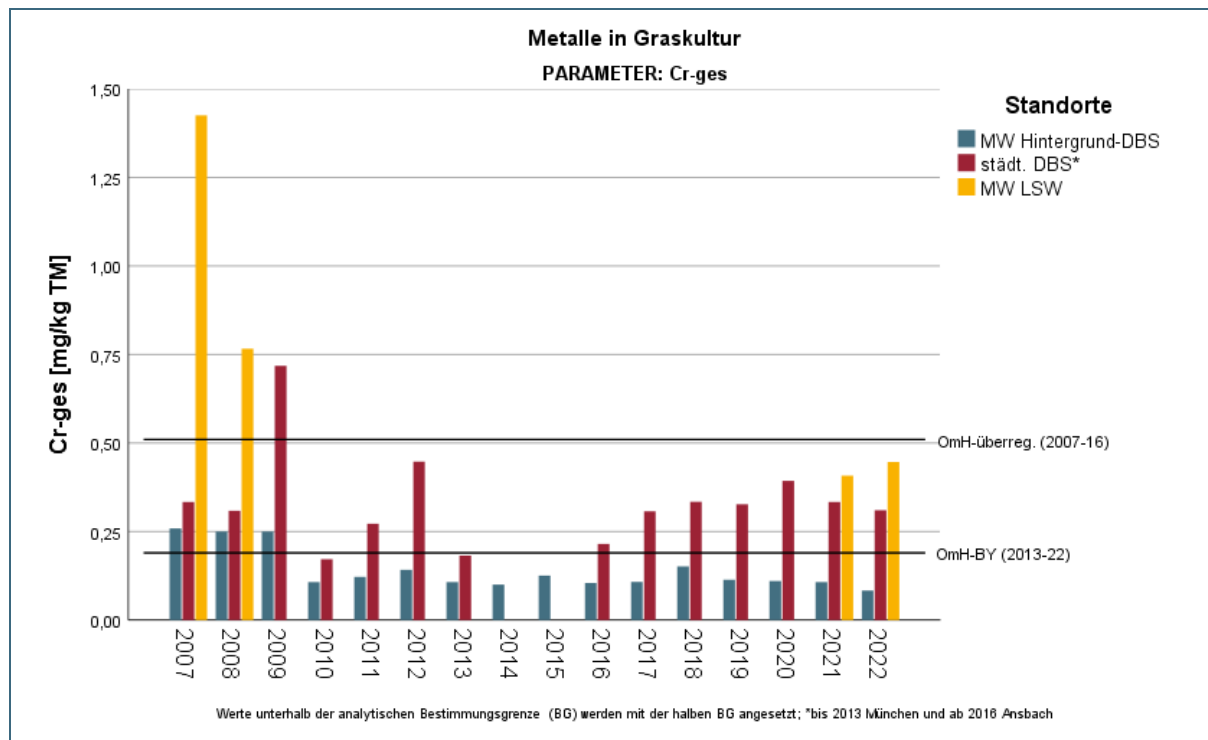


Abb. 38: Jahresmittelwerte der Chrom-Gehalte in Graskulturen an den LSW, im Hintergrund und an einer städtischen DBS

Aus Abb. 39 ist ersichtlich, dass die Chromgehalte im Messnetz LSW etwas höher als an der ca. 20 km südlich gelegenen DBS Augsburg liegen. Die Chromgehalte an den Standorten LSW-Zoll und LSW-NSG sind in vergleichbarer Größenordnung wie am über 4 km entfernten Referenzmesspunkt LSW-Ref. An den Standorten LSW-Her und LSW-Kan liegen sie zwar weit niedriger als 2007 / 2008 - im Mittel im Bereich des OmH_{ür} - v. a. am Standort LSW-Her überschreiten aber einzelne Messwerte den OmH_{ür}. Die maximale OmH-Überschreitung wird an LSW-Her mit dem 3,7-fachen erreicht (Tab. 21 in Anhang 8.5). Dennoch wurde die nach dem Biomonitoring 2007 / 2008 geforderte deutliche Reduktion der Chromemissionen erreicht.

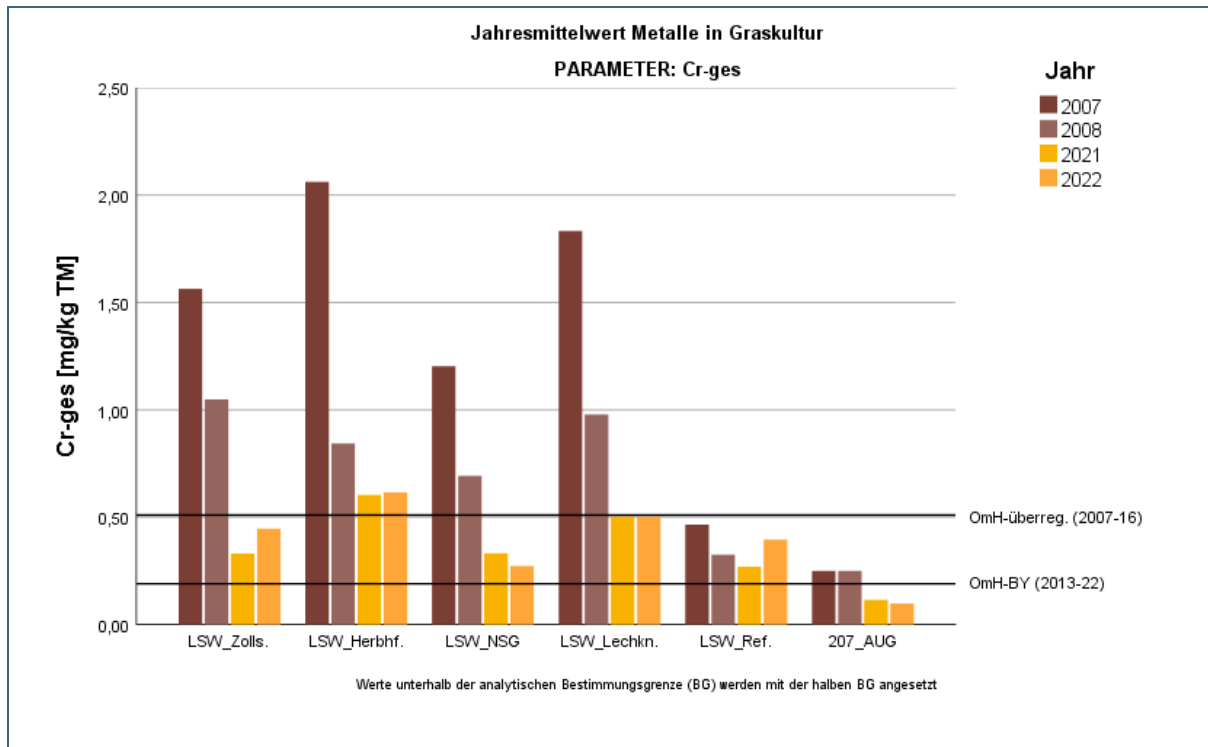


Abb. 39: Jahresmittelwerte der Chrom-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg

Niob war 2007 / 2008 noch nicht im Umfang der analysierten Elemente enthalten. Die aktuellen Ergebnisse zeigen, dass Niob, das u.a. als Zusatz für die Herstellung bestimmter Legierungen dient, im Umfeld der LSW in höheren Konzentrationen zu finden ist (Abb. 40, Abb. 41).

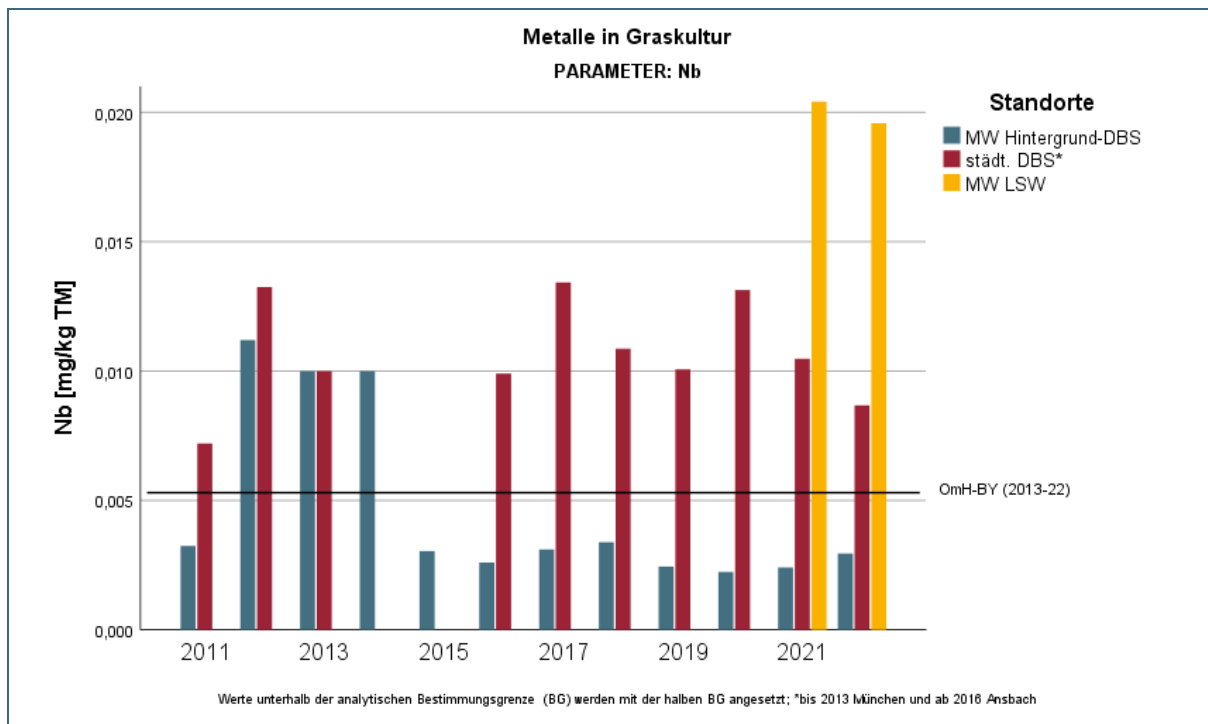


Abb. 40: Jahresmittelwerte der Niob-Gehalte in Graskulturen

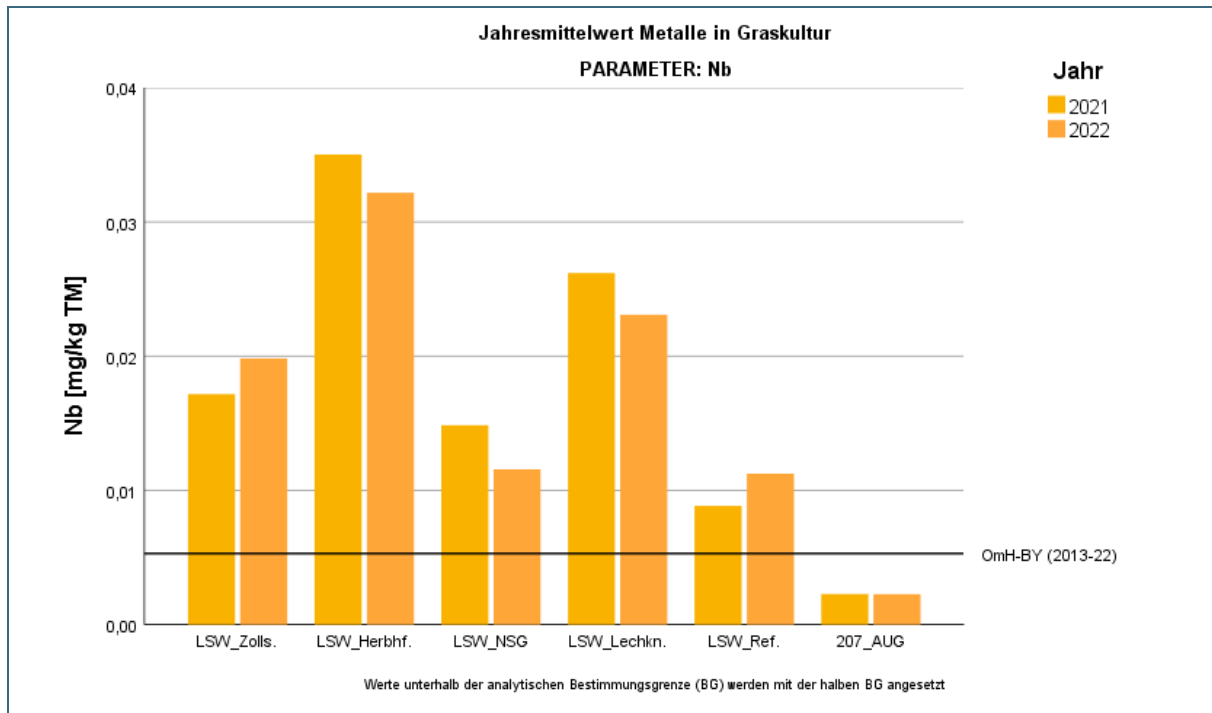


Abb. 41: Jahresmittelwerte der Niob-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg

Für Vanadium zeigt sich ein ähnliches Bild wie für Chrom, allerdings sind die Abnahmen von 2007 / 2008 auf 2021 / 2022 nicht so deutlich wie für Chrom und die Vanadium-Anreicherung im Messnetz LSW ist doch erheblich höher als an der städtischen DBS (Abb. 42, Abb. 43). Die höchste OmH-Überschreitung um das 3,2-fache wird allerdings am Referenzstandort erreicht und weist damit auf andere Quellen als den lokalen Emittenten hin.

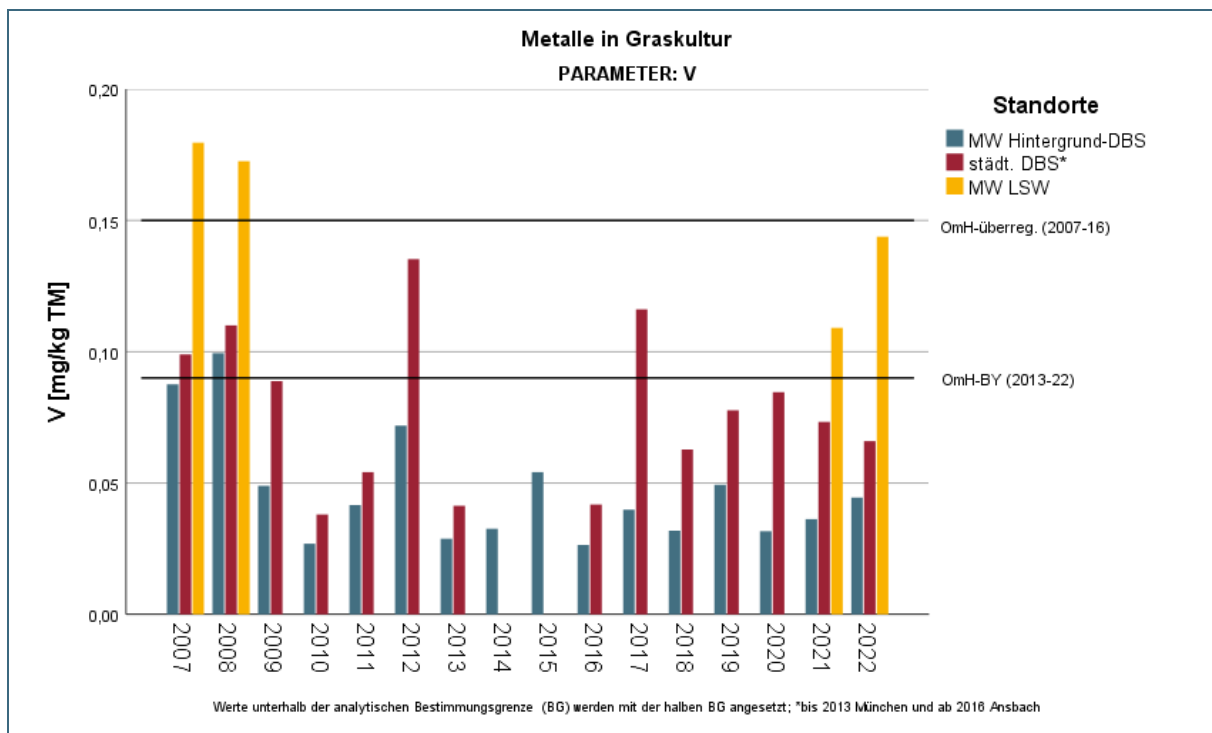


Abb. 42: Jahresmittelwerte der Vanadium-Gehalte in Graskulturen

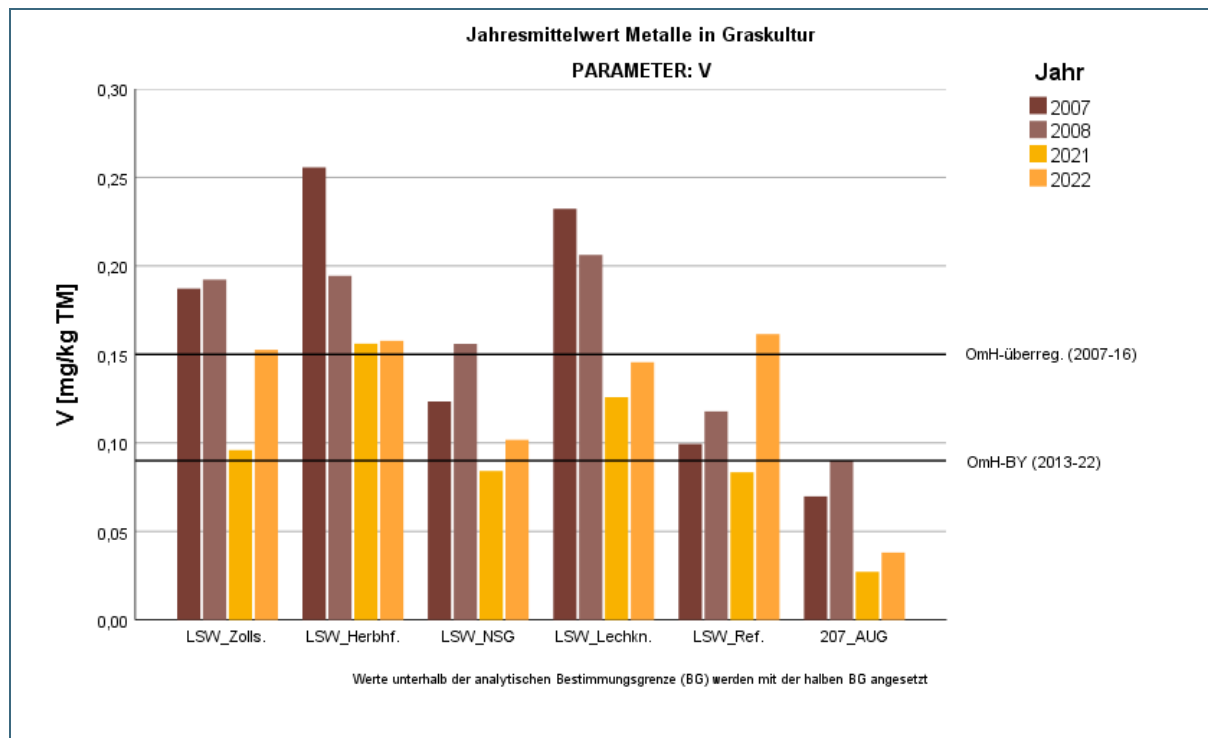


Abb. 43: Jahresmittelwerte der Vanadium-Gehalte in Graskulturen im Umfeld der LSW und an der DBS Augsburg

Elemente ohne deutliche Abnahme von 2007 / 2008 nach 2021 / 2022

Für die Elemente Aluminium, Barium, Cer, Lanthan und Mangan ist keine klare Abnahme der Gehalte von 2007 / 2008 nach 2021 / 2022 zu vermerken. Auffällig ist ein Anstieg der Gehalte von 2021 nach 2022. Die Ursache dafür liegt vermutlich darin, dass es sich hierbei um Elemente geogenen Ursprungs handelt, also um Elemente, die in der Erdkruste enthalten sind und durch den Wind verfrachtet werden. Im Sommer 2022 (Mai-Sept.) wurde an der ca. 20 km entfernten meteorologischen Messstelle Ainertshofen mit einer Niederschlagssumme von 325 mm nur ca. halb so viel Niederschlag verzeichnet wie im Sommer 2021 mit rund 600 mm. Daher kam es vermutlich zu einer verstärkten Auswehung geogenen Materials aus offenen Flächen und damit einem verstärkten Eintrag im Jahr 2022.

Generell werden für alle im Biomonitoring 2021 / 2022 untersuchten Metalle sowohl die Futtermittelgrenzwerte als auch die maximalen Immissions-Werte eingehalten. Für die meisten Metalle ist eine deutliche Reduktion von 2021 / 2022 erkennbar. Oft dominiert der geogene Einfluss die Metallgehalte an den Lechstahlwerken. Die im Biomonitoring-Bericht von 2007 / 2008 angemahnte Reduktion für Chrom wurde erreicht, auch wenn OmH-Überschreitungen, wie z.B. auch für verkehrsbeeinflusste Standorte zu beobachten sind.

Ergebnisse des Löwenzahnscreenings

In NRW wird das Löwenzahnscreening erfolgreich zum anlagenbezogenen Umweltmonitoring für Dioxine, PCB und PAK eingesetzt. Hier wird der Löwenzahn explizit als Nahrungspflanze betrachtet und in der Probenvorbereitung fürs Labor gründlich gewaschen um anhand der Ergebnisse eine gesundheitliche Bewertung durchführen zu können. An den Lechstahlwerken sollte das Löwenzahnscreening – wie auch das bayerische Biomonitoring mit Graskulturen und Grünkohl - ungewaschen durchgeführt werden um eine Einschätzung dieses Verfahrens für die Metalle, die meist nur oberflächlich angelagert sind z. B. für eine Einordnung als Futtermittel zu erlauben.

Abhängigkeit von Gehalten im Boden

Außerdem sollte eine parallele Untersuchung des Bodens auf Metalle Hinweise über eine direkte Aufnahme aus dem Boden geben. In der Literatur (Kleckerova & Docekalova 2014) ist dokumentiert, dass Löwenzahn einige Metalle (Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Zn) sehr effektiv aus kontaminierten Böden aufnimmt und auch in VDI 3857 Blatt 2 wird darauf hingewiesen, dass Graskulturen relativ mobile Elemente wie Cu, Cd, Zn und Ni aus dem Substrat aufnehmen können. Aus der Gegenüberstellung von Gehalten in Löwenzahn und im Boden ergeben sich Korrelationen für Barium, Cer, Lanthan und Kupfer mit einem R^2 größer 0,6 ($N = 7$), d.h. dass die Gehalte im Löwenzahn durch die Gehalte im Boden beeinflusst sein könnten. Schwächere Korrelationen sind auch für Chrom oder Nickel erkennbar.

Für die Elemente Kobalt und Nickel sind höhere durchweg höhere Gehalte in Graskultur als im Löwenzahn festzustellen (Abb. 44). Die Abhängigkeit von Nickelgehalten in Graskulturen von den Gehalten der Anzuchterde sind bekannt. Wegen des überlagernden Einflusses der Anzuchterde ist vermutlich auch keine Differenzierung zwischen den Standorten zu erkennen.

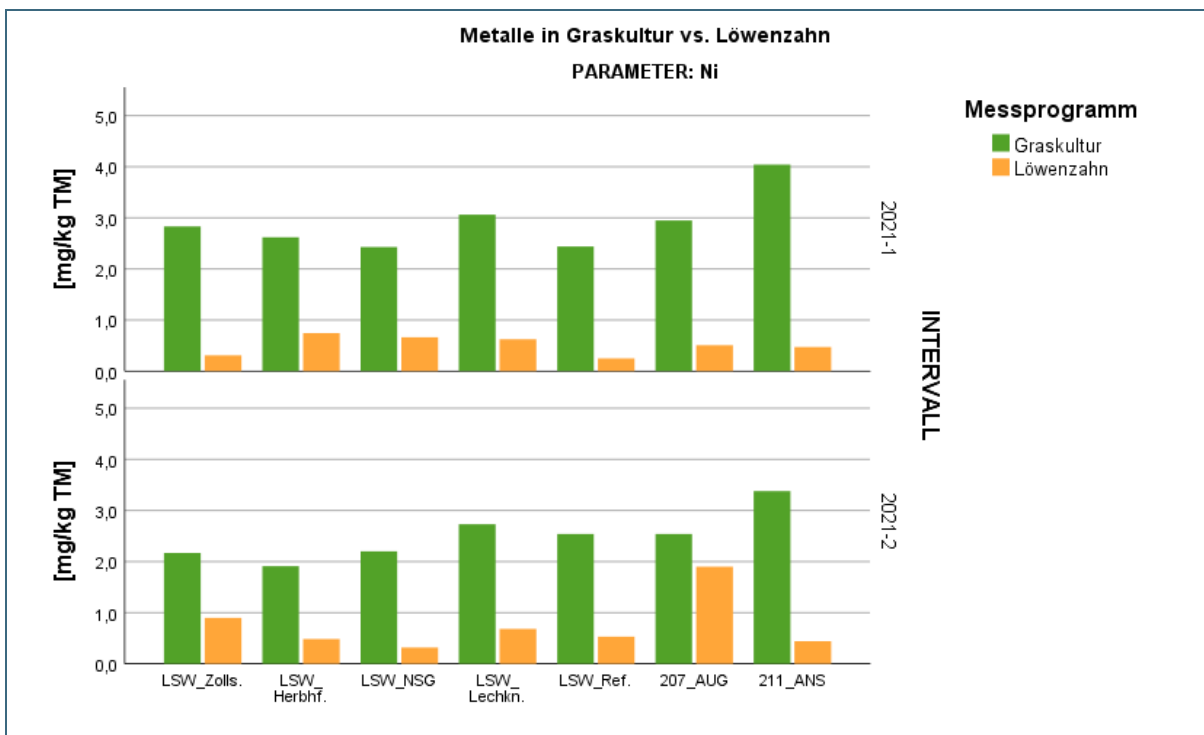


Abb. 44: Nickelgehalte in Graskultur und Löwenzahn

Parameter mit stärkerer Anreicherung in Löwenzahn als in Graskultur

Für die Elemente Barium, Cadmium, Kupfer, Niob und Vanadium finden sich generell höhere Gehalte im Löwenzahn als in der Graskultur. Dies kann zum einen durch die bodennahe Exposition und damit eine stärkere Beaufschlagung mit bodennah transportiertem Staub bedingt sein, da die Graskulturen in einer Höhe von ca. 1,50 m exponiert werden. Für manche der Elemente ist auch eine Abhängigkeit der Metallgehalte im Boden nicht auszuschließen. (Abb. 45).

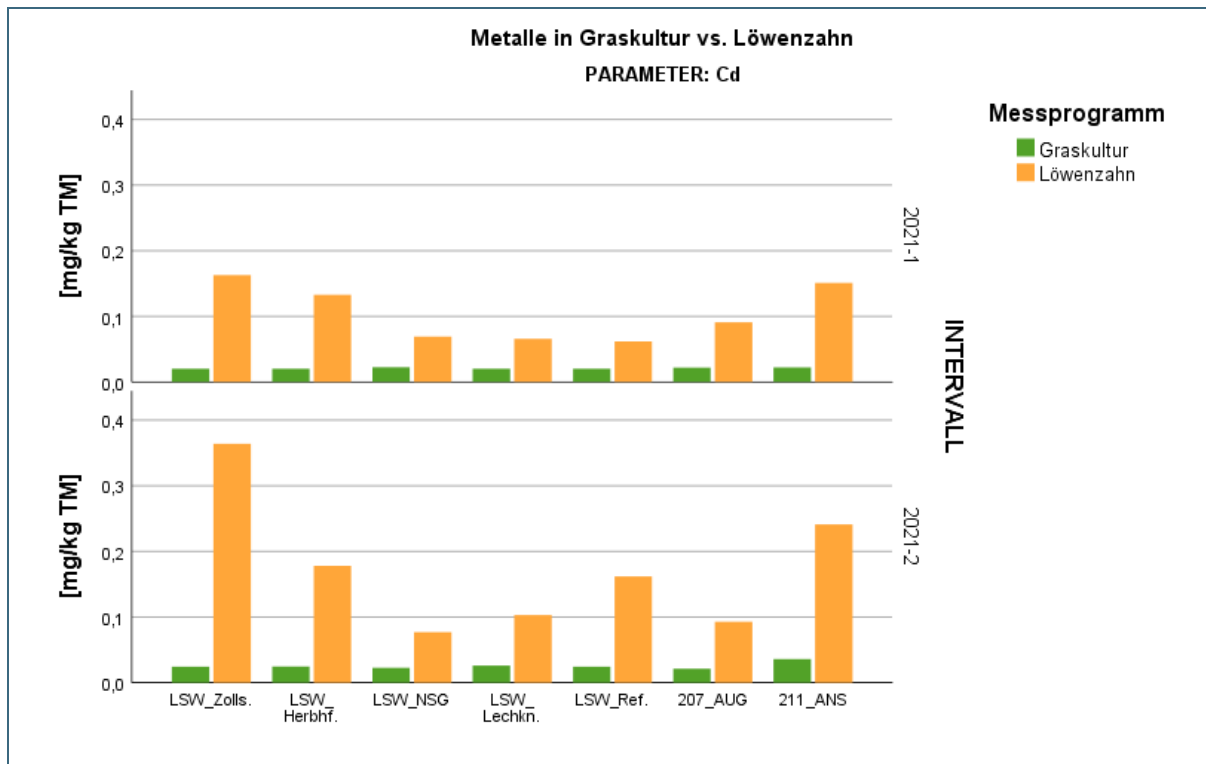


Abb. 45: Cadimungehalte in Graskultur und Löwenzahn

Parameter mit Differenzierung von Standorttypen

Mit der Graskultur lassen sich beispielsweise verkehrsbeeinflusste Standorte anhand von verkehrstypischen Elementen wie Antimon, Bismut, Chrom, Eisen, Kupfer, Niob und Zinn gut differenzieren. Dies gelingt mit Löwenzahn nicht in gleichem Maße (Abb. 46). Dies kann daran liegen, dass bei der Sammlung der Löwenzahnpflanzen zwar hoher Wert auf identische Standorte für Gras und Löwenzahn gelegt wurde, der Zustand der beprobten Löwenzahnpflanzen aber z.T. recht unterschiedlich war (z.B. sehr jung, wenn Fläche frisch gemäht). Bei den Graskulturen ist zudem dokumentiert, dass die genannten verkehrstypischen Elemente v.a. über kleine Partikel in die Umwelt eingetragen werden, die gut an den Graskulturen haften, während größere Partikel sich leichter wieder von der Oberfläche lösen (LfU 2019). Für die bodennahen Löwenzahnpflanzen kann es andere dominierende Anreicherungsprozesse geben.

Für Bismut und Zinn lagen zudem beim Löwenzahn die meisten Messwerte unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze, wohingegen bei den Graskulturen bessere Bestimmungsgrenze erzielt werden konnten.

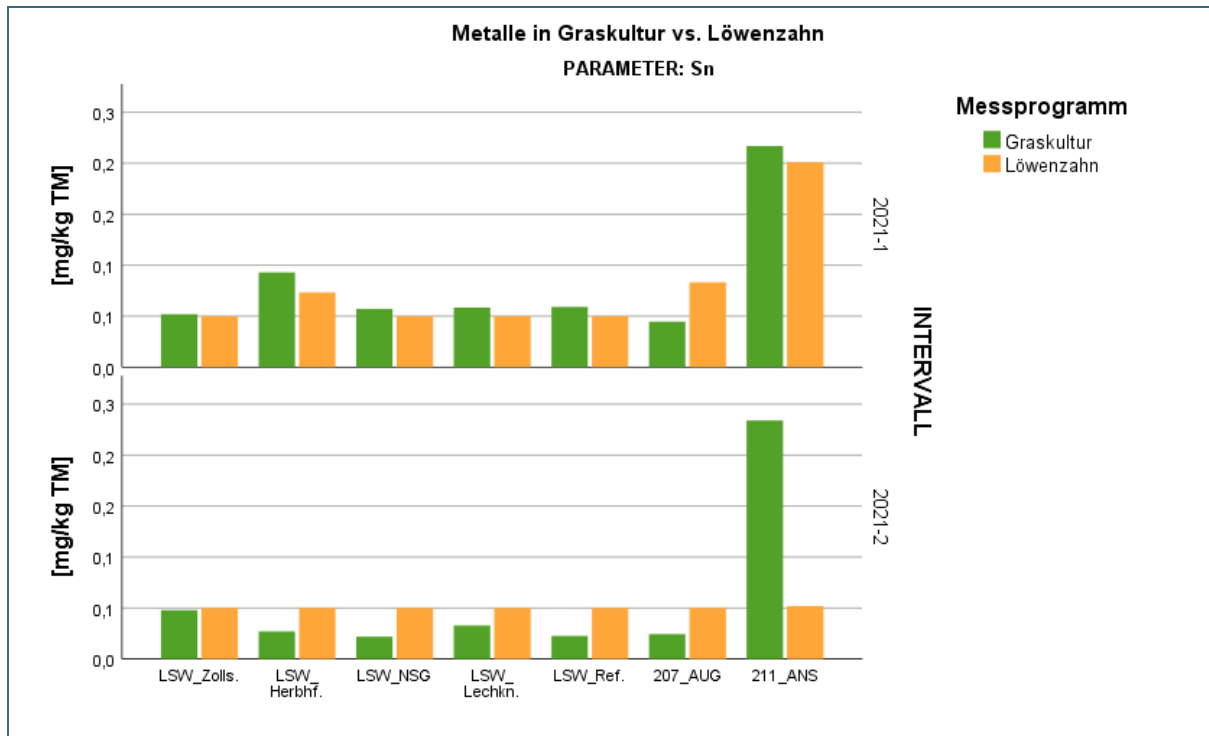


Abb. 46: Zinngehalte in Graskultur und Löwenzahn

In den Graskulturen erkennbar erhöhte Gehalte an den stärker mit Chrom, Niob oder Vanadium belasteten LSW-Standorten lassen sich mit dem Löwenzahn nicht so klar ausweisen. Hier überlagern vermutlich die Eigenschaften der gesammelten Proben und die Anlagerungsprozesse eine mögliche Standortcharakterisierung.

Organische Parameter

Die PCB-gesamt (Summe der Indikator-PCB * 5) liegen für die Graskulturen an den LSW 2021 im Bereich von 1,5 µg/kg TS. Im Löwenzahn werden im Umfeld der LSW nur an der Referenzstation PCB-gesamt nachgewiesen (Abb. 47). Höhere Gehalte findet man an der DBS Augsburg und v.a. in der zweiten Serie an der verkehrsbeeinflussten DBS Ansbach. Zwischen Graskultur und Löwenzahn lassen sich keine klaren Korrelationen erkennen.

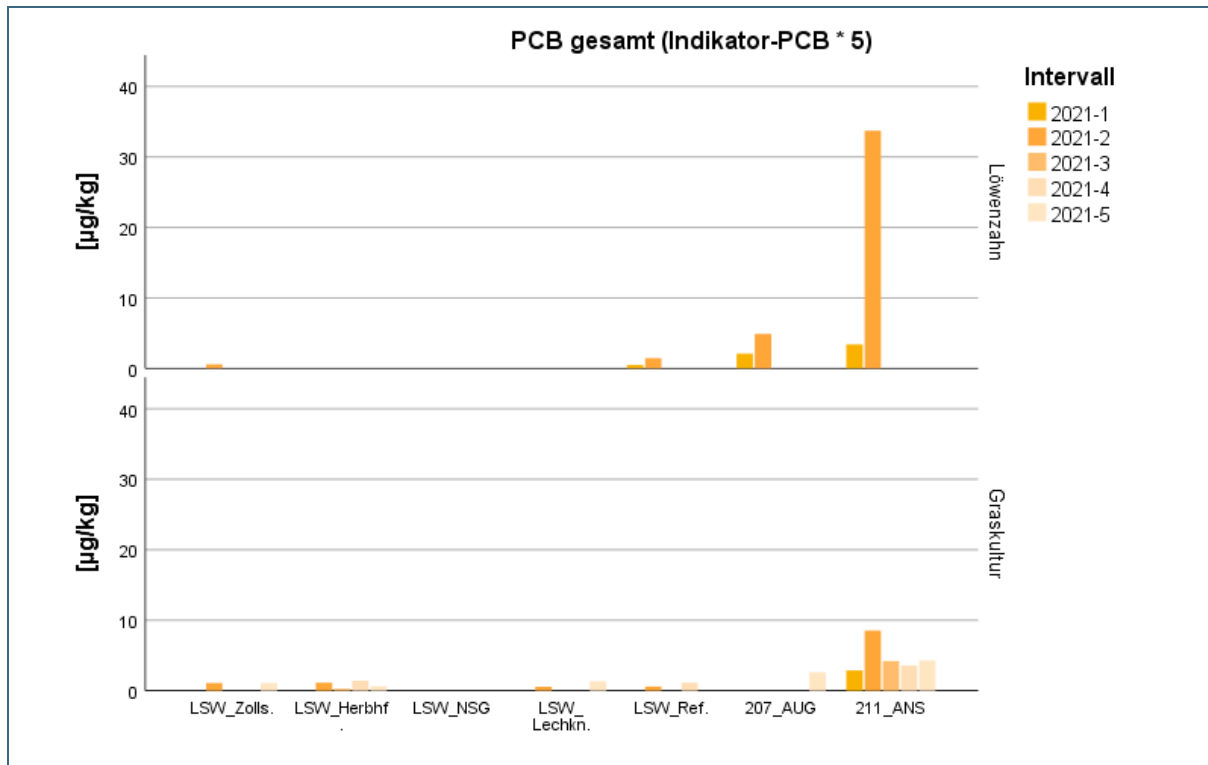


Abb. 47: PCB-gesamt in Löwenzahn und Graskultur

Für die Gruppe der dl-PCB zeigt sich für die LSW-Standorte und die DBS Ansbach eine vergleichbare Größenordnung. Für die DBS Augsburg ist jedoch keine Korrelation erkennbar (Abb. 48).

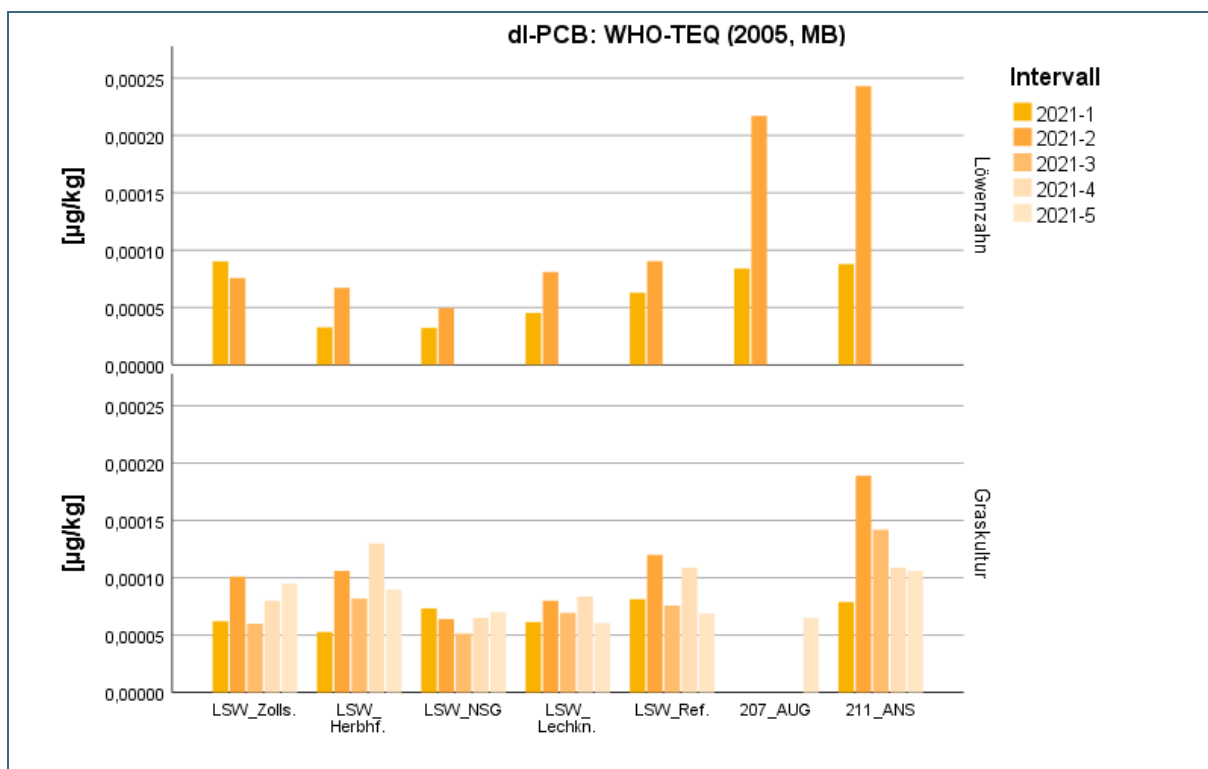


Abb. 48: dl-PCB in Löwenzahn und Graskultur

Für die Dioxine / Furane zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei den dl-PCB. Das Niveau an den LSW-Standorten ist an allen Standorten mit beiden Verfahren sehr ähnlich. An den DBS Augsburg und Ansbach gibt es hingegen deutliche Abweichungen (Abb. 49).

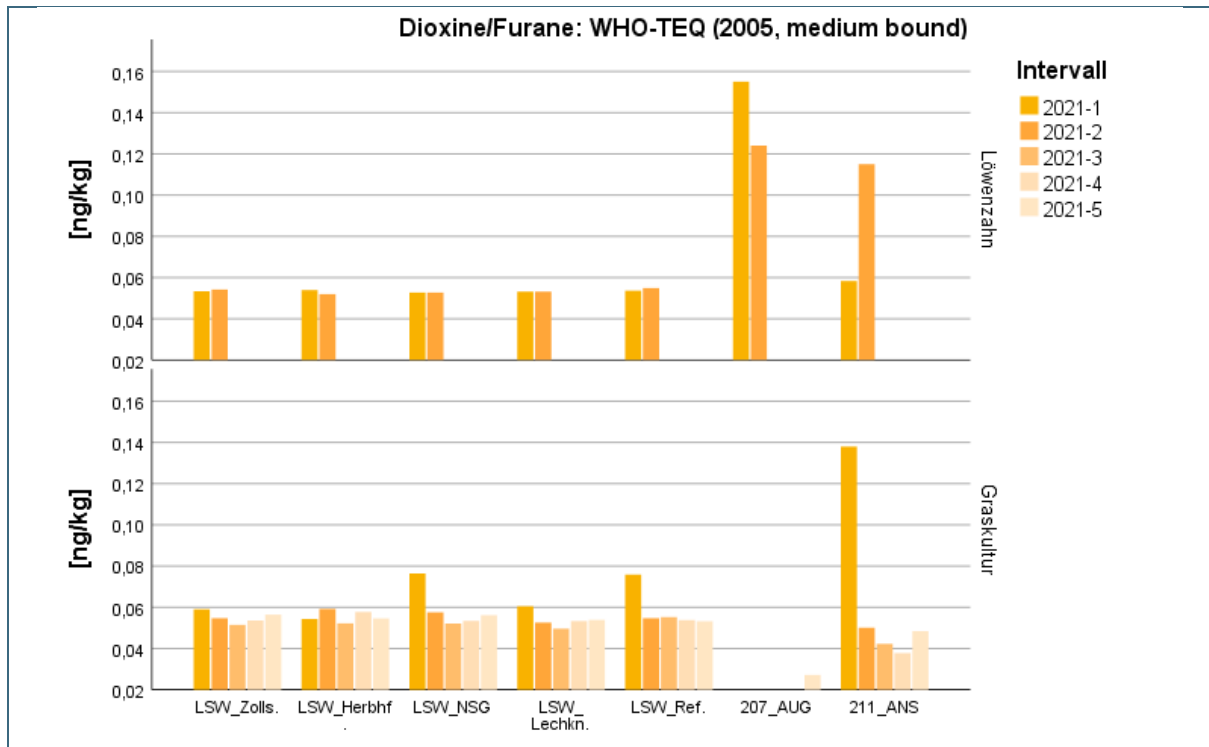


Abb. 49: Dioxine/Furane in Löwenzahn und Graskultur

Die PAK-Proben der LSW aus 2021 konnten wegen zu hoher Bestimmungsgrenzen des beauftragten Labors nicht ausgewertet werden. An der DBS Ansbach sind im Löwenzahn die schwererflüchtigen PAK erhöht (Abb. 50, Abb. 51). Hierfür ist möglicherweise eine höhere bodennahe Staubdeposition verantwortlich.

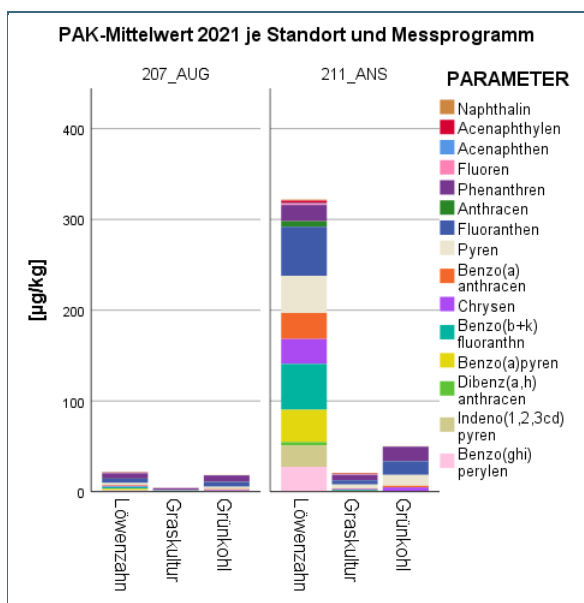


Abb. 50: PAK 2021 an DBS Augsburg und Ansbach

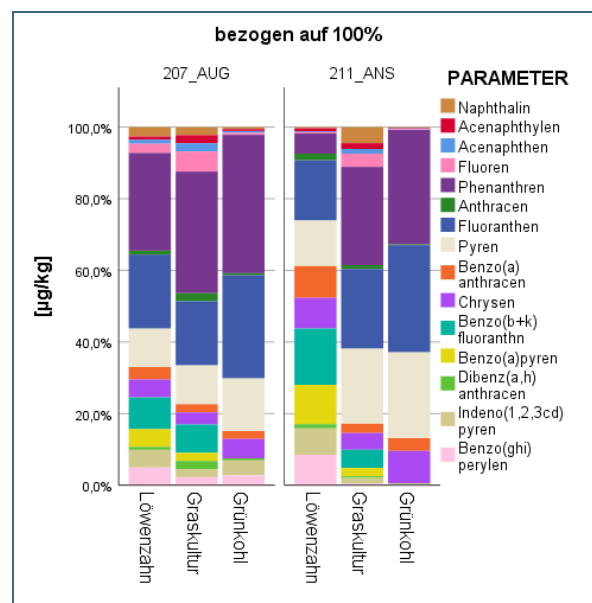


Abb. 51: PAK 2021 an DBS Augsburg und Ansbach, bezogen auf 100%

Der Einsatz des Löwenzahnscreenings an den LSW hat wertvolle Hinweise für die Erstellung der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 7 geliefert. Der Einsatz für Löwenzahn ungewaschen und Analytik auf Metalle in der vorliegenden Untersuchung hat Probleme aufgezeigt, die bei einem erneuten Einsatz des Verfahrens durch eine Optimierung der Probenahme verbessert werden könnten.

4 Zusammenfassung

Ziel 1: Sicherstellen eines langfristigen Monitorings des atmosphärischen Eintrages von Stoffen, insbesondere POP zur Überwachung der Umweltqualität in Bayern

Die Optimierung des immissionsökologischen Umweltmonitorings des LfU im Flachland wie in den Alpen wurde sowohl durch Arbeitspaket 1 und Arbeitspaket 3 realisiert. Dazu zählt die Erarbeitung eines langfristigen Monitoringkonzeptes für Umweltchemikalien in Atmosphäre und Deposition.

- Das Monitoring an der Zugspitze wurde in den Regelbetrieb übernommen; Die Probenahme-technik an der UFS wurde überprüft und verbessert (Ertüchtigung der Maschinen, Vermeidung lokaler FSM-Quellen); Die Anzahl der Proben wurde weitestgehend reduziert unter Berücksichtigung der Funktion als Frühwarnsystem.
- Die Messnetze zum atmosphärischen Monitoring von Flachland und Alpen wurde zusammengeführt. In Nürnberg wurde eine Referenzstation aufgebaut, an der neben Depositionsproben auch Immissionsproben gewonnen werden, die auf persistente organische Schadstoffe getestet werden können. Insgesamt wurden die Standorte des immissionsökologischen Messnetzes sowie der Probenumfang überprüft und wo möglich die Grasproben auf Mischproben zusammengefasst um den Aufwand in der analytischen Bestimmung reduzieren zu können ohne die Funktionalität des Monitorings zu schwächen.

Ziel 2: Abgleich bestehender Monitoringaktivitäten in Bayern, Deutschland und Europa, um Synergien besser zu nutzen

Der Eintrag von persistenten Umweltchemikalien wird durch überregionale Einträge mitbestimmt. Die Verteilung ist global und das Umweltverhalten komplex. Für ein effektives Umweltmonitoring ist ein intensiver Austausch und Abgleich verschiedener Monitoringaktivitäten notwendig. Die Verbesserung des Informationsaustausches wurde im Arbeitspaket 4 umgesetzt. Der Informationsaustausch bezieht sich zum einen auf die Vernetzung mit relevanten Institutionen und Behörden und zum anderen auf die Verfügbarmachung und den leichten Zugang zu Messdaten. Folgende Zusammenarbeiten wurden genutzt:

- PESPAT ([LINK](#))
- InterregProjekt ProtectBats ([LINK](#))
- Die amtsinterne Zusammenarbeit mit der Abteilung Luft, Lärm und Anlagensicherheit zu den Lechstahlwerken
- Fortführung der Kooperation mit der Umweltbundesamt GmbH Österreich und intensiver Austausch bezüglich Reparaturen und Wartungen der hochspezialisierten Messgeräte
- Austausch mit dem Luftmessnetz des Umweltbundesamtes Deutschland und des Deutschen Wetterdienstes
- Leitung des Workshops Chemikalienmonitoring bei der Umweltbeobachtungskonferenz 2021 in engem Austausch mit dem LUBW, UBA-Ö, LANUV, BAFU

- Zusammenarbeit mit dem der Umweltbundesamt GmbH Österreich zur Analytik der Proben am Hohen Sonnblick und an der Zugspitze (Bericht zum VAO-Monitoring [LINK](#))
- Zum Abschluss des Projektes wurde eine Fachtagung organisiert, bei der sich Behördenvertreter und Fachleute aus Deutschland und Österreich austauschen und vernetzen konnten.

Ziel 3: Beitrag Bayerns zur europäischen und internationalen Schadstoffregulierung weiter stärken

Eine europäische Zusammenarbeit ist wichtig um den Eintrag von problematischen Stoffen sinnvoll zu reduzieren, was letztendlich nur über einen Beitrag zur europäischen Chemikalienregulierung gewährleistet werden kann. Es gilt daher die Bereitstellung der gewonnenen Daten aus den Monitoringaktivitäten leicht verfügbar zu machen oder bestenfalls sogar automatisch in Regulierungsverfahren einfließen zu lassen.

- Seit 2022 werden die Messdaten der Zugspitze automatisch an die immissionsökologische Datenbank des LfUs weitergeleitet. Eine Vorlage zur Übertragung älterer Daten wurde erarbeitet. Von der immissionsökologischen Datenbank erfolgt regelmäßig eine Übertragung der Daten an das Deutsche Umweltbundesamt.
- Die Messdaten zu persistenten organischen Schadstoffen wurden dem Global Monitoring Programm der UNEP über das Data Warehouse zur Verfügung gestellt.
- Die Messergebnisse wurden auf dem Virtual Alpine Observatory (VAO) Symposium in Grainau vorgestellt (21. bis 23. März 2023).

Ziel 4: Verbesserung der immissionsbezogenen Umweltkommunikation zum Eintrag anthropogener Schadstoffe in die Umwelt

Die konkrete Umsetzung dieses Ziels wurde durch das Arbeitspaket 5 gesichert:

- Kooperationsprojekt mit der Hochschule Macromedia: Publikation zum Thema Quecksilber ([LINK](#))
- Beitrag über den Eintrag von Quecksilber in der Atmosphäre ([Mitt Umweltchem Ökotox 1/2021 gdch.de](#)).
- Vortrag an der Universität Bern im Rahmen des Soil Science Colloquiums zum Thema „Atmospheric input of mercury and accumulation in alpine ecosystems (Mai 2021)
- Zweijähriger Bericht der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus [2022](#) und [2020](#)
- Kurzbericht Schadstoffe in den Alpen – Wirkungen auf ein sensibles Ökosystem [LINK](#) zum Download)

5 Konsequenzen aus den Ergebnissen – weiterer Handlungsbedarf

Die Arbeiten zur Optimierung des Monitorings haben gezeigt, dass die Überwachung der POPs von großer Bedeutung ist. Besondere Beachtung sollten zukünftig die Flammschutzmittel erhalten, bei denen keine Abnahme zu verzeichnen ist. Hier sind vor allem Hexabrombenzol und Pentabromtoluol zu beachten, da ihre Mediane über den Zeitraum 2019 bis 2023 höher liegen als die Mediane von 2012 bis 2019. Gleichzeitig sollte überprüft werden, ob Kapazitäten vorhanden sind, das Spektrum um *Chemicals of Emerging Concern* (CEC) zu erweitern, wie zum Beispiel Phthalate, Cyclohexane und UV-Absorber.

Das Umweltmonitoring an der UFS wurde jahrelang über Projekte ermöglicht und wurde nun als Langzeitmonitoring im Regelbetrieb übernommen. Dies ist nur möglich, da an verschiedenen Stellen Einsparungen und Reduzierungen durchgeführt wurden. Um das Substanzspektrum zu erweitern liegen die Sammelgeräte an der UFS vor. Engpässe bestehen, da die Etablierung neuer analytischer Methoden im hochauflösenden Spurenbereich sehr zeitaufwendig sind und geschultes Fachpersonal benötigt wird. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Qualitätssicherung eines Langzeitmonitorings Ressourcen benötigt (Austausch an Materialien, Wartungen und Reparaturen der Geräte, Schulung der Probenehmer, Feldblindwerte, Doppelbestimmungen...), die in regelmäßigen Abständen fällig werden und entsprechend eingeplant werden müssen. Für die Arbeiten ist die gute Zusammenarbeit mit der Umweltbundesamt GmbH Österreich zu erwähnen, die es ermöglicht, dass neben den Flammenschutzmitteln und Organochlorpestiziden auch Proben für Polychlorierte Biphenyle, Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane genommen werden können.

Ergebnisse zu den POP-Gehalten in Immissions- und Depositionsproben der Referenzstation in Nürnberg werden erst für 2025 erwartet. Eine internationale Studie zu Flammenschutzmitteln in Großstädten konnte kürzlich zeigen, dass die Belastung durch Flammenschutzmittel in Großstädten in Bereichen liegt, die der Umwelt und der menschlichen Gesundheit schaden (Saini et al. 2020). So hohe Werte werden für Nürnberg nicht erwartet, das Monitoring soll diese Hypothese bestätigen. Der ausschlaggebende Vorteil der neuen Station ist, dass CEC schneller erfasst werden können, da im urbanen Umfeld mit höheren Konzentrationen zu rechnen ist. Zusammen mit den Messungen an der UFS kann der Ferntransport überwacht werden, was eine schnellere Risikobeurteilung ermöglicht. Handlungsbedarf entsteht bei Detektion kritischer Chemikalien, maßgeblicher Akteur ist dann das deutsche Umweltbundesamt, dass Chemikalienbeschränkungsverfahren gemäß EU-REACH anstoßen kann.

Das PFAS-Monitoring wird ebenfalls im Regelbetrieb durch das Umweltmonitoring fortgeführt, um die Entwicklung über die Zeit im Blick zu behalten. Besonders interessant ist dies im Hinblick auf die regulatorische Situation, da aktuell die Regulierung der gesamten PFAS-Substanzgruppe diskutiert wird. In diesem Zusammenhang wird auch deutlich, wie essenziell die Verfügbarkeit von Monitoringdaten für Beschränkungs- und/oder Zulassungsverfahren im Rahmen von REACH ist.

Sowohl der Klimawandel als auch der Biodiversitätsverlust stehen mit der Belastung der Umwelt durch anthropogene Chemikalien in Verbindung. Um effektiv die Ziele der EU im Hinblick auf den „Zero Pollution Ambition“-Plan zu erreichen, ist das Umweltmonitoring bezüglich Chemikalien ein wichtiger Bestandteil. Es fungiert als Frühwarnsystem aber auch als Werkzeug zur Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen. In zukünftigen Projekten sollte der Zusammenhang zwischen Klimawandel, Biodiversität und dem Vorkommen von Umweltchemikalien näher beleuchtet werden.

Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass die breite Bevölkerung informiert wird ohne Ängste zu schüren. Umweltmonitoring sollte immer von entsprechender Öffentlichkeitsarbeit begleitet oder sogar Wege gefunden werden, unter Einbezug der Bevölkerung das Umweltmonitoring durchzuführen („Citizen Science“).

6 Literatur und Quellen

- [1] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2014): Monitoring neuartiger Schadstoffe im Bayerischen Alpenraum (EMPOP). Online abrufbar unter: [LINK](#).
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2021): PureAlps 2016-2020. Monitoring von persistenten Schadstoffen und Quecksilber im Alpenraum. Abschlussbericht. Online abrufbar unter: [LINK](#).
- [3] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2019): Biomonitoring persistenter Schadstoffe – Immissionsökologisches Monitoring persistenter organischer und anorganischer Schadstoffe im Hintergrund und bei quellenspezifischer Belastung. Abschlussbericht.
- [4] Blum, Arlene; Behl, Mamta; Birnbaum, Linda S.; Diamond, Miriam L.; Phillips, Allison; Singla, Vena; Sipes, Nisha S.; Stapleton, Heather M.; Venier, Marta. (2019): Organophosphate Ester Flame Retardants: Are They a Regrettable Substitution for Polybrominated Diphenyl Ethers?. Environmental Science & Technology Letters. 6 (11): 638–649. <https://doi.org/10.1021%2Facs.estlett.9b00582>
- [5] Duffek, A., Conrad, A., Kolossa-Gehring, M. et al. (2020): Per- and polyfluoroalkyl substances in blood plasma – Results of the German Environmental Survey for children and adolescents 2014–2017 (GerES V). Int J Hyg Environ Health, 228, 113549. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113549>
- [6] European Commission (EC) (2021): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN: Auf dem Weg zu einem gesunden Planeten für alle. EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“. COM/2021/400 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0400>
- [7] European Commission (EC) (2022): COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT Restrictions Roadmap under the Chemicals Strategy for Sustainability. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/49734>
- [8] European Chemicals Agency (ECHA) (2023): Regulatory strategy for flame retardants. Reference: ECHA-23-R-03-EN. DOI: 10.2823/854233
- [9] Finnian Freeling, David Behringer, Felix Heydel, Marco Scheurer, Thomas A. Ternes, and Karsten Nödler (2020): Trifluoroacetate in Precipitation: Deriving a Benchmark Data Set. Environmental Science & Technology 2020 54 (18), 11210-11219. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.0c02910>
- [10] S.B. Gewurtz, L.E. Bradley, S. Backus, A. Dove, D. McGoldrick, H. Hung, H. Dryfhout-Clark (2019): Perfluoroalkyl acids in great lakes precipitation and surface water (2006-2018) indicate response to phase-outs, regulatory action, and variability in fate and transport processes Environ. Sci. Technol., 53 (15) (2019), pp. 8543-8552, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01337>
- [11] Göckener, B., Weber, T., R el, H. et al. (2020): Human biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances in German blood plasma samples from 1982 to 2019. Environment International, 145, 106123. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106123>
- [12] Emma Ivantsova, Austin Lu, Christopher J. Martyniuk (2024): Occurrence and toxicity mechanisms of perfluorobutanoic acid (PFBA) and perfluorobutane sulfonic acid (PFBS) in fish, Chemosphere, Volume 349, 140815, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140815>

- [13] L. Mayer, C. Degrendele, G. Lammel et al. (2024): Widespread Pesticide Distribution in the European Atmosphere Questions their Degradability in Air. Environmental science & technology. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.3c08488>
- [14] David Pfothenhauer, Emily Sellers, Mark Olson, Katie Praedel, Martin Shafer (2022): PFAS concentrations and deposition in precipitation: An intensive 5-month study at National Atmospheric Deposition Program – National trends sites (NADP-NTN) across Wisconsin, USA. Atmospheric Environment 291, 119368, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119368>
- [15] K.A. Pike, P.L. Edmiston, J.J. Morrison, J.A. Faust (2021): Correlation analysis of perfluoroalkyl substances in regional U.S. Precipitation events. Water Res., **190**. [10.1016/j.watres.2020.116685](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116685)
- [16] Kleckerova, A.; Docekalova, H.: Dandelion Plants as a Biomonitor of Urban Area Contamination by Heavy Metals, Int. J. Environ. Res. 8 (1) (2014), pp. 157–164
- [17] A. Wanner, D. Heitmann, H. Fromme, W. Körner (2008): [Polybromierte Diphenylether \(PBDE\) in Raumluft und Hausstaub von Wohnräumen in Südbayern. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft](#) 68, 71-78.
- [18] OECD – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2021) Reconciling terminology of the universe of per- and polyfluoroalkyl substances: recommendations and practical guidance (OECD Series on Risk Management, Issue. [https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO\(2021\)25/En/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO(2021)25/En/pdf)
- [19] Röhler, L., Bohlin-Nizzetto, P., Rostkowski, P., Kallenborn, R., and Schlabach, M. (2021): Non-target and suspect characterisation of organic contaminants in ambient air – Part 1: Combining a novel sample clean-up method with comprehensive two-dimensional gas chromatography, Atmos. Chem. Phys., 21, 1697–1716. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1697-2021>
- [20] Amandeep Saini, Tom Harner et al. (2020): GAPS-megacities: A new global platform for investigating persistent organic pollutants and chemicals of emerging concern in urban air, Environmental Pollution, Volume 267, 115416. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115416>
- [21] Langjie Ye, Jianhua Li, Shuai Gong, Sofia M. Herczegh, Qi Zhang, Robert J. Letcher, Guanyong Su (2023): Established and emerging organophosphate esters (OPEs) and the expansion of an environmental contamination issue: A review and future directions. Journal of Hazardous Materials, Volume 459, 132095, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132095>
- [22] https://www.normandata.eu/sites/default/files/files_private/JointProgramme2022/NORMAN%20JPA%202022_Final_Feb2022.pdf
- [23] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2009): Biomonitoring Lech-Stahlwerke 2007 – 2008
- [24] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2016): Immissionsmessungen in der Umgebung eines Elektrostahlwerkes - Berichtszeitraum 01.10.2014-31.12.2015
- [25] Immissionsmessungen in der Umgebung eines Elektrostahlwerkes - Berichtszeitraum 01.04.2021-02.04.2023: https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_luft_00215.htm
- [26] Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV) vom 25.01.2010. BGBl. I (2010) S. 1065, zuletzt geändert BGBl. I (2020) S. 1328
- [27] 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

- [28] Immissionswerte für Quecksilber, Quecksilberverbindungen: Bericht des Unterausschusses „Wirkungsfragen“ des LAI, verabschiedet in seiner 89. Sitzung vom 25.–27.10.1995
- [29] Verordnung (EU) Nr. 277/2012 der Kommission vom 28. März 2012 zur Änderung der Anhänge I und II der Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Höchstgehalte und Aktionsgrenzwerte für Dioxine und polychlorierte Biphenyle
- [30] Empfehlung der Kommission (2013/711/EU) vom 3. Dezember 2013 zur Reduzierung des Anteils von Dioxinen, Furanen und PCB in Futtermitteln und Lebensmitteln
- [31] VDI-Richtlinie 3857 (Blatt 2) (07/2021) Beurteilungswerte für immissionsbedingte Stoffanreicherungen in standardisierten Graskulturen - Orientierungswerte für maximale Hintergrundgehalte ausgewählter anorganischer Luftverunreinigungen
- [32] VDI-Richtlinie 3957 (Blatt 2) (08/2020) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring); Verfahren der standardisierten Graskultur
- [33] VDI-Richtlinie 3957 (Blatt 3) (01/2024) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) - Verfahren der standardisierten Exposition von Grünkohl
- [34] VDI-Richtlinie 3957 (Blatt 7) (im Entwurf, geplant für 06/2024) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) - Löwenzahnscreening
- [35] VDI-Richtlinie 3957 (Blatt 10) (01/2024) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Pflanzen (Biomonitoring) - Einsatz aktiver Biomonitoringverfahren im Bereich von Emissionsquellen
- [36] Empfehlung der EU-Kommission zur Reduzierung des Anteils von Dioxinen, Furanen und PCB (Nr. 2013/711/EU)

7 Anhang

7.1 Anhang Flammschutzmittel Analytik

Tab. 13: Parameterspektrum der analysierten Flammschutzmittel

Einzelsubstanz Abkürzung	IUPAC Name	CAS-Nr.
BDE 28	2,4,4'-Tribromdiphenylether	41318-75-6
BDE 47	2,2',4,4'-Tetrabromdiphenylether	5436-43-1
BDE 100	2,2',4,4',6-Pentabromdiphenylether	189084-64-8
BDE 99	2,2',4,4',5-Pentabromdiphenylether	60348-60-9
BDE 154	2,2',4,4',5,6'-Hexabromdiphenylether	207122-15-4
BDE 153	2,2',4,4',5,5'-Hexabromdiphenylether	68631-49-2
BDE 183	2,2',3,4,4',5,6'-Heptabromdiphenylether	207122-16-5
BDE 209	Decabromdiphenylether	1163-19-5
Summe-HBCD	1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan (Stereoisomerengemisch)	3194-55-6
p-TBX	2,3,5,6-Tetrabrom-p-xylol	23488-38-2
PBT	Pentabromtoluol	87-83-2
PBEB	1,2,3,4,5-Pentabrom-6-ethylbenzol	85-22-3
HBB	Hexabrombenzol	87-82-1
	anti-Cl10-Dechloran Plus	
	syn-Dechloran Plus	135821-03-3
	anti-Cl11-Dechloran Plus	
	anti-Dechloran Plus	135821-74-8
DBDPE	Decabromdiphenylethan	84852-53-9

Tab. 14: Luftkonzentrationen halogener Flammenschutzmittel in pg/Nm³ an der Zugspitze (UFS) von Oktober 2019 bis September 2023. Ein Messwert gilt als gültig, wenn er das Zweifache des Laborblindwerts oder des Feldblindwerts übersteigt. Der zweifache FBW oder LBW entspricht dann der Bestimmungsgrenze. War der Messwert niedriger, wurde dies mit < 2 FBW (a) oder < 2 LBW (b) eingetragen. War der Messwert niedriger als die instrumentelle Bestimmungsgrenze des Verfahrens (LOQ) wurde dies mit < LOQ gekennzeichnet. Das Abbauprodukt von anti Dechloran Plus „aCl10DP“ lag immer unter der instrumentellen Bestimmungsgrenze. Die Wiederfindung von BTBPE war nicht gegeben. Beide Substanzen können entsprechend nicht ausgewertet werden.

Zeitraum	01.10.2019- 09.01.2020	09.01.2020- 08.04.2020	08.04.2020- 07.07.2020	07.07.2020- 08.10.2020	08.10.2020- 19.01.2021	19.01.2021- 14.04.2021
LIMS-Nummer	16LFU- A0290-040	16LFU- A0290-057	16LFU- A0290-061	16LFU- A0290-065	16LFU- A0290-069	16LFU- A0290-071
Wo	UFS	UFS	UFS	UFS	UFS	UFS
Volumen in Nm ³	3383,2	3099,9	3052,3	3157,6	3429,7	2922,7
	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³
BDE 28	0,025	0,058	0,012	0,053	0,093	0,059
BDE 47	0,058	<0,132 a)	0,027	0,127	0,073	0,068
BDE 99	0,017	<0,030 a)	<0,008 a)	0,030	0,013	0,019
BDE 100	0,006	<0,010 a)	0,003	0,014	0,006	0,008
BDE 153	<0,005 a)	<0,004 a)	n.n.	<0,004 b)	0,003	<0,005 b)
BDE 154	<0,004 b)	0,003	n.n.	0,003	0,003	0,004
BDE 183	<0,008 a)	<0,005 c)	n.n.	<0,005 c)	<0,004 c)	<0,024 b)
BDE 209	0,286	<0,159 a)	<0,532 b)	<0,358 a)	1,15	0,555
Hexabrombenzol	0,160	0,332	0,07727	0,427	0,120	0,965
Pentabrommethylbenzol	0,015	0,052	0,02134	0,061	0,010	0,010
Pentabromtoluol	<0,759 a)	<3,79 a)	<0,160 a)	0,361	0,215	0,196
2,3,5,6-Tetrabrom-p-xylyl	0,010	<0,046 a)	<0,002 c)	<0,002 c)	n.n.	n.n.
syn-Dechloran Plus	0,283	0,029	0,014	0,177	0,067	0,096
anti-Dechloran Plus	1,08	0,096	0,032	0,639	0,639	0,480
Decabromdiphenylethan	0,382	12,4	<0,757 b)	0,394	0,394	0,490
Summe HBCD	0,433	<0,672 a)	<1,11 a)	<0,510 a)	2,50	
BTBPE	<0,133 c)	n.n.	<0,147 c)	<0,145 c)	n.n.	
anti-Cl10-Dechloran Plus	<0,002 c)	n.n.	n.n.	<0,002 c)	<0,002 c)	<0,002 c)
anti-Cl11-Dechloran Plus	0,005	0,021	<0,002 c)	0,008	0,003	n.n.

Zeitraum	14.04.2021- 13.07.2021	13.07.2021- 12.10.2021	12.10.2021- 12.01.2022	12.01.2022- 05.04.2022	05.04.2022- 05.07.2022	05.07.2022- 05.10.2022
LIMS-Nummer	16LFU- A0290-075	16LFU- A0290-079	16LFU- A0290-083	22LFU- A0003-001	22LFU- A0003-003	22LFU- A0003-005
Wo	UFS	UFS	UFS	UFS	UFS	UFS
Volumen in Nm ³	3060,7	3024,9	3105,4	2881,4	3072,3	3099,2
	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³
BDE 28	0,049	0,036	0,054	0,061	0,178	0,052
BDE 47	0,126	0,104	0,066	0,113	2,62	0,154
BDE 99	0,034	0,024	0,014	0,051	<0,017 a)	0,035
BDE 100	0,017	0,011	0,005	0,016	0,576	0,014
BDE 153	0,003	0,003	0,002	<0,017	0,160	0,004
BDE 154	0,004	0,004	0,003	0,006	0,196	0,004
BDE 183	0,006	0,015	0,008	<0,118	<0,012 a)	<0,011 a)

Zeitraum	14.04.2021- 13.07.2021	13.07.2021- 12.10.2021	12.10.2021- 12.01.2022	12.01.2022- 05.04.2022	05.04.2022- 05.07.2022	05.07.2022- 05.10.2022
BDE 209	0,246	4,94	0,242	2,87	<0,279 a)	0,376
Hexabrombenzol				0,149	0,467	0,658
Pentabromethylbenzol				0,033	0,112	0,110
Pentabromtoluol				<0,511 a)	0,705	1,31
2,3,5,6-Tetrabrom-p-xylo				0,005	0,010	0,004
syn-Dechloran Plus				0,056	n.n.	n.n.
anti-Dechloran Plus				0,196	0,068	n.n.
Decabromdiphenylethan				<1,36	0,405	0,436
Summe HBCD	0,430	0,232		0,214	0,110	0,176
BTBPE	<0,147 c)	<0,148 c)		<0,156 c)	<0,146 c)	n.n.
anti-CI10-Dechloran Plus				n.n.	<0,002 c)	n.n.
anti-CI11-Dechloran Plus				<0,068	<0,067 a)	<0,066 a)

Zeitraum	05.10.2022- 10.01.2023	10.01.2023- 28.03.2023	28.03.2023- 03.07.2023	03.07.2023- 25.09.2023
LIMS-Nummer	22LFU-A0003-007	22LFU-A0003-009	22LFU-A0003-011	22LFU-A0003-013
Wo	UFS	UFS	UFS	UFS
Volumen in Nm³	3294,6	2720,8	3011,5	2834,7
	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³	pg/Nm³
BDE 28	0,035	0,050	0,046	0,031
BDE 47	0,085	0,079	0,124	0,159
BDE 99	<0,023 a)	0,026	0,029	0,038
BDE 100	<0,005 a)	0,007	0,010	0,014
BDE 153	<0,005 a)	0,008	<0,004 a)	<0,014 a)
BDE 154	0,002	0,004	0,005	0,004
BDE 183	<0,032 a)	0,022	<0,028 a)	<0,057 a)
BDE 209	<0,498 a)	0,436	0,461	<0,681 a)
Hexabrombenzol	0,184	0,129	0,543	1,05
Pentabromethylbenzol	0,024	0,025	0,173	0,177
Pentabromtoluol	0,499	0,454	0,553	0,828
2,3,5,6-Tetrabrom-p-xylo	0,009	0,007	<0,002 c)	0,038
syn-Dechloran Plus	0,096	n.n.	0,075	0,262
anti-Dechloran Plus	0,150	n.n.	0,299	0,635
Decabromdiphenylethan	0,527	0,518	8,15	1,62
Summe HBCD		0,114	0,242	0,248
BTBPE		n.n.		<0,158 c)
anti-CI10-Dechloran Plus	n.n.	n.n.	n.n.	<0,002 c)
anti-CI11-Dechloran Plus	<0,061 a)	<0,070 a)	<0,002 c)	0,003

a) Messwert < 2 FBW, Bestimmungsgrenze = 2 FBW; b) Messwert < 2 LBW, Bestimmungsgrenze = 2 LBW;
c) Messwert < LOQ, LOQ (limit of quantification; Verfahrensbestimmungsgrenze)

7.2 Anhang Ergebnisse FSM-Innenraummessungen

Tab. 15: Ergebnisse der Kontrollmessungen von Flammschutzmitteln in Immissionsproben an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS).

	LFU Büroräume 1.425, 1.427, 1.428	UFS renovierter Bereich: Casino, Zimmer 1.14, Flur 1. Ug	Umbau ca. 1996: Labor 3. Og, Labor 4. Og, Wechselnutzer labor 5. Og	Durchzugsbe- reich: Treppenhaus 3. Og, Tunnel/Bhf, Vorraum Kammstollen	UFS Terrasse
LIMS-Nummer	21LFU- A0067-028-01	21LFU- A0067-030- 01	21LFU-A0067- 030-02	21LFU-A0067- 030-03	22LFU- A0003-11
	pg/Nm ³	pg/Nm ³	pg/Nm ³	pg/Nm ³	pg/Nm ³
BDE 28	0,336	0,163	2,33	1,05	0,046
BDE 47	0,744	1,27	8,54	5,77	0,124
BDE 100	<0,033 a)	0,069	0,399	0,266	0,010
BDE99	<0,221 a)	0,217	1,53	0,720	0,029
BDE 154	<0,025 a)	<0,003 a)	0,141	0,047	0,005
BDE 153	0,115	<0,019 a)	0,222	0,147	0,004
BDE 183	0,729	0,097	0,325	1,25	<0,028 a)
BDE 209	0,851	5,93	6,04	1,26	0,461
Summe HBCD	<0,722 c)	<1,21 c)	2,72	3,15	0,242
2,3,5,6-Tetrabrom-p-xylol	n.n.	n.n.	0,663	0,144	0,003
Pentabromtoluol	6,64	23,5	59,6	24,2	0,554
Pentabrommethylbenzol	0,087	0,183	0,373	0,114	0,173
Hexabrombenzol	0,995	1,06	18,4	12,1	0,543
anti-Cl10-Dechloran Plus	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
syn-Dechloran Plus	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,075
anti-Cl11-Dechloran Plus	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	<0,002 c)
anti-Dechloran Plus	<0,238 a)	n.n.	n.n.	n.n.	0,299
Decabromdiphenylethan	0,969	2,52	1,70	0,954	8,15

a) Messwert < 2 FBW, Bestimmungsgrenze = 2 FBW; b) Messwert < 2 LBW, Bestimmungsgrenze = 2 LBW;

c) Messwert < LOQ, LOQ (limit of quantification; Verfahrensbestimmungsgrenze)

7.3 Anhang PFAS Analytik

Tab. 16: Substanzspektrum für externe Analytik 2021 von Depositionsproben (TZW).

Abkürzung	IUPAC Name	CAS-Nr.	Bestimmungsgrenze in µg/L
4:2 FTSA	H4-Perfluorhexansulfonsäure	757124-72-4	0,001
6:2 FTSA	H4-Perfluoroktansulfonsäure	27619-97-2	0,001
8:2 FTSA	H4-Perfluordekansulfonsäure	39108-34-4	0,001
DONA	2,2,3-trifluoro-3-[1,1,2,2,3,3-hexafluoro-3-(trifluoromethoxy)propoxy]propanoic acid	919005-14-4	0,001
HFPO-DA (Gen-X)	Hexafluorpropylenoxid Dimersäure	13252-13-6	0,01
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	0,001
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure	375-73-5	0,0005
PFDA	Perfluordekansäure	335-76-2	0,001
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3	0,001
PFDoA	Perfluordodekansäure	307-55-1	0,001
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	0,0005
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8	0,0005
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	0,0005
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4	0,0005
PFNA	Perfluornonansäure	375-95-1	0,0005
PFNS	Perfluornonansulfonsäure	68259-12-1	0,001
PFOA	Perfluoroktansäure	335-67-1	0,0005
PFOS	Perfluoroktansulfonsäure	1763-23-1	0,0005
PFOSA	Perfluoroktansulfonamid	754-91-6	0,001
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	0,0005
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure	2706-91-4	0,0005
PFUnA	Perfluorundecansäure	4234-23-5	0,001
TFA	Trifluoressigsäure		0,025

Tab. 17: Substanzspektrum für externe Analytik 2022 von Depositionsproben (TZW). Bestimmungsgrenze 1 ng/L.

Abkürzung	CAS	Abkürzung	CAS
PFBA	375-22-4	10:2 FTS	120226-60-0
PFPeA	2706-90-3	FBSA	30334-69-1
PFHxA	307-24-4	FHxSA	41997-13-1
PFHpA	375-85-9	PFOSA	754-91-6
PFOA	335-67-1	N-MeFOSA	31506-32-8
PFNA	375-95-1	N-EtFOSA	4151-50-2
PFDA	335-76-2	N-MeFOSAA	2355-31-9
PFUdA	2058-94-8	N-EtFOSAA	2991-50-6
PFDoA	307-55-1	DONA	919005-14-4
PFBS	375-73-5	9CI-PF3ONS	756426-58-1
PFPeS	2706-91-4	11CI-PF3OUdS	763051-92-9
PFHxS	355-46-4	HFPO-DA	13252-13-6
PFHpS	375-92-8	PFMOPrA	377-73-1
PFOS	1763-23-1	DPOSA (Capstone A)	80475-32-7
PFNS	68259-12-1	6:2 FTAB (CDPOS, Capstone B)	34455-29-3
PFDS	335-77-3	P37DMOA	172155-07-6
PFDoS	79780-39-5	7HPFHPA	1546-95-8
4:2 FTS	757124-72-4	H2PFDA	27854-31-5
6:2 FTS	27619-97-2	H4PFUnA	27854-31-5
8:2 FTS	39108-34-4	8:2 FTUCA	70887-84-2

Tab. 18: Substanzspektrum für externe Analytik 2023 von Depositionsproben durch Analytik Institut Rietzler (AIR).

Abkürzung	CAS-Nr.	Bestimmungsgrenze in µg/L
PFBA	375-22-4	0,001
PFPeA	2706-90-3	0,0005
PFHxA	307-24-4	0,0005
PFHpA	375-85-9	0,0005
PFOA	335-67-1	0,0005
PFNA	375-95-1	0,0005
PFDA	335-76-2	0,0005
PFUnA	4234-23-5	0,0005
PFDaA	307-55-1	0,0005
HFPO-DA	13252-13-6	0,001
PFBS	375-73-5	0,0005
PFHxS	355-46-4	0,0005
PFOS	1763-23-1	0,0005
4:2 FTSA	757124-72-4	0,001
6:2 FTSA	27619-97-2	0,001
8:2 FTSA	39108-34-4	0,001
CDPOS (Capstone B)	34455-29-3	0,001
DPOSA (Capstone A)	80475-32-7	0,001
DONA	919005-14-4	0,001
TFA	76-05-1	0,12
PFMOPrA	377-73-1	0,001
5:3 FTCA	914637-49-3	0,001
FBSA	30334-69-1	0,0005

Tab. 19: Überprüfung einzelner Materialien, die bei der Depositionsprobenahme verwendet werden.

LIMS-TeilProbennr.	Barcode	Systembeschreibung	Ergebnis
21LFU-A0896-001-01	1398447	- System mit Handschuhen mit Reinstwasser in Flasche Typ A	Nichts gefunden
21LFU-A0896-002-01	1398449	- System mit Handschuhen mit Reinstwasser in Flasche Typ B	Nichts gefunden
21LFU-A0896-003-01	1398451	- System ohne Handschuhe mit Reinstwasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-004-01	1398453	- System mit Handschuhen mit destilliertem Wasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-005-01	1398455	System mit Trichternetz	Nichts gefunden
		- mit Handschuhen mit Reinstwasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-006-01	1398457	System mit PP-Ball	Nichts gefunden
		- mit Handschuhen mit Reinstwasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-007-01	1398459	System mit gespültem Trichternetz	Nichts gefunden
		- mit Handschuhen mit Reinstwasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-008-01	1398461	System mit gespültem PP-Ball	Nichts gefunden
		- mit Handschuhen mit Reinstwasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-009-01	1398463	Klarsichtfolie abspülen	PFOA 0,0006 µg/L
21LFU-A0896-010-01	1398465	Handschuhe abspülen	Nichts gefunden
21LFU-A0896-011-01	1398467	System ohne Trichternetz/PP-Ball mit Handschuhen mit Reinstwasser und Silikonschlauch	Nichts gefunden
21LFU-A0896-012-01	1398469	System mit Methanol gereinigtem PP-Ball	Nichts gefunden
		- mit Handschuhen und mit Reinstwasser	Nichts gefunden
21LFU-A0896-013-01	1398471	System ohne Trichternetz/PP-Ball	Nichts gefunden
		- System mit Handschuhen mit Reinstwasser aus Kanister	Nichts gefunden

Tab. 20: Unterschiedliche Gehalte an PFAS in Teilen des Messsystems E-Bulk.

Substanzname (Abkürzung)	BW_PeKanister mWochen	BW_PeKanister	BW_Pe- HD02	BW_Schlauch	BW_Verbundungs- stueck	BW_Teflonnetz
Perfluorbutansäure (PFBA)	0,000025	<BG	n.b.	0,000074	0,000036	0,000090
Perfluorpentansäure (PFPeA)	nn	nn	nn	0,000034	nn	0,000076
Perfluorbutansulfon- säure (PFBS)	n.b.	<BG	n.b.	n.b.	n.b.	0,000019
Perfluorhexansäure (PFHxA)	0,000023	0,000025	0,000023	0,000042	0,000021	0,000040
Perfluorheptansäure (PFHpA)	nn	nn	nn	nn	nn	0,000063
Perfluorhexansulfon- säure (PFHxS)	n.b.	n.b.	n.b.	0,000241	n.b.	n.b.
Perfluorooctansäure (PFOA)	0,000119	0,000057	0,000086	0,000107	0,000059	0,000262
Perfluorononansäure (PFNA)	0,000075	0,000050	0,000037	0,000058	0,000056	0,000018
PFOSA 78	nn	nn	nn	nn	nn	nn
Perfluorooctansulfon- säure (PFOS)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,000388
Perfluordecansäure (PFDA)	nn	nn	0,000039	nn	nn	0,000033
Perfluorundecansäure (PFUdA)	nn	nn	nn	0,000030	nn	nn
Perfluordodecansäure (PFDoA)	nn	nn	0,000027	nn	nn	0,000016
4:2 Fluortelomersulfon- säure	0,000059	0,000086	0,000210	nn	nn	nn
6:2 Fluortelomersulfon- säure	<BG	0,000017	0,000025	0,000015	0,000045	0,000045
8:2 Fluortelomersulfon- säure	0,000103	0,000092	0,000155	0,000109	0,000088	0,000015
NADONA 85	<BG	<BG	n.b.	0,000012	0,000080	0,000025
Bestimmungsgrenze	0,000010	0,000010	0,000010	0,000010	0,000010	0,000010

7.3.1 Anhang Feldblindwerte PFAS

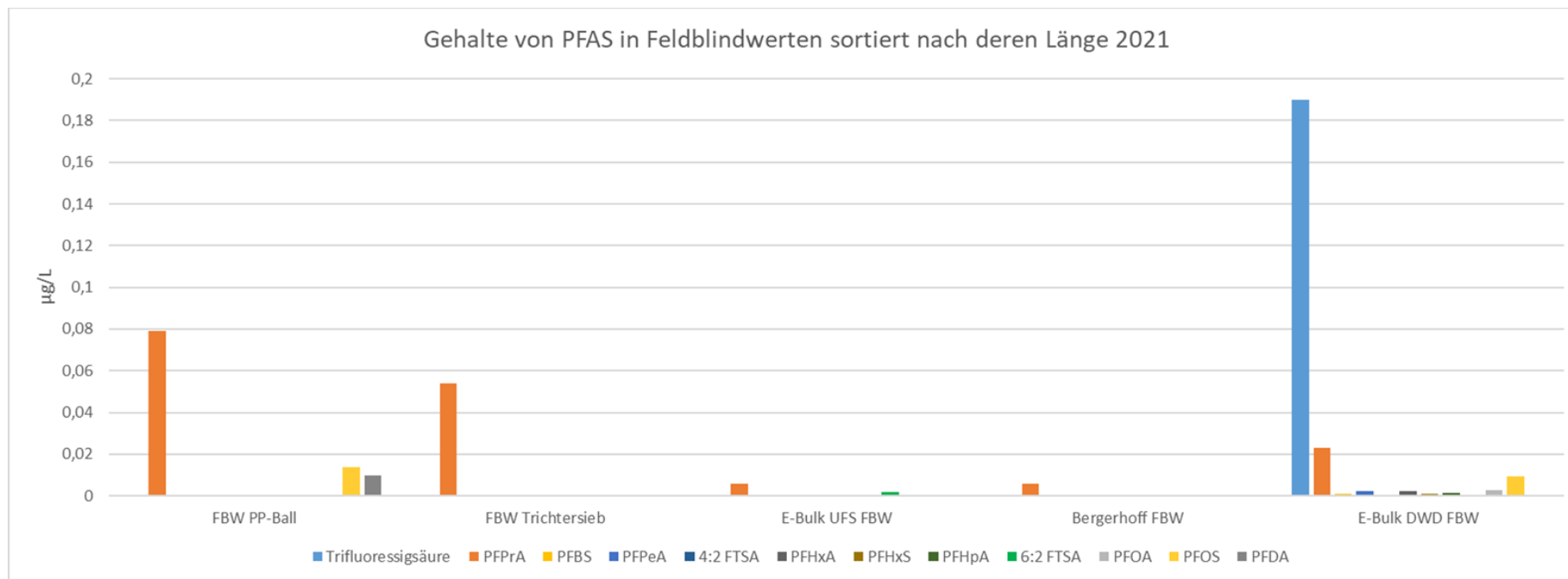


Abb. 52: Gehalte an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen in Feldblindwerten (FBW), die an den Standorten Eining (PP-Ball, Trichtersieb), Zugspitze (Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, UFS) und München Oberschleißheim (Deutscher Wetterdienst, DWD) in E-Bulksammlern genommen wurden. Außerdem wurde ein FBW im Bergerhoff-Becher in Eining genommen.

7.3.2 Anhang Vergleich Bergerhoff – E-Bulk

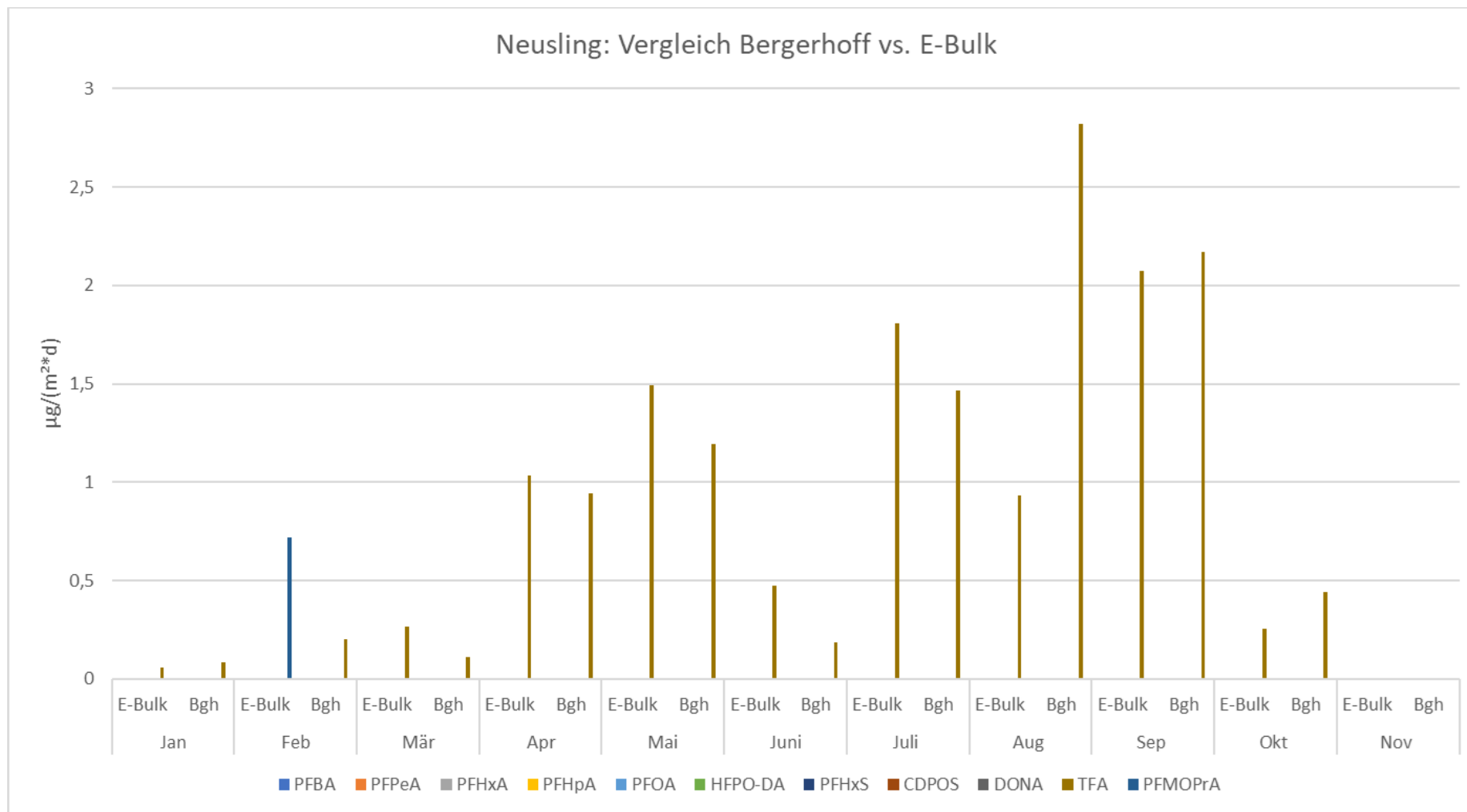


Abb. 53: Gehalt an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen in Depositionsproben genommen mittels E-Bulk oder Bergerhoff. Gezeigt sind die monatlichen Proben von 2023 am Standort Neusling inklusive Trifluoressigsäure (TFA).

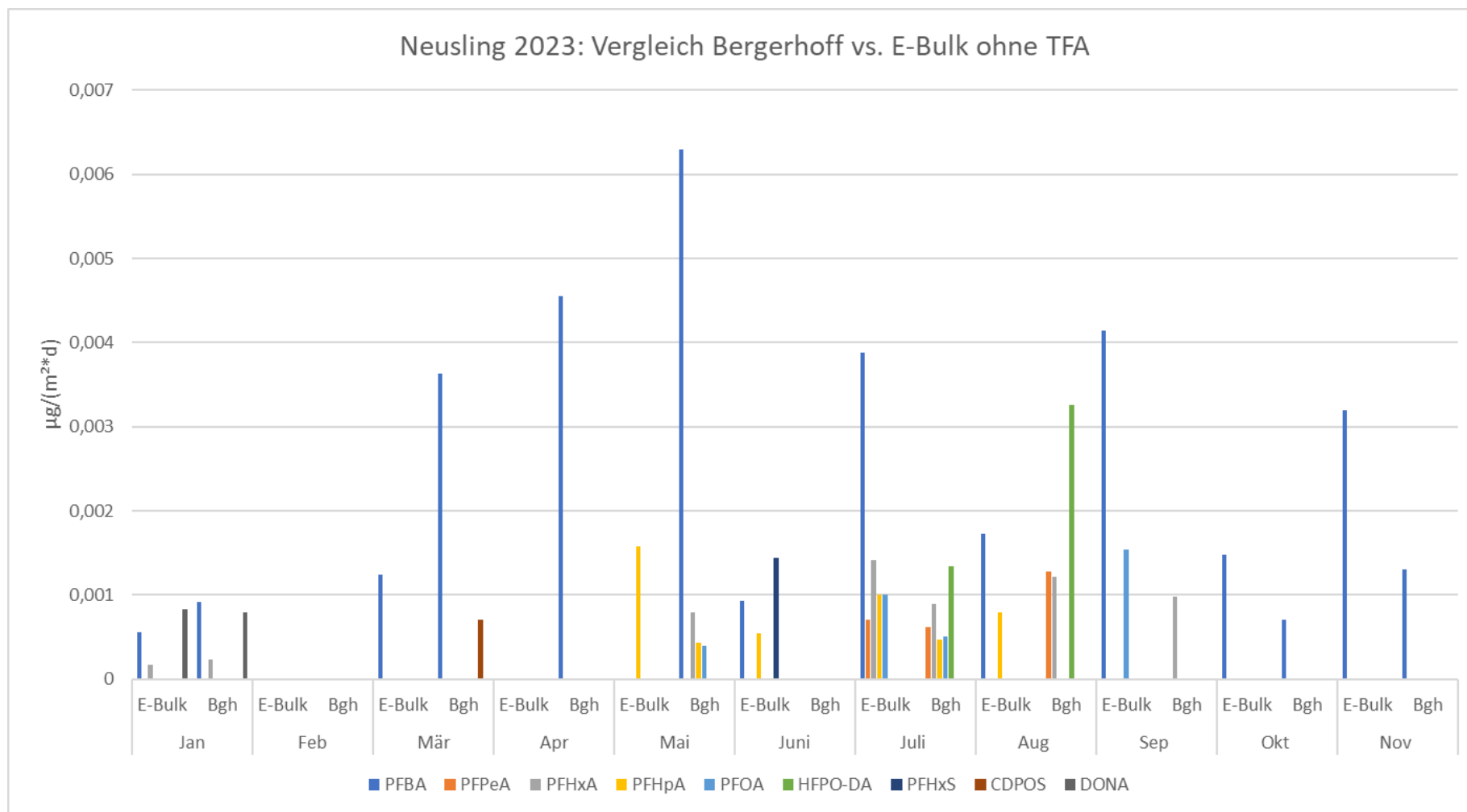


Abb. 54: Gehalt an per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Depositionsproben genommen mittels E-Bulk oder Bergerhoff. Gezeigt sind die monatlichen Proben von 2023 am Standort Neusling. Die Gehalte an inklusive Trifluoressigsäure (TFA) werden nicht dargestellt. In der Probe von Februar 2023 wurde ein Wert als Ausreißer klassifiziert und ebenfalls ausgeschlossen (PFMOPra = 0,719553811 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$).

7.4 Anhang Messpunkte Lech-Stahlwerke

Messpunkt LSW_Zoll - Zollsiedlung

Höhe ü NN	438 m
UTM-Ostwert	635978
UTM-Nordwert	5374421
Gemeinde	Biberbach, Gmkg. Eisenbrechtshofen
Bestückung	5 Intervalle 2 kleine Graskulturen 5 Intervalle 6 große Graskulturen (Organik) 1 Intervall 4 Grünkohl (Organik)
Analysen	PCB, PAK, PCDD/F, Metalle

Standortbeschreibung:

Der Messpunkt liegt am östlichen Ortsrand von Zollsiedlung, einem Ortsteil von Biberbach an einem Feldweg den ein schmaler Bach begleitet. Der Standort befindet sich ca. 1.100 m Luftlinie (LL) südwestlich der Lech-Stahlwerke und ca. 200 m LL westlich der vierspurig ausgebauten B2, die hinter einer Lärmschutzwand verläuft. Die umgebende Bewirtschaftung ist Ackernutzung.

Luftbildausschnitt (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Ausschnitt topographische Karte (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Messpunkt-Einrichtung



Abb. 55: Exposition der Graskulturen am Messpunkt Zollsiedlung. Quelle: LfU.

Messpunkt LSW_Her – Herbertshofen

Höhe ü NN	436 m
UTM-Ostwert	636810
UTM-Nordwert	5376040
Gemeinde	Meitingen/Herbertshofen
Bestückung	5 Intervalle 2 kleine Graskulturen 5 Intervalle 6 große Graskulturen (Organik) 1 Intervall 4 Grünkohl (Organik)
Analysen	PCB, PAK, PCDD/F, Metalle

Standortbeschreibung:

Der Messpunkt liegt am südlichen Ortsrand von Herbertshofen, einem Ortsteil von Meitingen, auf einem Grundstück der Gemeinde nordwestlich des Feuerwehrhauses. Der Großteil der Fläche wird durch einen Landwirt genutzt (Mahd, Gülleausbringung, Abstellplatz für landwirtschaftliche Fahrzeuge). Der Standort befindet sich ca. 1.250 m LL nördlich der Lech-Stahlwerke.

Luftbildausschnitt (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Ausschnitt topographische Karte Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de,
Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020:



Messpunkt-Einrichtung:



Abb. 56: Exposition der Graskulturen am Messpunkt Herbertshofen. Quelle: LfU.

Messpunkt LSW_Kan – Lechkanal

Höhe ü NN	440 m
UTM-Ostwert	637735
UTM-Nordwert	5373744
Gemeinde	Langweid am Lech
Bestückung	5 Intervalle 2 kleine Graskulturen 5 Intervalle 6 große Graskulturen (Organik) 1 Intervall 4 Grünkohl (Organik)
Analysen	PCB, PAK, PCDD/F, Metalle

Standortbeschreibung:

Der Messpunkt liegt nordöstlich von Langweid am Lech, ca. 100 m nördlich der gemeindlichen Kläranlage direkt an einem, den Lechkanal begleitenden Weg.

Der Standort befindet sich ca. 1.300m LL südöstlich der Lech-Stahlwerke. Die umgebende Nutzung 2021 ist eine Pferdekoppel im Westen.

Luftbildausschnitt (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Ausschnitt topographische Karte (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de,
Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Messpunkt-Einrichtung:



Abb. 57: Exposition der Graskulturen am Messpunkt Lechkanal. Quelle: LfU..

Messpunkt LSW_NSG – Naturschutzgebiet

Höhe ü NN	436 m
UTM-Ostwert	638482
UTM-Nordwert	5375145
Gemeinde	Aindling
Bestückung	5 Intervalle 2 kleine Graskulturen 5 Intervalle 6 große Graskulturen (Organik) 1 Intervall 4 Grünkohl (Organik)
Analysen	PCB, PAK, PCDD/F, Metalle

Standortbeschreibung:

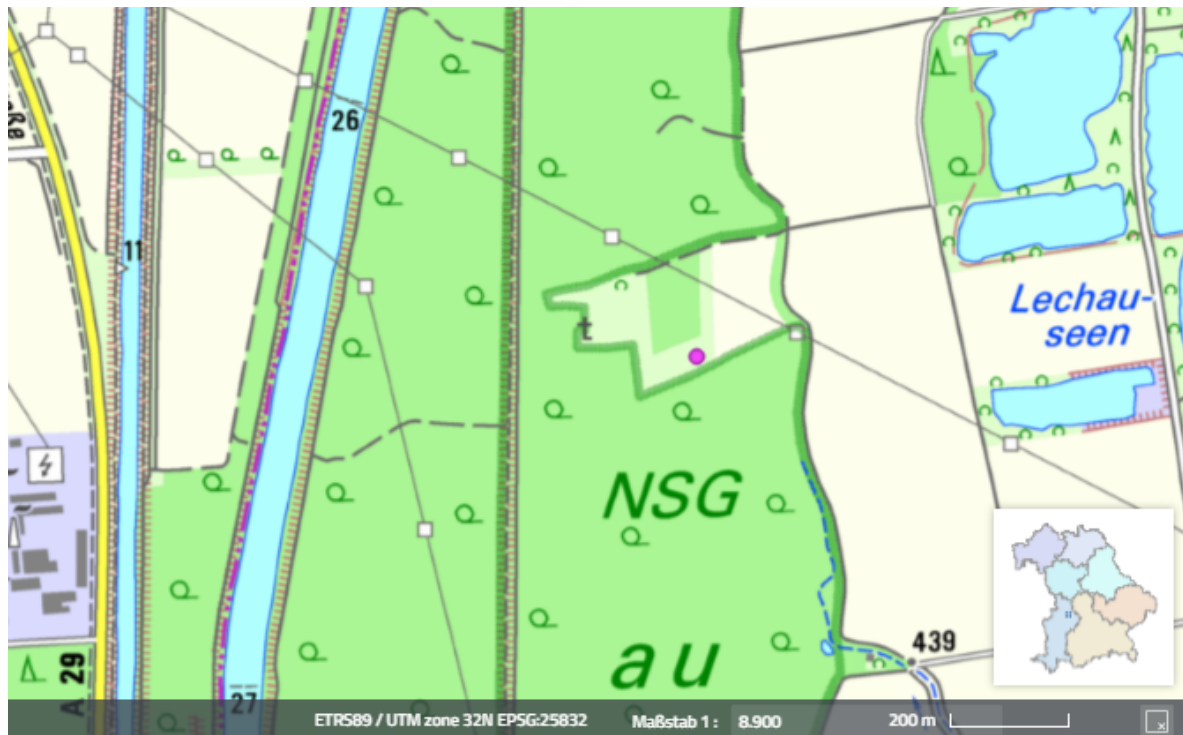
Der Messpunkt liegt auf einer extensiv bewirtschafteten Grünlandfläche in einer Lichtung des Lechwaldes östlich des Lechs ca. 600 m LL westlich der Lechauseen. Die Lech-Stahlwerke befinden sich auf der westlichen Seite des Lechs LL ca. 1.100 m entfernt.

Nutzung 2021 extensive Grünlandnutzung.

Luftbildausschnitt (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Ausschnitt topographische Karte (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Messpunkt-Einrichtung:



Abb. 58: Exposition der Graskulturen am Messpunkt Naturschutzgebiet. Quelle: LfU..

Messpunkt LSW_Ref – Referenzmesspunkt

Höhe ü NN	455 m
UTM-Ostwert	635325
UTM-Nordwert	5370918
Gemeinde	Langweid am Lech, Grüngutsammelstelle Achsheim
Bestückung	5 Intervalle 2 kleine Graskulturen 5 Intervalle 6 große Graskulturen (Organik) 1 Intervall 4 Grünkohl (Organik)
Analysen	PCB, PAK, PCDD/F, Metalle

Standortbeschreibung:

Der Messpunkt befindet sich ca. 1.500 m LL südöstlich von Achsheim inmitten intensiv landwirtschaftlich genützter Flächen auf dem Areal der Grüngutannahmestelle der Gemeinde. Der Bereich ist mit einem ca. zwei m hohen Zaun eingefriedet und mit einem Tor verschlossen. Die Entfernung zu den im Nordosten liegenden Lech-Stahlwerken beträgt LL ca. 4.300 m.

Luftbildausschnitt (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Ausschnitt topographische Karte (Bayerische Vermessungsverwaltung – www.geodaten.bayern.de, Lizenz: CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>, 2020):



Messpunkt-Einrichtung:



Abb. 59: Exposition der Graskulturen am Referenzmesspunkt. Quelle: LfU.

7.5 Anhang Metalle in Graskultur

Tab. 21: Elemente in Graskultur: Messwerte 2021 / 2022 je Standort und Kampagne in [mg/kg TS]; kursiv: Messwert unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (BG) mit Angabe BG; rot: Überschreitung des OmH

Kampagne	Element	LSW_Her	LSW_Kan	LSW_NSG	LSW_Ref	LSW_Zoll	Element	LSW_Her	LSW_Kan	LSW_NSG	LSW_Ref	LSW_Zoll
25.05.2021	Al	35	15	17	43	13	La	0,025	0,009	0,012	0,038	0,007
22.06.2021		44	36	30	47	52		0,025	0,024	0,020	0,029	0,032
20.07.2021		37	43	23	34	38		0,026	0,030	0,015	0,023	0,025
17.08.2021		28	23	36	29	20		0,018	0,020	0,022	0,024	0,016
14.09.2021		37	32	31	38	25		0,030	0,020	0,015	0,023	0,015
24.05.2022		46	40	43	50	46		0,027	0,025	0,027	0,035	0,029
21.06.2022		42	32	21	43	32		0,029	0,021	0,016	0,033	0,025
19.07.2022		25	35	34	146	60		0,018	0,025	0,020	0,138	0,051
16.08.2022	As	28	37	29	52	42	Mn	0,022	0,030	0,029	0,067	0,037
13.09.2022		20	21	15	37	21		0,012	0,012	0,008	0,023	0,016
25.05.2021		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		43	63	36	44	33
22.06.2021		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		18	18	14	13	17
20.07.2021		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		15	22	16	19	22
17.08.2021		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		34	25	30	25	23
14.09.2021		0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		30	20	18	18	35
24.05.2022		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		95	105	121	106	93
21.06.2022	Ba	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	Nb	54	49	44	40	43
19.07.2022		0,12	0,16	0,19	0,16	0,13		59	60	72	52	55
16.08.2022		0,11	0,10	0,12	0,12	0,15		45	50	50	49	61
13.09.2022		0,15	0,14	0,12	0,14	0,13		65	60	60	62	57
25.05.2021		4,1	3,5	3,5	4,2	3,1		0,034	0,007	0,025	0,005	0,003
22.06.2021		3,6	3,7	3,2	4,0	4,0		0,019	0,021	0,010	0,010	0,024
20.07.2021		5,9	6,2	5,7	6,8	7,2		0,018	0,052	0,008	0,017	0,030
17.08.2021		6,5	7,4	6,2	8,6	8,4		0,039	0,023	0,013	0,005	0,009
14.09.2021	Bi	6,3	5,4	6,2	5,6	4,9	Ni	0,066	0,028	0,018	0,007	0,021
24.05.2022		5,7	5,7	6,0	6,0	6,9		0,042	0,022	0,013	0,011	0,018
21.06.2022		6,7	6,7	6,4	8,3	5,7		0,064	0,030	0,013	0,007	0,016
19.07.2022		9,6	8,7	12,1	10,6	8,9		0,017	0,044	0,017	0,022	0,033
16.08.2022		9,5	9,4	9,9	5,9	8,9		0,010	0,012	0,007	0,010	0,026
13.09.2022		5,5	7,4	5,9	7,0	6,4		0,028	0,007	0,008	0,006	0,007
25.05.2021		0,0060	0,0049	0,0058	0,0083	0,0044		2,6	3,1	2,4	2,4	2,8
22.06.2021		0,0033	0,0029	0,0021	<0,002	0,0035		1,9	2,7	2,2	2,5	2,2
20.07.2021	Cd	0,0038	0,0084	0,0032	0,0031	0,0039	Pb	1,7	1,8	1,7	1,9	1,9
17.08.2021		0,0040	0,0038	0,0044	0,0037	0,0032		2,8	3,4	3,2	2,7	3,3
14.09.2021		0,0077	0,0063	0,0042	0,0029	0,0060		3,6	4,4	3,8	3,7	3,2
24.05.2022		0,0042	0,0045	0,0050	0,0039	0,0085		2,5	1,9	3,0	2,4	2,0
21.06.2022		0,0042	0,0044	0,0034	0,0026	0,0022		1,7	1,8	1,8	1,9	2,1
19.07.2022		0,0032	0,0056	0,0032	0,0040	0,0044		3,0	3,0	4,5	3,4	2,9
16.08.2022		0,0030	0,0038	0,0025	0,0025	0,0061		2,6	2,6	2,8	3,1	3,2
13.09.2022		0,0051	0,0053	0,0033	0,0037	0,0048		2,8	2,3	2,5	2,6	2,4
25.05.2021	Ce	0,020	0,020	0,023	0,020	0,020	Sb	<0,2	<0,2	0,29	<0,2	<0,2
22.06.2021		0,025	0,026	0,023	0,024	0,024		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
20.07.2021		0,019	0,021	0,021	0,023	0,024		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
17.08.2021		0,028	0,027	0,030	0,032	0,034		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
14.09.2021		0,031	0,031	0,029	0,024	0,022		0,20	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
24.05.2022		0,019	0,014	0,017	0,023	0,018		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
21.06.2022		0,018	0,017	0,019	0,039	0,015		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
19.07.2022		0,026	0,038	0,029	0,025	0,026		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
16.08.2022	Sb	0,020	0,024	0,025	0,029	0,031		<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,23
13.09.2022		0,029	0,027	0,027	0,029	0,029		0,68	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
25.05.2021		0,040	0,015	0,018	0,072	0,011		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
22.06.2021		0,047	0,044	0,038	0,056	0,059		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
20.07.2021	Sb	0,046	0,048	0,026	0,043	0,045		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
17.08.2021		0,029	0,035	0,042	0,044	0,030		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Kampagne	Element	LSW_Her	LSW_Kan	LSW_NSG	LSW_Ref	LSW_Zoll	Element	LSW_Her	LSW_Kan	LSW_NSG	LSW_Ref	LSW_Zoll
14.09.2021		0,049	0,034	0,028	0,045	0,025		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,073
24.05.2022		0,047	0,047	0,050	0,068	0,053		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
21.06.2022		0,048	0,036	0,030	0,061	0,042		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
19.07.2022		0,032	0,041	0,042	0,266	0,091		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
16.08.2022		0,042	0,056	0,055	0,118	0,067		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
13.09.2022		0,019	0,022	0,015	0,039	0,030		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
25.05.2021	Co	0,12	0,17	0,13	0,12	0,12	Sn	0,093	0,059	0,057	0,059	0,052
22.06.2021		0,06	0,09	0,06	0,07	0,07		0,027	0,033	0,022	0,023	0,048
20.07.2021		0,04	0,05	0,06	0,06	0,06		0,034	0,055	0,025	0,027	0,039
17.08.2021		0,06	0,07	0,07	0,07	0,08		0,039	0,040	0,028	0,036	0,025
14.09.2021		0,07	0,07	0,07	0,08	0,11		0,059	0,054	0,038	0,025	0,055
24.05.2022		0,48	0,48	0,58	0,55	0,43		0,034	0,035	0,023	0,036	0,036
21.06.2022		0,20	0,22	0,20	0,27	0,24		0,029	0,040	0,027	0,033	0,029
19.07.2022		0,29	0,27	0,33	0,35	0,26		0,055	0,054	0,038	0,045	0,064
16.08.2022		0,19	0,19	0,21	0,23	0,21		0,065	0,072	0,026	0,050	0,071
13.09.2022		0,32	0,31	0,36	0,30	0,30		0,035	0,060	0,023	0,030	0,043
25.05.2021	Cr-ges	0,60	0,22	0,55	0,18	0,09	Tl	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
22.06.2021		0,29	0,39	0,22	0,42	0,43		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
20.07.2021		0,38	0,85	0,18	0,27	0,42		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
17.08.2021		0,60	0,40	0,33	0,19	0,21		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
14.09.2021		1,15	0,65	0,38	0,30	0,50		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
24.05.2022		0,64	0,38	0,23	0,24	0,36		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
21.06.2022		0,91	0,57	0,28	0,23	0,33		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
19.07.2022		0,57	0,95	0,38	0,93	0,60		0,0060	<0,005	0,0051	0,0083	0,0056
16.08.2022		0,39	0,42	0,25	0,34	0,75		0,0055	0,0051	0,0052	<0,005	<0,005
13.09.2022		0,56	0,20	0,21	0,25	0,19		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
25.05.2021	Cu	4,0	5,7	3,9	4,8	4,2	V	0,11	0,04	0,08	0,08	0,03
22.06.2021		2,2	2,7	2,5	2,5	2,7		0,10	0,13	0,07	0,09	0,13
20.07.2021		2,1	2,6	2,6	2,6	2,5		0,09	0,22	0,06	0,10	0,14
17.08.2021		3,1	3,4	3,3	3,1	3,6		0,17	0,10	0,11	0,06	0,06
14.09.2021		4,3	4,8	4,4	4,4	3,7		0,31	0,14	0,11	0,09	0,13
24.05.2022		3,8	3,4	4,0	3,9	3,8		0,19	0,13	0,12	0,12	0,12
21.06.2022		2,3	2,4	2,3	2,3	2,3		0,25	0,17	0,09	0,11	0,13
19.07.2022		2,9	3,1	3,2	2,9	2,7		0,12	0,23	0,14	0,36	0,25
16.08.2022		2,5	2,6	2,6	2,6	3,2		0,10	0,13	0,09	0,14	0,19
13.09.2022		4,1	3,7	3,8	4,0	3,7		0,14	0,07	0,07	0,08	0,07
25.05.2021	Fe	103	76	103	88	62	Zn	46	30	36	30	35
22.06.2021		63	78	59	69	85		12	17	16	15	16
20.07.2021		58	111	47	66	80		19	22	26	24	23
17.08.2021		85	71	72	60	60		28	31	26	23	27
14.09.2021		152	112	91	90	80		35	37	39	27	31
24.05.2022		113	89	89	86	93		24	22	25	27	25
21.06.2022		116	91	53	70	73		18	20	19	18	18
19.07.2022		87	124	99	190	129		28	33	35	34	29
16.08.2022		69	81	65	90	133		24	24	25	23	32
13.09.2022		100	79	73	90	82		38	34	39	43	35
25.05.2021	Hg-ges.	<0,005	<0,005	0,0064	<0,005	0,0061						
22.06.2021		<0,005	0,0060	0,0052	0,0058	0,0051						
20.07.2021		<0,005	0,0065	<0,005	<0,005	0,0054						
17.08.2021		<0,005	<0,005	0,0054	0,0051	<0,005						
14.09.2021		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005						
24.05.2022		0,0058	0,0057	0,0066	0,0063	0,0067						
21.06.2022		<0,005	0,0056	<0,005	<0,005	<0,005						
19.07.2022		0,0065	0,0090	0,0083	0,0071	0,0077						
16.08.2022		0,0055	0,0062	0,0067	0,0055	0,0065						
13.09.2022		0,0066	0,0064	0,0065	0,0070	0,0068						

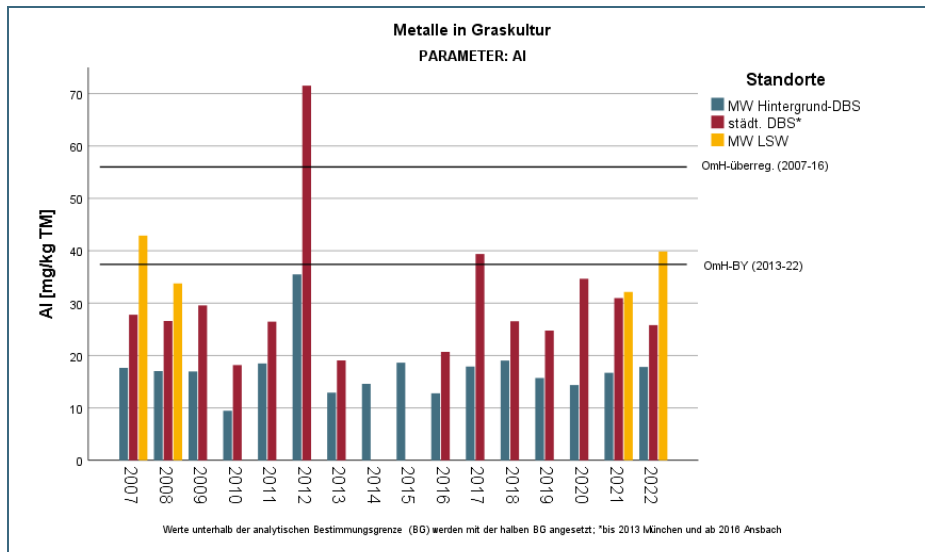


Abb. 60:
Aluminium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

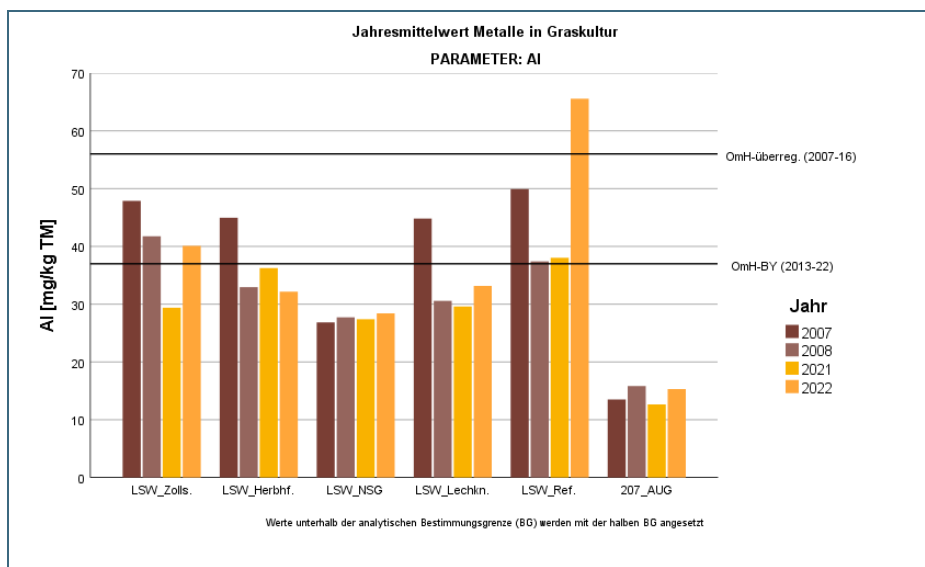


Abb. 61:
Aluminium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

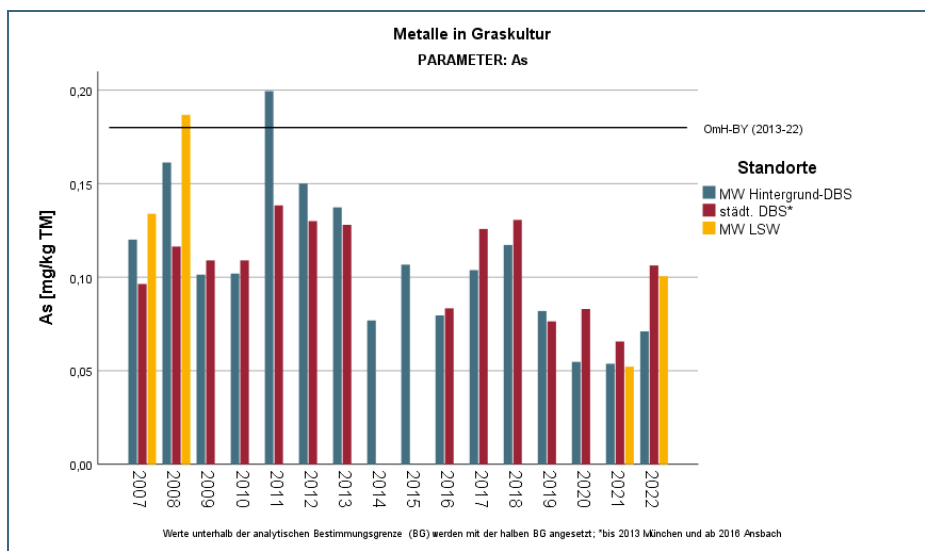


Abb. 62:
Arsen: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

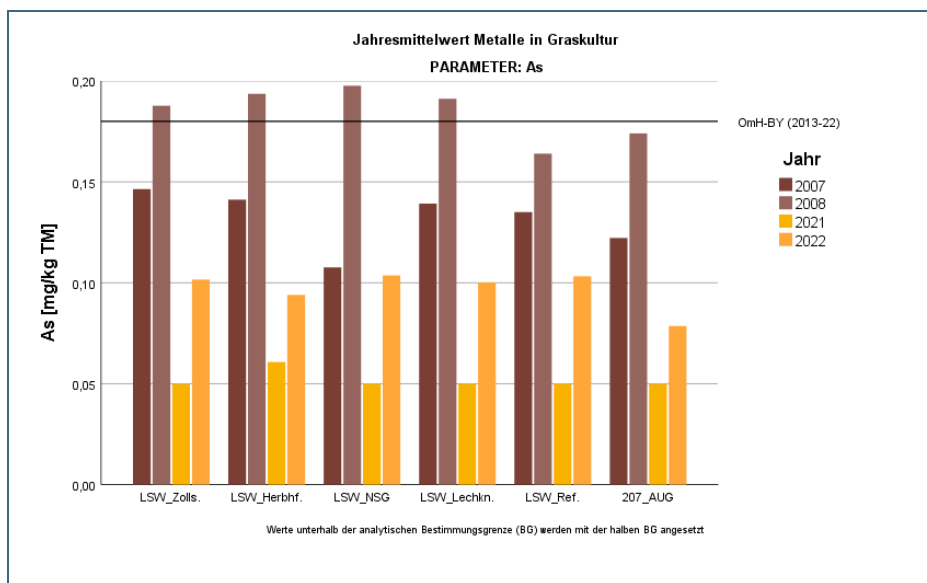


Abb. 63:
Arsen: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

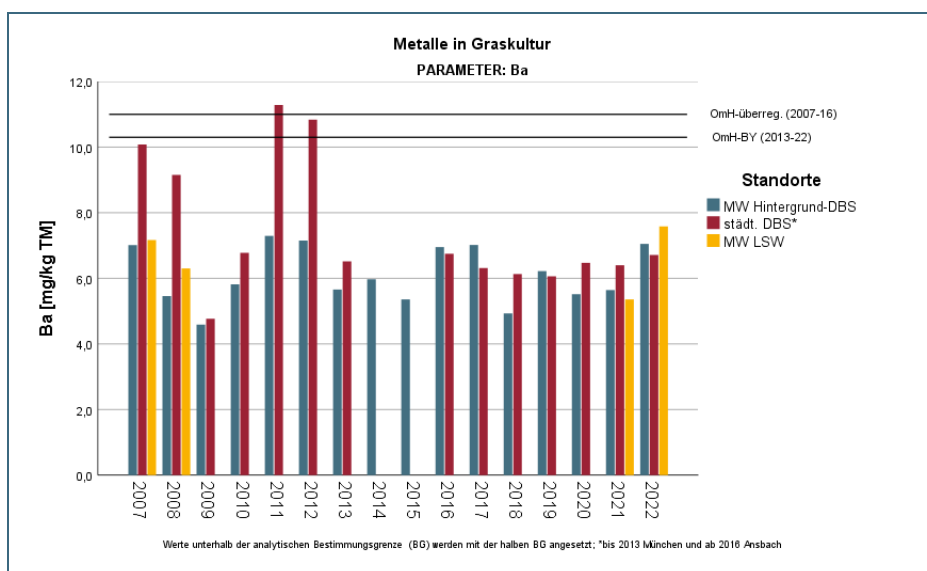


Abb. 64:
Barium: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

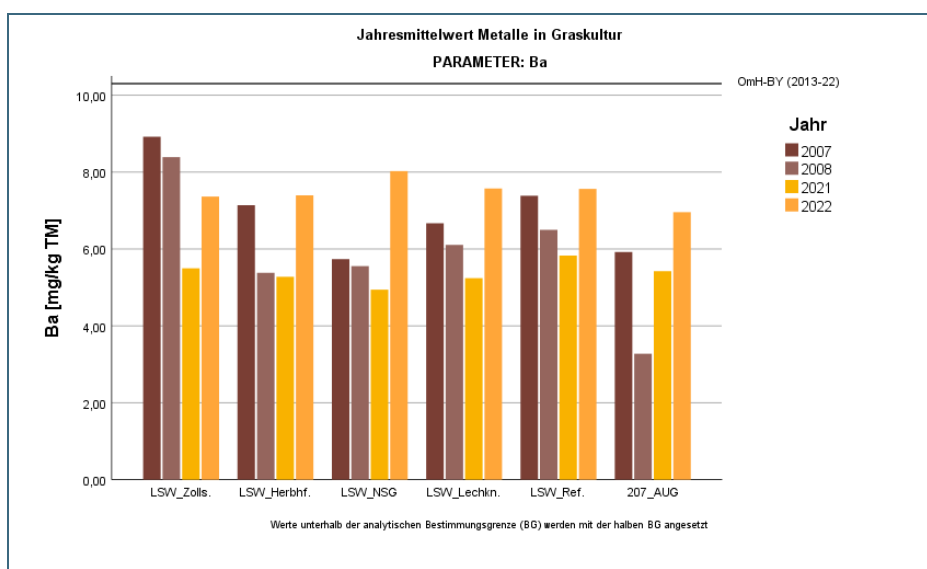


Abb. 65:
Barium: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

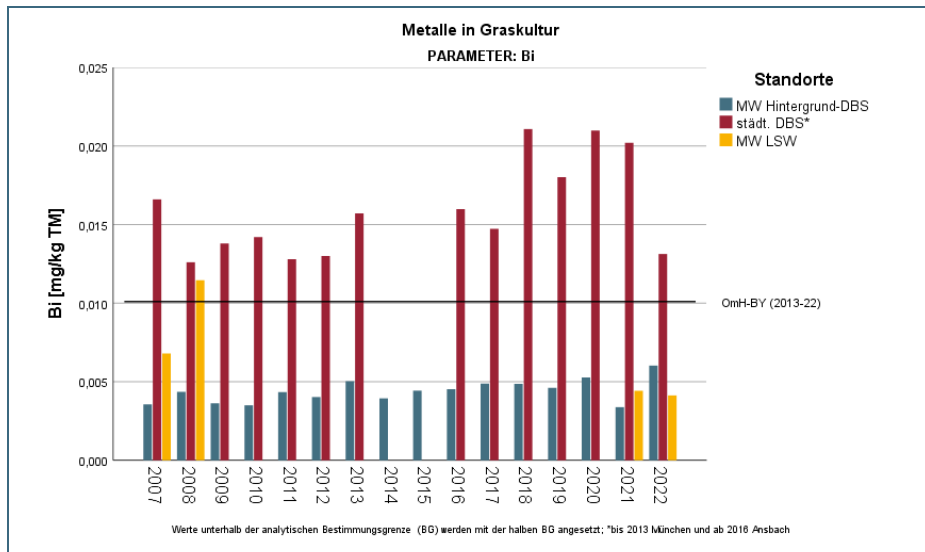


Abb. 66:
Bismut: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

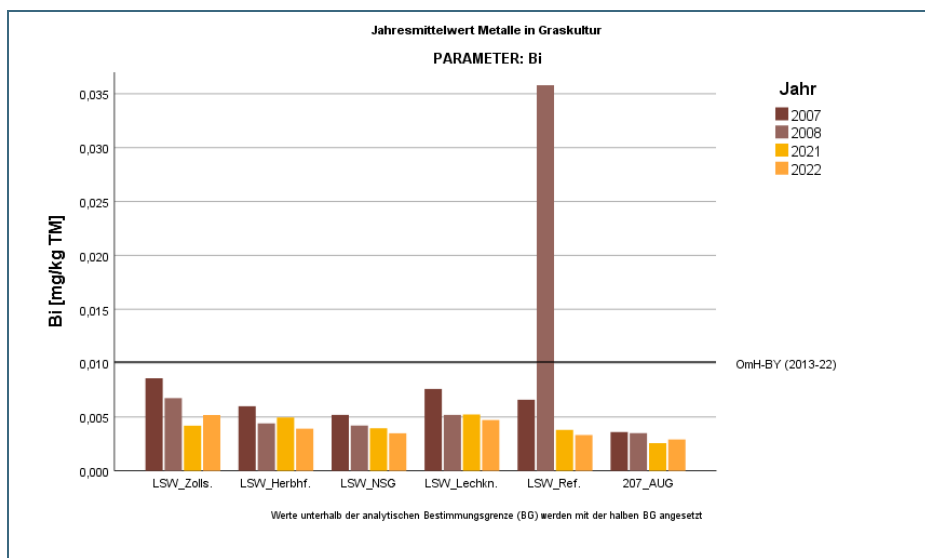


Abb. 67:
Bismut: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

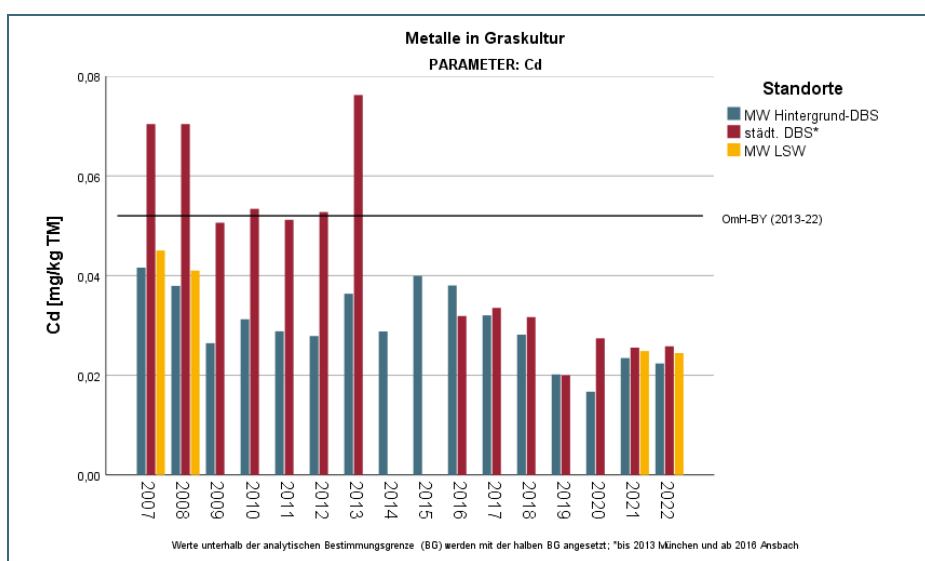


Abb. 68:
Cadmium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

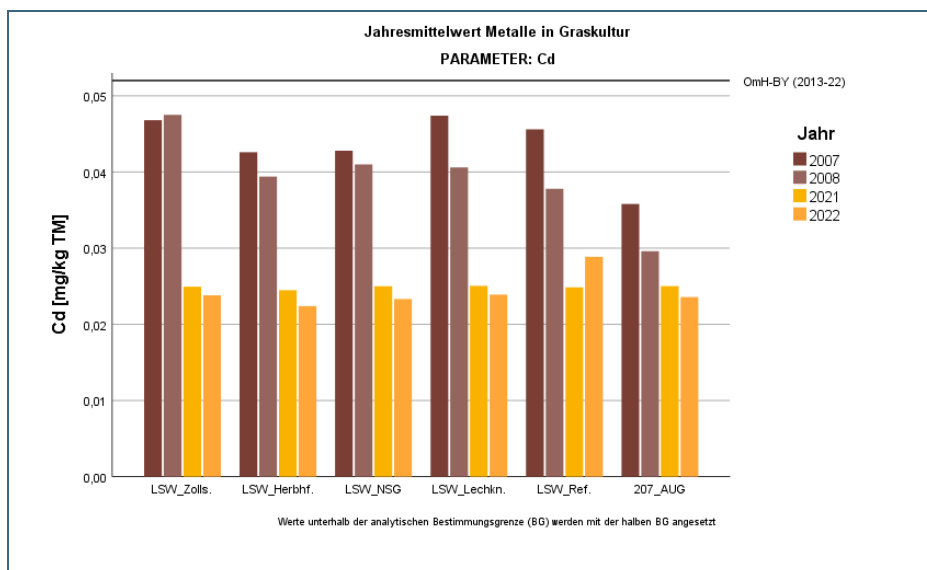


Abb. 69:
Cadmium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

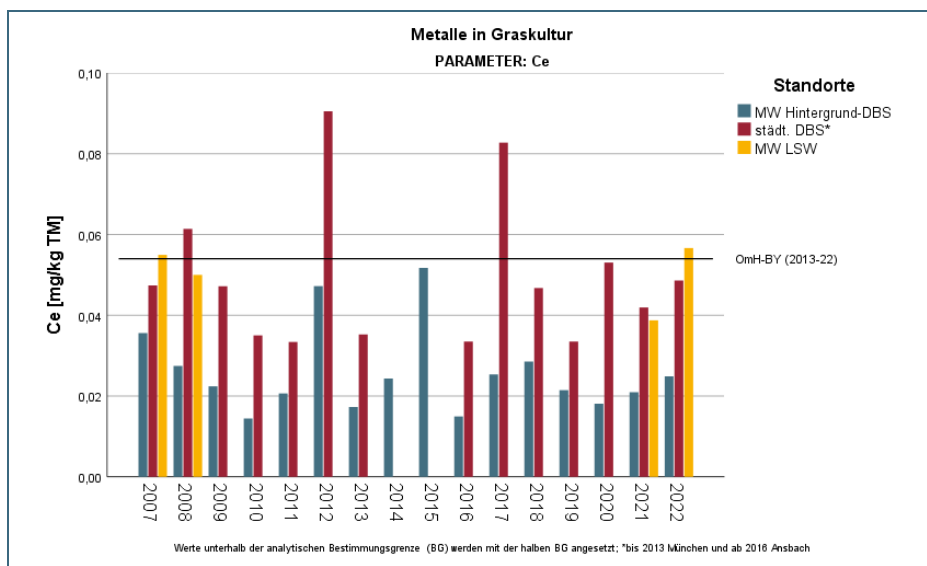


Abb. 70:
Cer: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

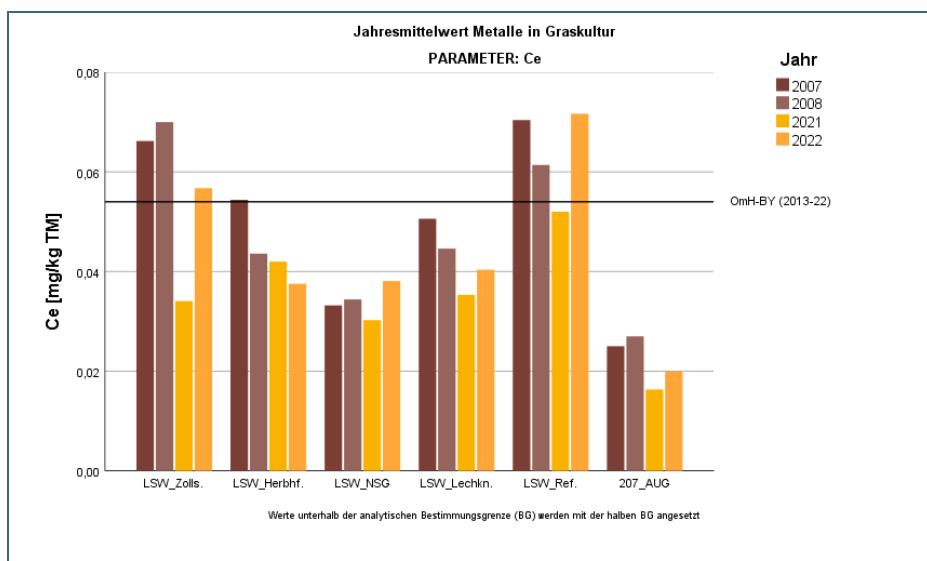


Abb. 71:
Cer: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

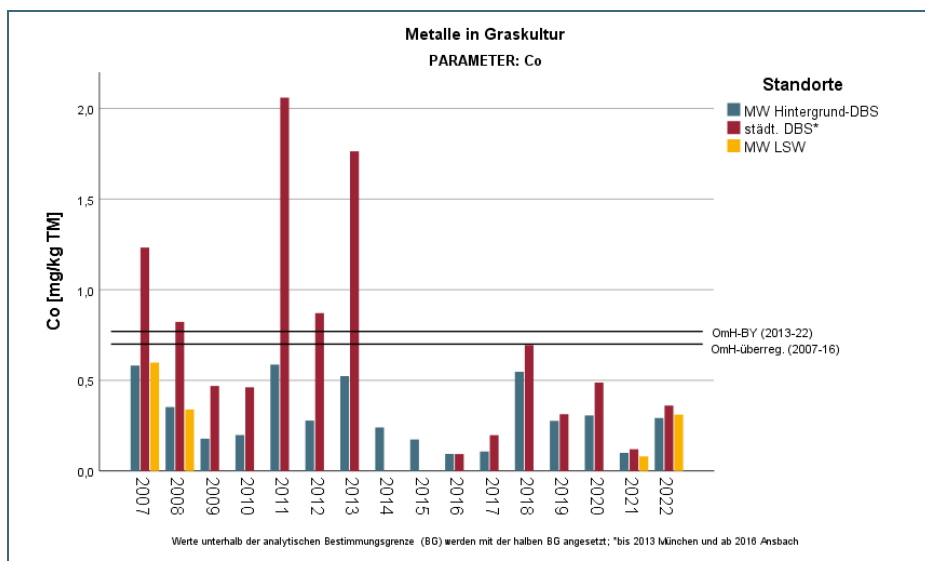


Abb. 72:
Kobalt: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

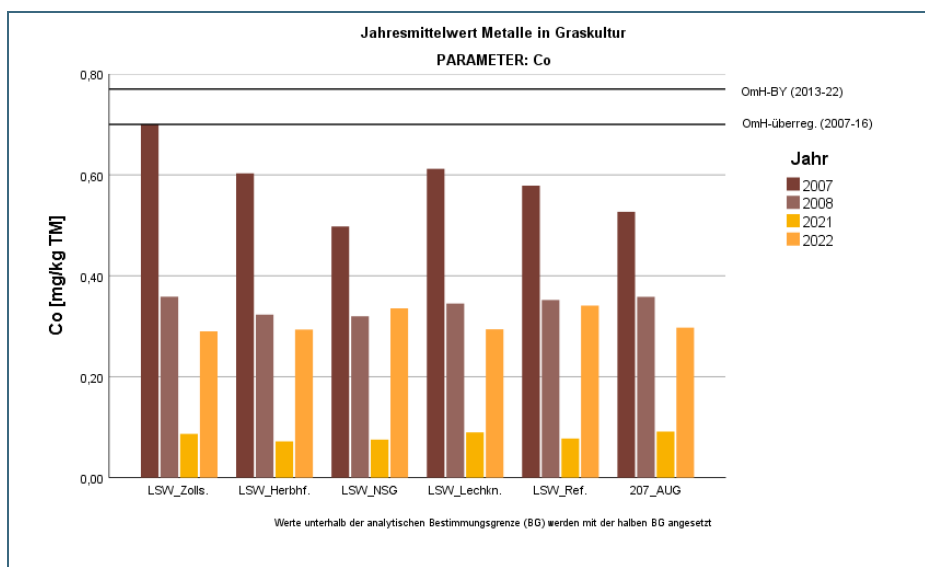


Abb. 73:
Kobalt: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

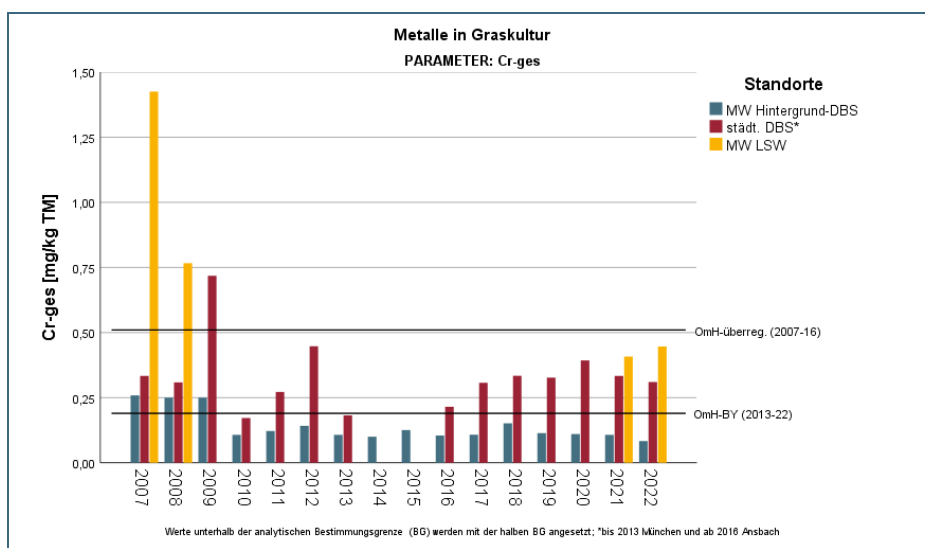


Abb. 74:
Chrom: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

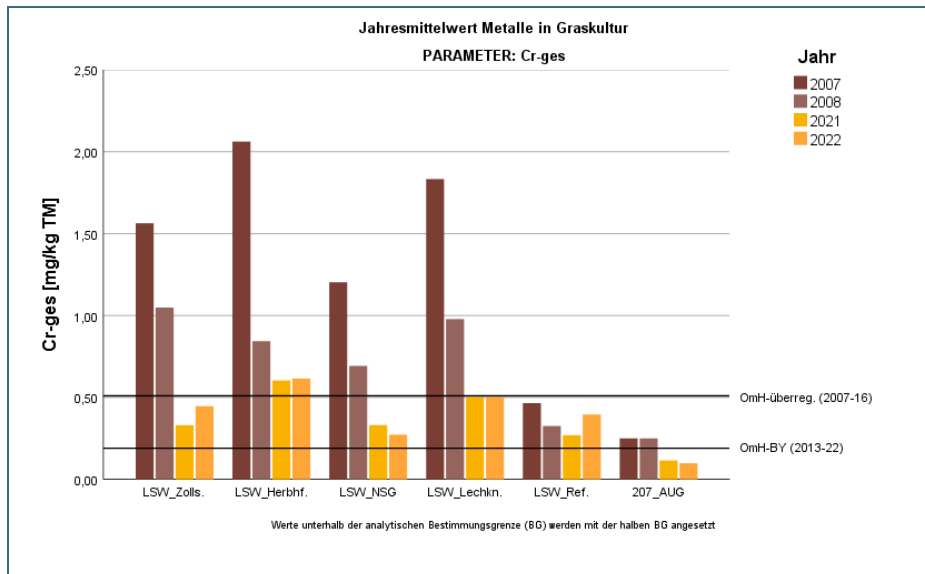


Abb. 75:
Chrom: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

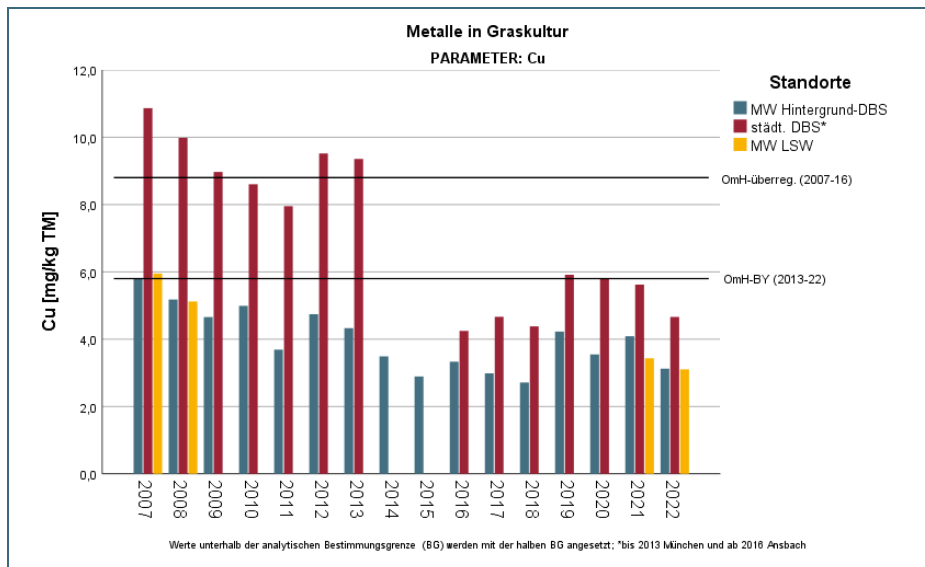


Abb. 76:
Kupfer: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

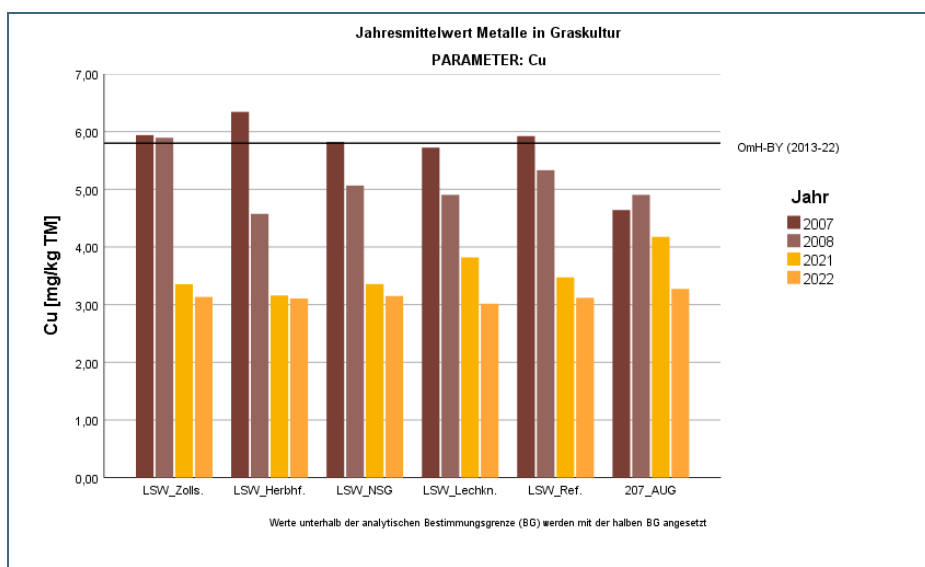


Abb. 77:
Kupfer: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

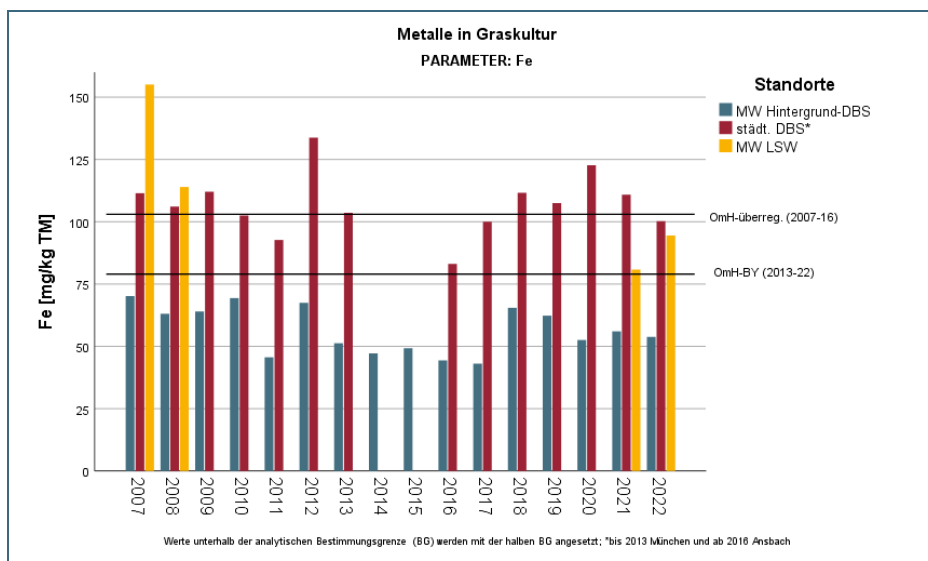


Abb. 78:
Eisen: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

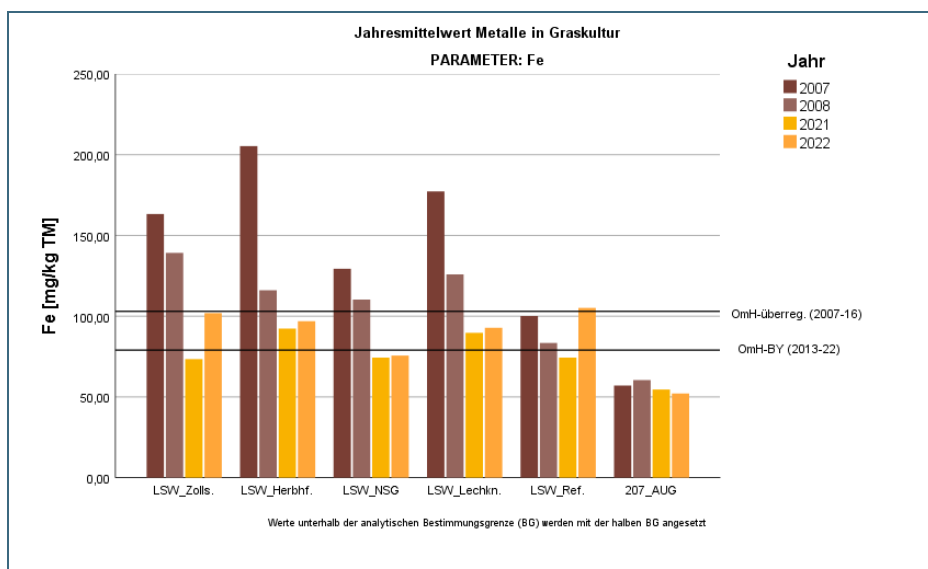


Abb. 79:
Eisen: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

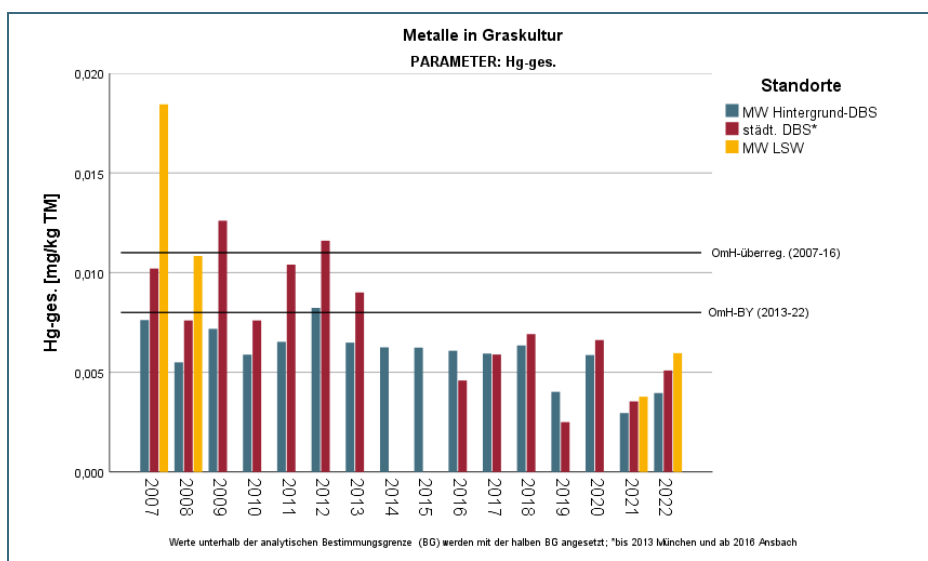


Abb. 80:
Quecksilber: Jahres-
mittelwerte an LSW,
Hintergrund- und städ-
tischer DBS

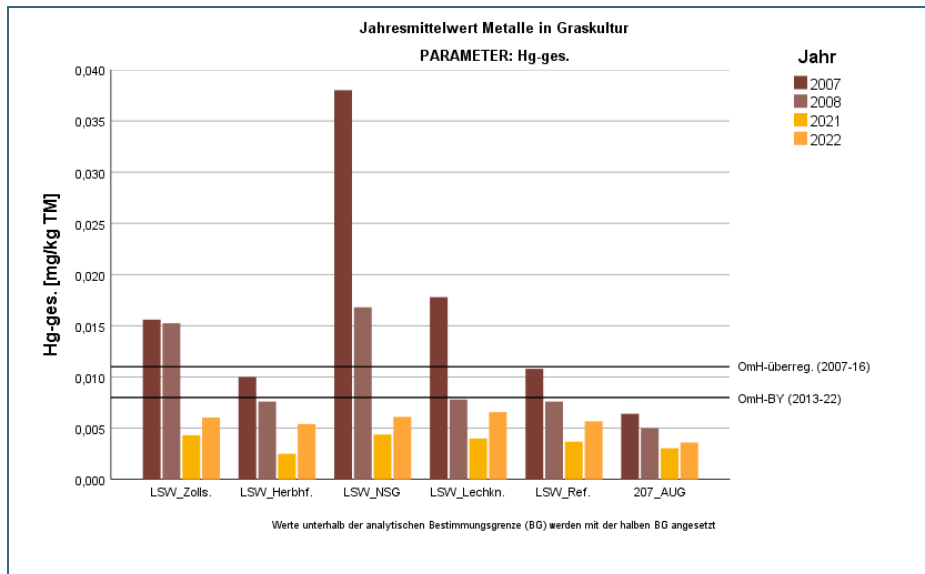


Abb. 81:
Quecksilber: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

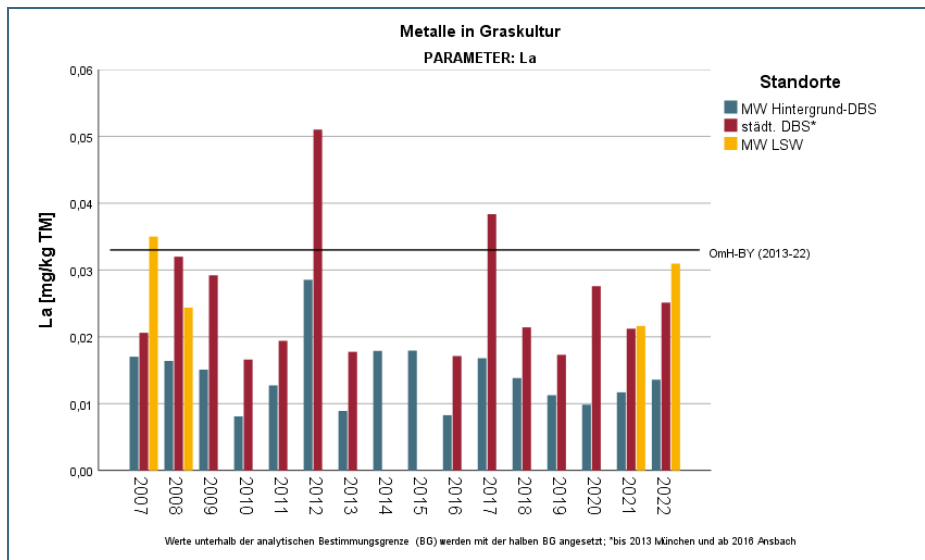


Abb. 82:
Lanthan: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

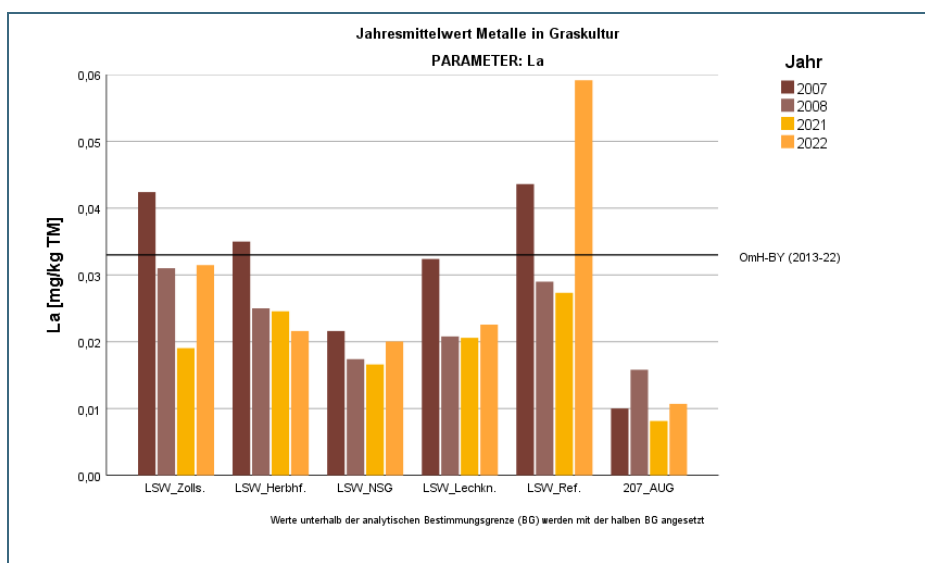


Abb. 83:
Lanthan: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

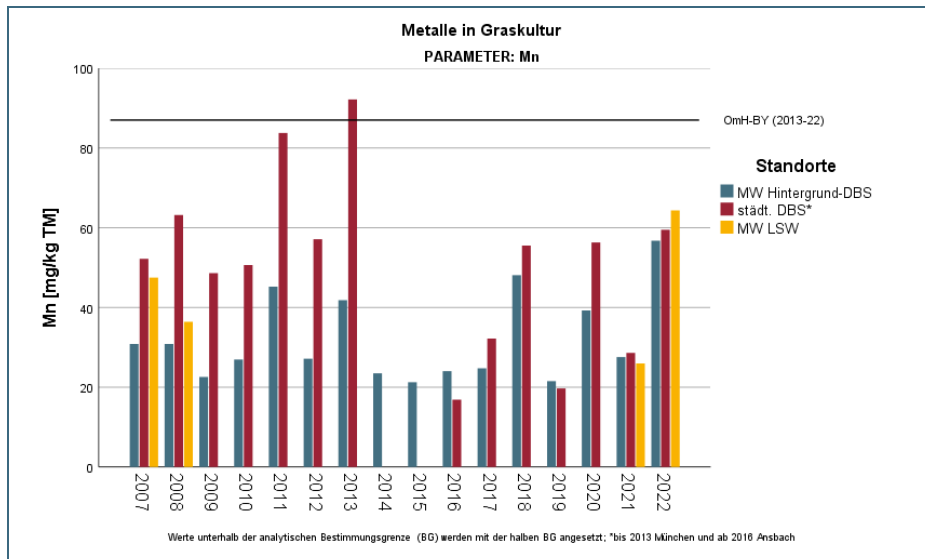


Abb. 84:
Mangan: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

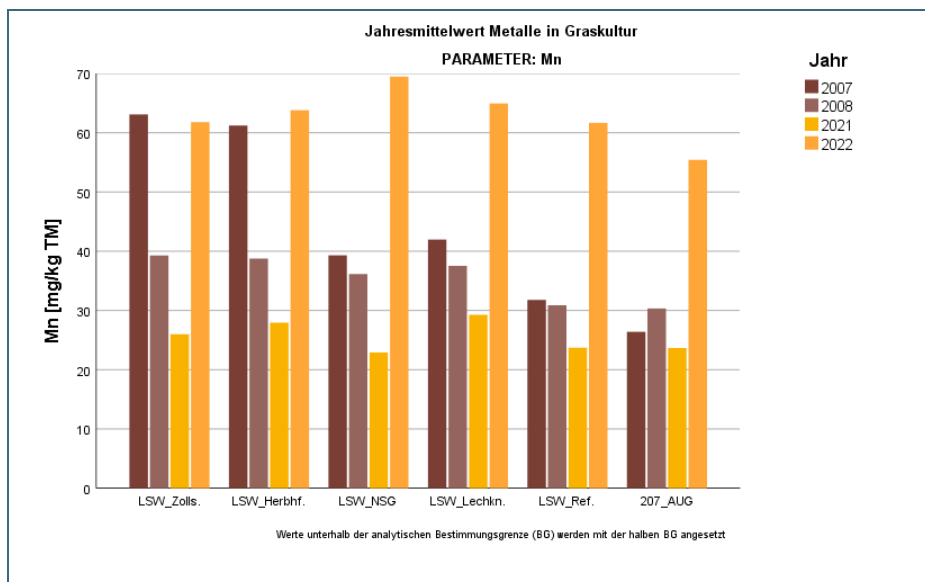


Abb. 85:
Mangan: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

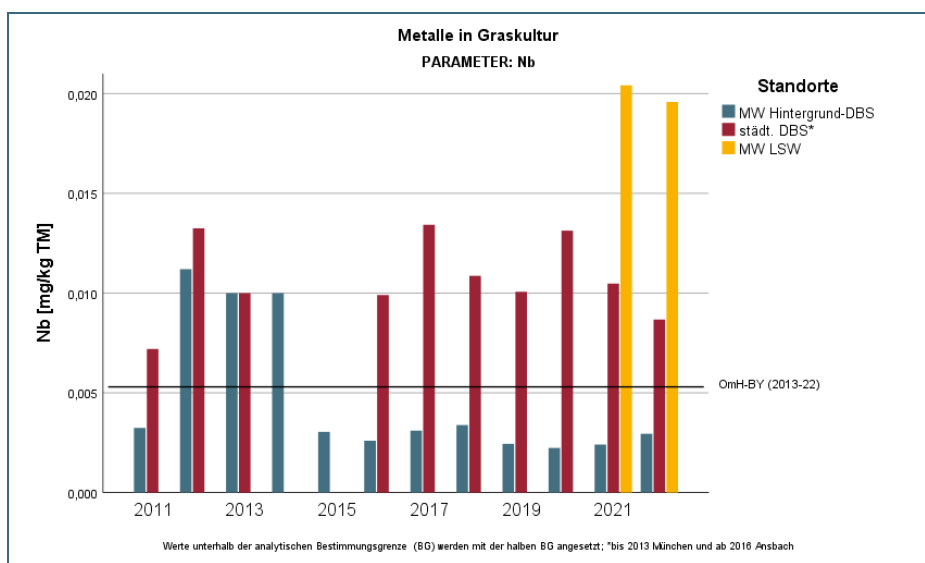


Abb. 86:
Niob: Jahresmittelwerte
an LSW, Hintergrund-
und städtischer DBS

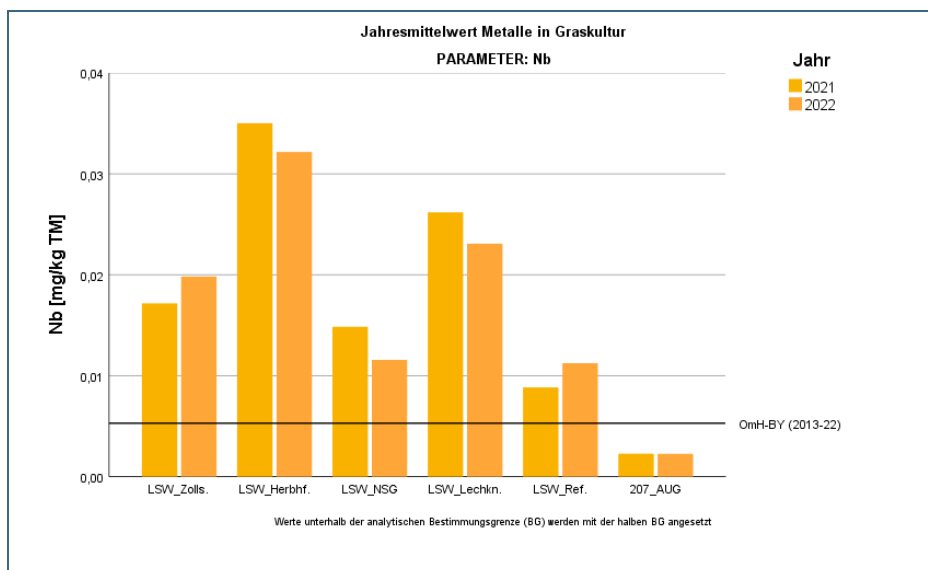


Abb. 87:
Niob: Jahresmittelwerte
an LSW und DBS
Augsburg

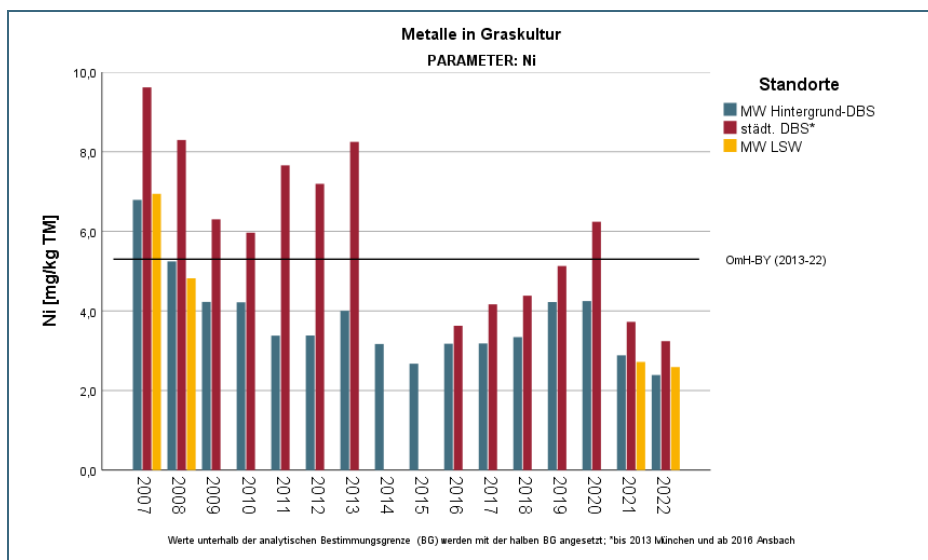


Abb. 88:
Nickel: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

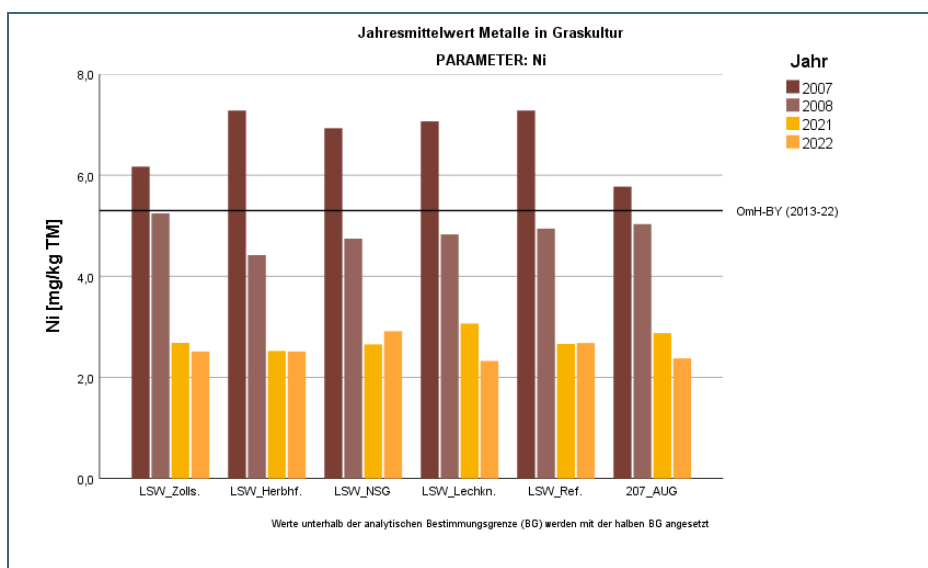


Abb. 89:
Nickel: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

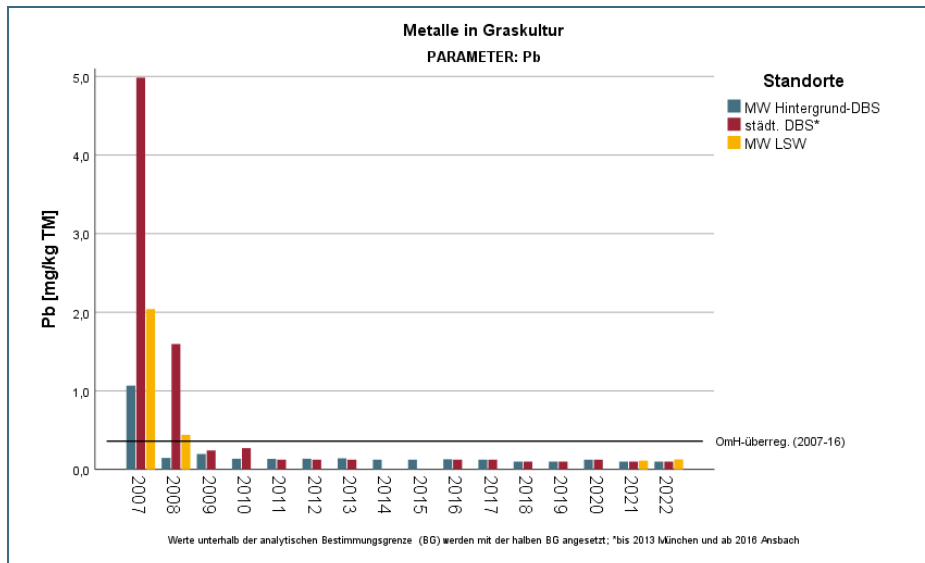


Abb. 90:
Blei: Jahresmittelwerte
an LSW, Hintergrund-
und städtischer DBS

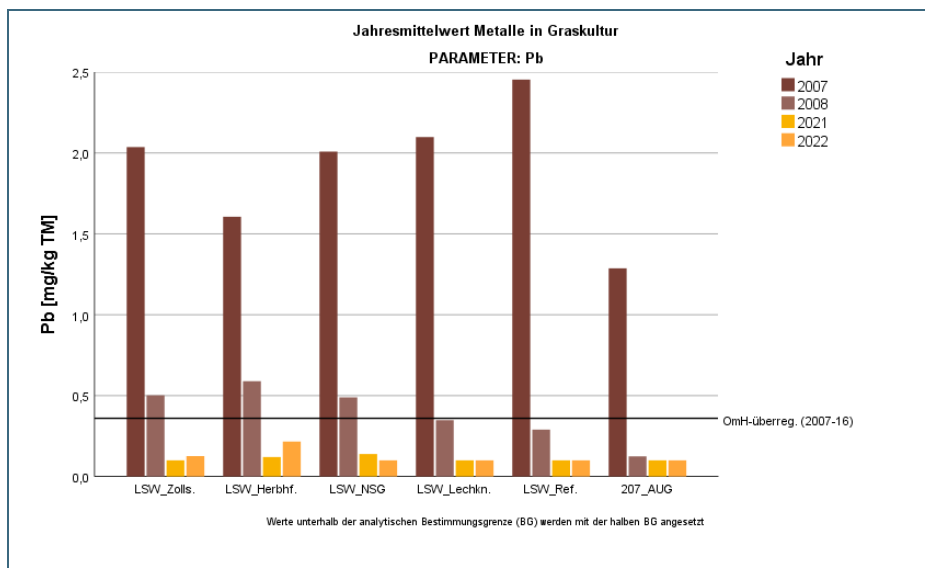


Abb. 91:
Blei: Jahresmittelwerte
an LSW und DBS
Augsburg

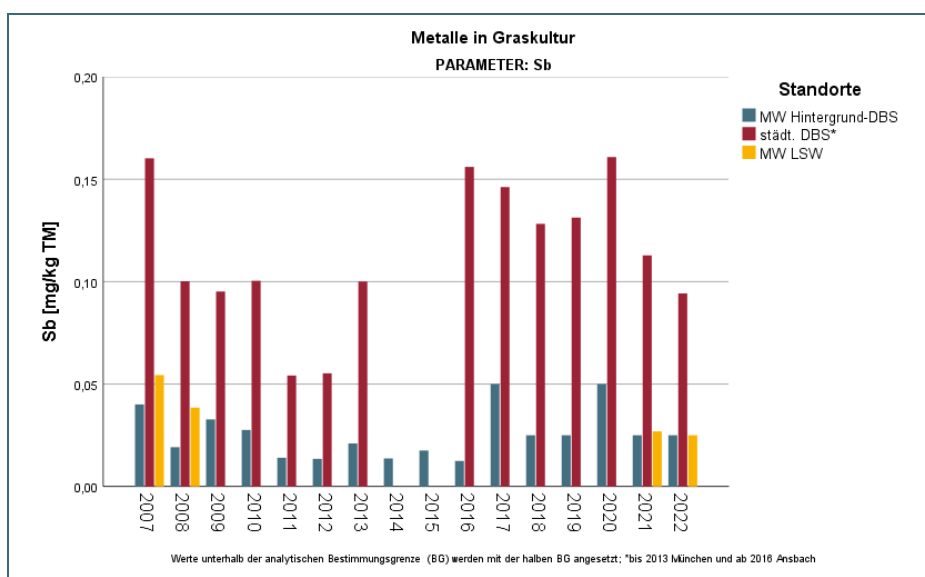


Abb. 92:
Antimon: Jahresmittel-
werte an LSW, Hinter-
grund- und städtischer
DBS

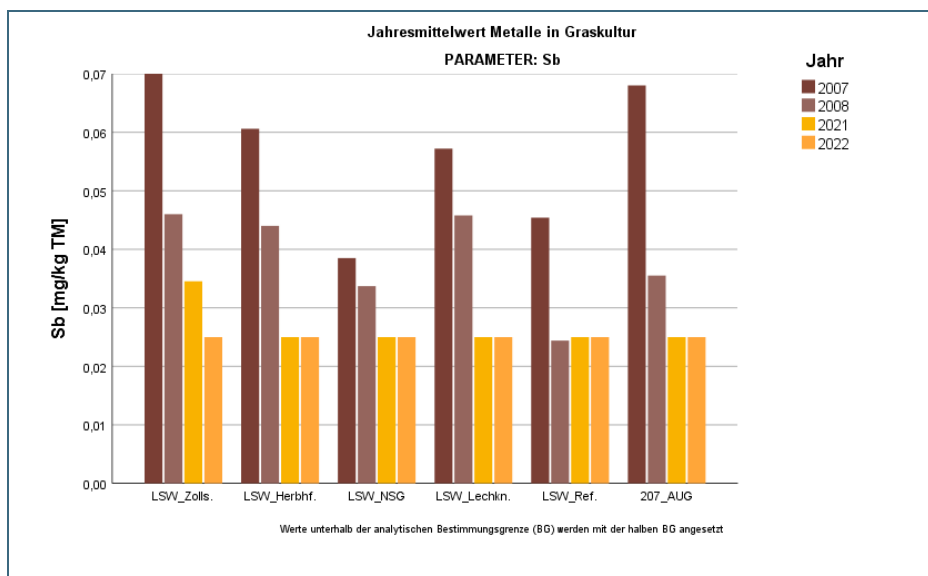


Abb. 93:
Antimon: Jahresmittel-
werte an LSW und
DBS Augsburg

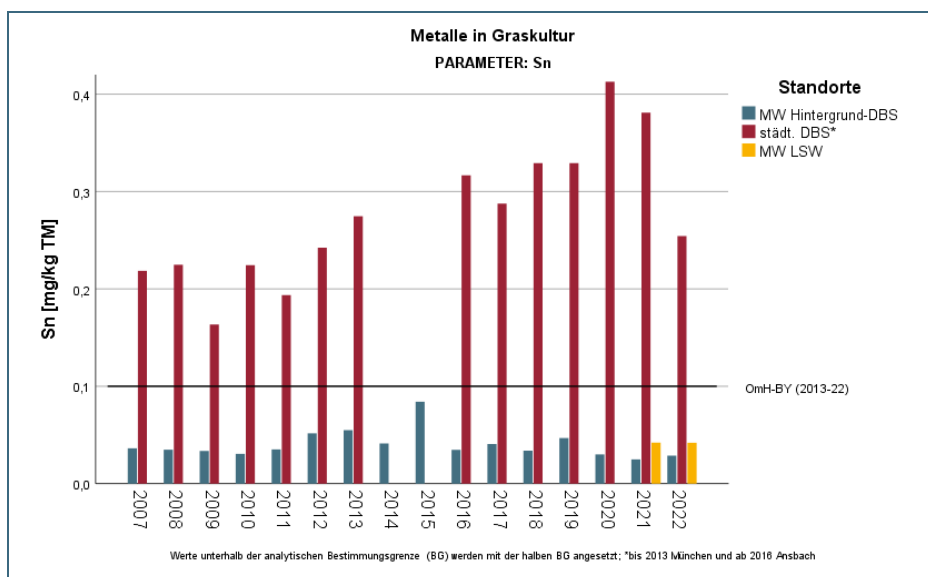


Abb. 94:
Zinn: Jahresmittelwerte
an LSW, Hintergrund-
und städtischer DBS

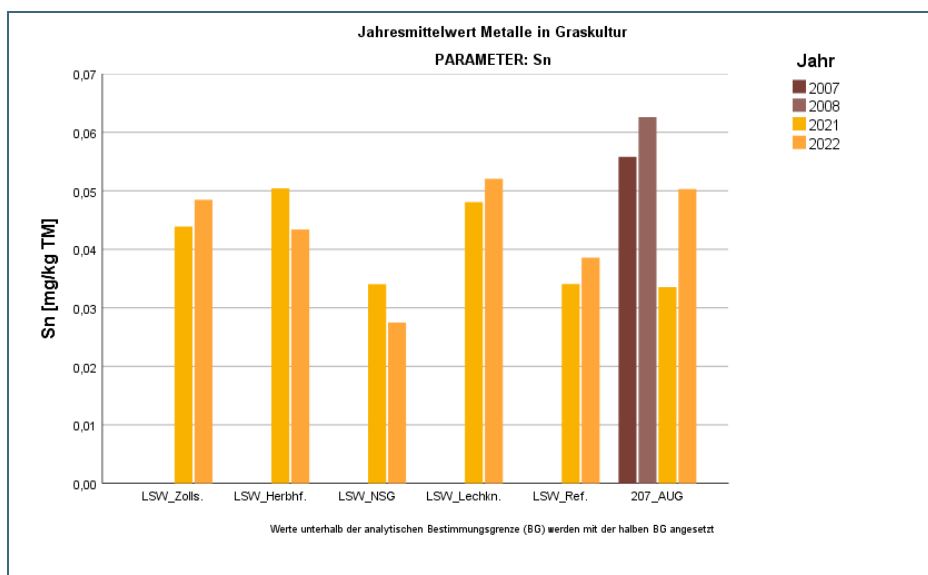


Abb. 95:
Zinn: Jahresmittelwerte
an LSW und DBS
Augsburg

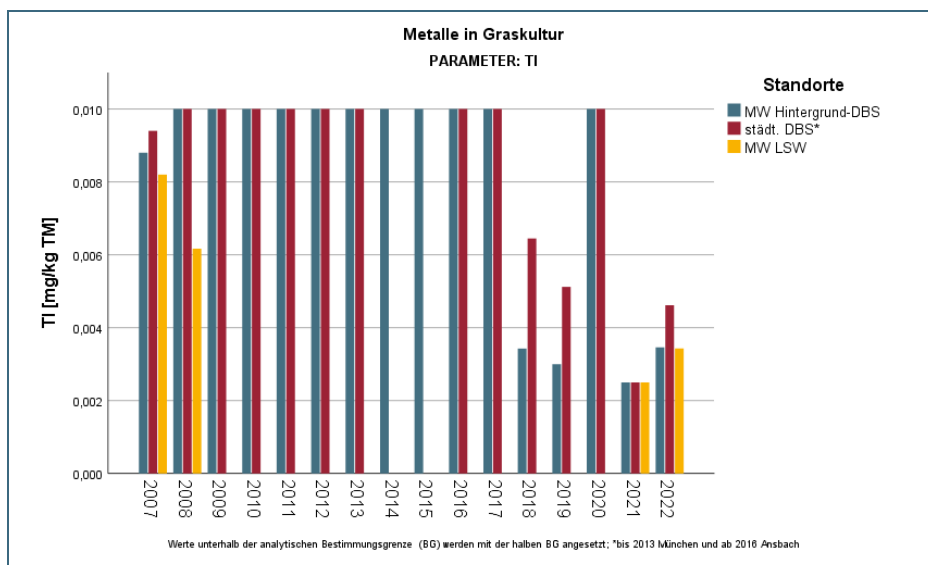


Abb. 96:
Thallium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

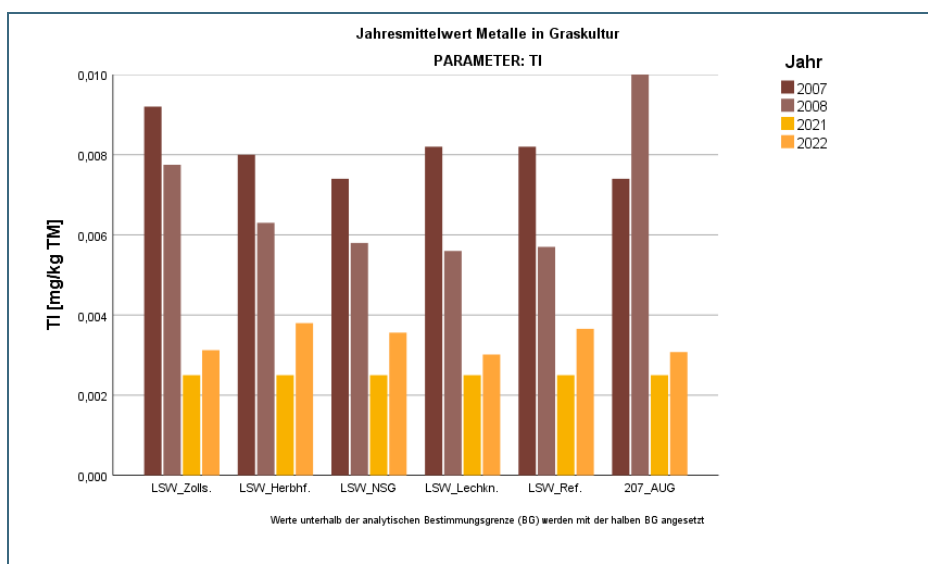


Abb. 97:
Thallium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

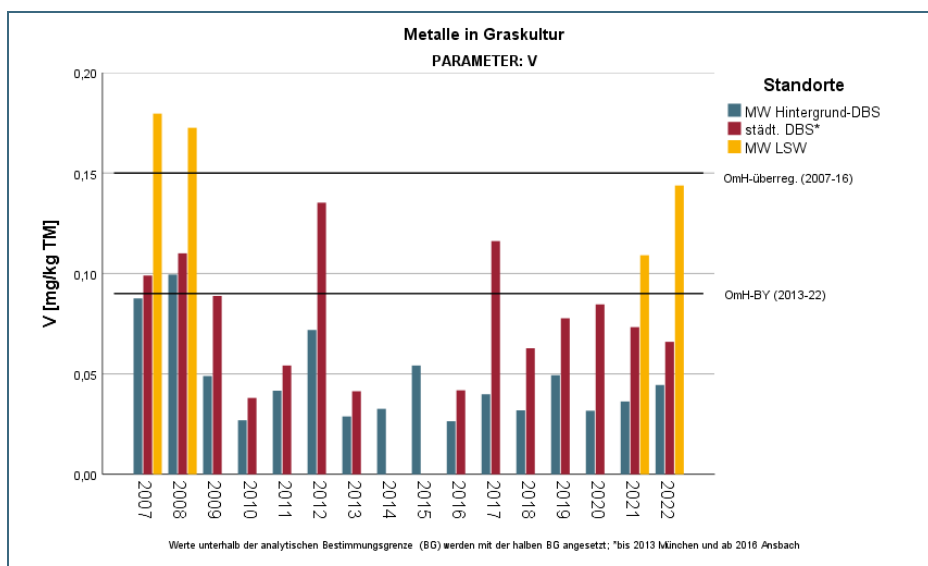


Abb. 98:
Vanadium: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

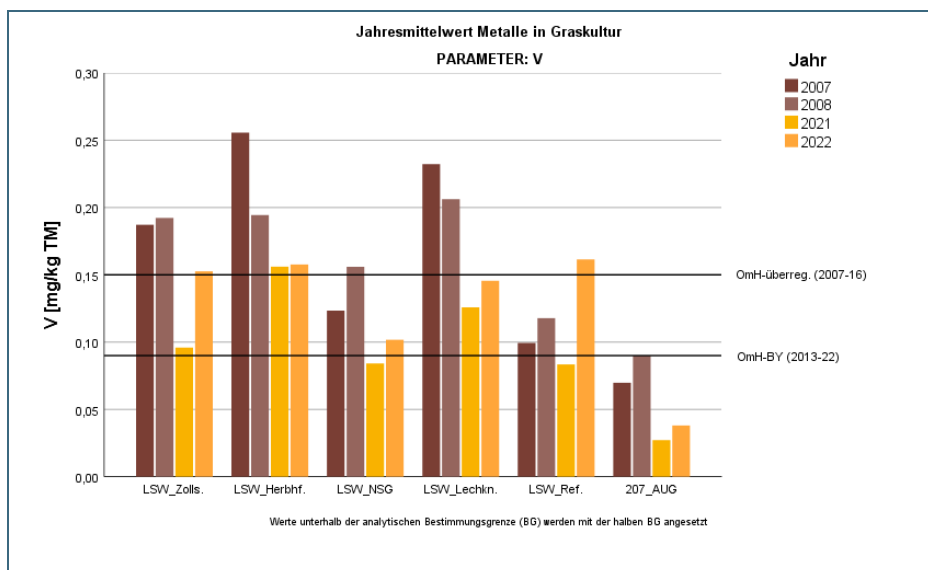


Abb. 99:
Vanadium: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

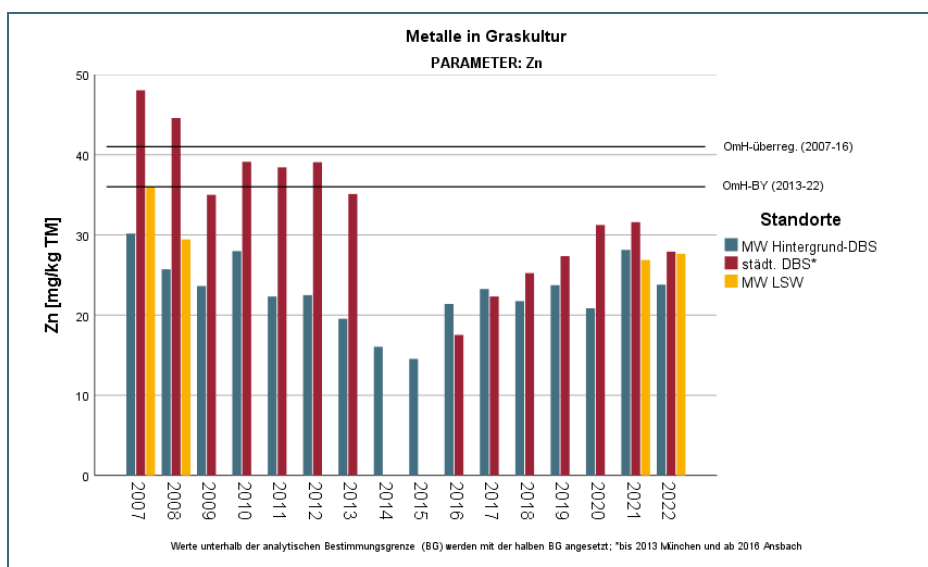


Abb. 100:
Zink: Jahresmittelwerte an LSW, Hintergrund- und städtischer DBS

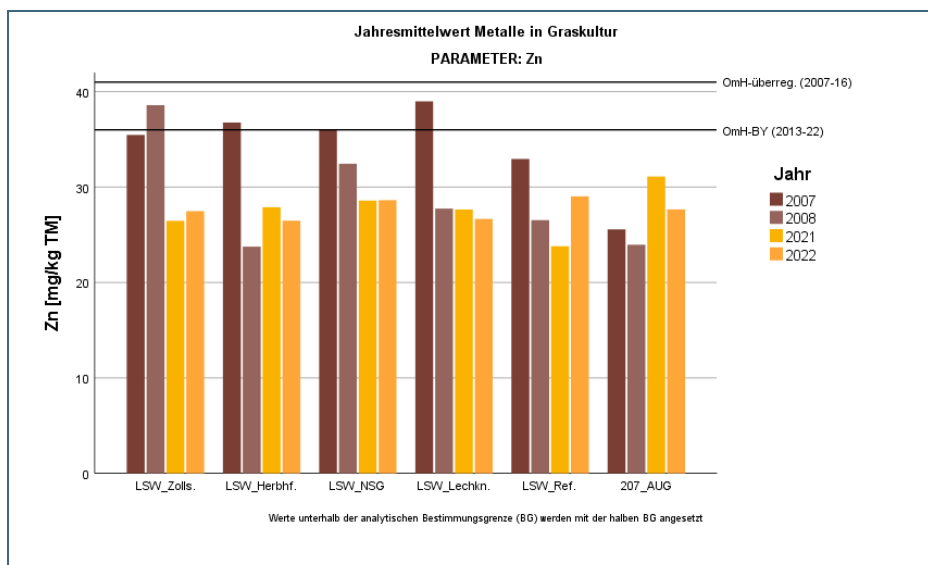


Abb. 101:
Zink: Jahresmittelwerte an LSW und DBS Augsburg

7.6 Anhang Löwenzahnscreening

Auszug aus:

Projektstudie: Datengenerierung zur Entwicklung eines passiven Biomonitorings mit Löwenzahn in Bayern (2022)

Verfasser: Susanne Wenig, Studiengang: Master Umweltingenieurwesen

Betreuer: Prof. Dr. Michael Rudner, Dipl.-Ing. Annette Stallauer (HSWT), Margit Krapp (LfU)

Einleitung und Zielsetzung

Unter Biomonitoring versteht man den Einsatz von tierischen oder pflanzlichen Organismen als Indikatoren zur Erfassung eines möglichen Vorkommens sowie der Menge an Schadstoffen in Wasser, Boden oder Luft (Zierdt, 1997).

Hierbei unterscheidet man in zwei Verfahren: aktive und passive Verfahren. Beim aktiven Biomonitoring werden ausgewählte Organismen unter standardisierten Bedingungen herangezogen und für einen bestimmten Zeitraum im Freiland exponiert, um anschließend die im Organismus über den Expositionszeitraum aufgenommenen und gespeicherten Schadstoffe analytisch zu quantifizieren. Beim passiven Biomonitoring hingegen wird die Wirkung von Schadstoffen an Organismen erfasst, die bereits an dem zu untersuchenden Standort vorhanden sind (Klein & Paulus, 1995).

In dieser Projektstudie sollen in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) unter Verwendung des Wiesen-Löwenzahns (*Taraxacum officinale*) Daten für eine Methode zum passiven Biomonitoring für Bayern generiert werden. Als Vorbild dient hierzu ein Verfahren, das in Nordrhein-Westfalen durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV NRW) schon etabliert ist (LANUV, 2021).

Im Laufe des Projekts wurden in zwei Kampagnen Löwenzahnproben an sieben zuvor definierten Standorten genommen, sowie bei der ersten Kampagne zusätzlich jeweils eine Bodenprobe genommen wurde. Diese wurden an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) hinsichtlich der Spurenelemente Barium (Ba), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Nickel (Ni), Blei (Pb) und Zink (Zn) analysiert. Weitere Analysen wurden am LfU durchgeführt. In dieser Projektarbeit wird hauptsächlich auf die an der HSWT gewonnenen Ergebnisse eingegangen und ausgewählte Daten des LfU zum Vergleich herangezogen.

Methoden

Probenahme

Verwendetes Material: *Taraxacum officinale*

Häufig werden Moose und Flechten für das Monitoring verwendet. Da diese aber in Städten oder südlich gelegenen Gebieten zum Teil nicht ausreichend verbreitet sind, können diese nicht ausschließlich im passiven Biomonitoring eingesetzt werden (Winter *et al.*, 2000). Es wurde daher der Wiesen-Löwenzahn *Taraxacum officinale* verwendet, da dieser ubiquitär über die gesamte Vegetationsperiode an vielen Standorten verfügbar ist und zugleich zahlreiche Schadstoffgruppen, wie zum Beispiel Polychlorierte Biphenylen (PCB) oder Schwermetalle akkumuliert.

Probenahme-Zeitraum

Im Vorfeld wurden zwei Probenahme-Zeitpunkte festgesetzt. Diese korrelierten mit den Probenahme-Zeitpunkten des aktiven Biomonitorings mittels Weidelgras des LfU um einen späteren Datenvergleich zwischen dem passiven sowie aktiven Monitorings zu ermöglichen. Daher erfolgte die erste Probenahme am 26.05.2021 und die zweite Probenahme am 23.06.2021.

Ablauf der Probenahme

Ziel der Probenahme ist es, das Probenmaterial ohne Verunreinigung oder Verlust zu gewinnen.

Entnahme Bodenproben

Für die Entnahme der Bodenproben wurde je Standort eine Mischprobe mehrerer Extraktionen gewonnen. Auf den jeweiligen Standorten wurden durch mind. 5 Extraktionen von 10 cm; die auf der Beprobungsfläche großzügig verteilt wurden, Mischproben hergestellt und in einem beschrifteten PE-Beutel eingetütet.

Entnahme Löwenzahnproben

Für die Entnahme der Löwenzahnproben wurden je Standort Mischproben hergestellt. Dabei wurden mindestens 10 verschiedene Pflanzen beprobt. Hierfür wurden die Blätter ca. 2-4 cm oberhalb des Bodens abgeschnitten. Dabei wurden Proben für die Anorganische und Organische Analyse gewonnen, wobei Proben mit ca. 50 g für die Anorganik und mind. 300 g für die Organik bereitgestellt wurden. Die Proben für die Organik wurden dicht in Alufolie und in einem beschrifteten PE-Beutel verpackt und zudem sofort auf Eis gelegt. Die Proben für die Anorganik wurden in einem beschrifteten PE-Beutel verpackt. In dieser Projektarbeit wird ausschließlich auf die Anorganik eingegangen.

Probenvorbereitung

Probenvorbereitung Bodenproben

Die gewonnenen Proben wurden zunächst bei Raumtemperatur getrocknet und anschließend in einer Kugelmühle bei 12000 rpm für ca. 25 Sekunden analysenfein gemahlen. Daraufhin wurden die gemahlenen Proben in trockene, beschriftete 100 mL PE-Flaschen abgefüllt und gekennzeichnet. Für die darauffolgenden Aufschlüsse wurden je Bodenprobe ca. 1 g Material mit 9 mL konzentrierter Salzsäure (HCl) und 3 mL konzentrierter Salpetersäure (HNO₃) versetzt und ein Mikrowellenaufschluss durchgeführt. Zusätzlich zu den gesammelten Proben wurde ein Referenzmaterial zur Kontrolle (BCR 142 R) sowie ein Blindwert mitgeführt. Hierbei wurde ein Aufschluss im Labor der HSWT mittels ICP-OES analysiert und der zweite Aufschluss im Labor des LfU mittels ICP-MS analysiert.

Probenvorbereitung Löwenzahnproben

Die Proben für die Anorganik wurden zunächst bei 40°C im Trockenschrank getrocknet, bevor sie anschließend bei 14000 rpm für wenige Sekunden analysenfein gemahlen wurden. Danach wurden die Proben in trockene 50 mL Falcon Tubes abgefüllt, beschriftet und aufbewahrt. Zur weiteren Analysenvorbereitung wurden je ca. 0,5 g Probenmaterial eingewogen, mit 10 mL HNO₃ und 1 mL HCl versetzt und ein Mikrowellenaufschluss durchgeführt. Zusätzlich zu den gesammelten Proben wurden je zwei Referenzmaterialien zur Kontrolle (EU-Referenz N 281 und IAEA Referenz V 10) sowie je ein Blindwert mitgeführt. Es wurden je Probenahme zwei Aufschlüsse vorgenommen, wobei ein vollständiger Aufschluss im Labor der HSWT mittels ICP-OES und der zweite Aufschluss im Labor des LfU mittels ICP-MS analysiert wurde.

Probenanalyse mittels optischer Atomemissionsspektrometrie (ICP-OES)

Nachdem die Probematerialien mittels Druckaufschlüssen für die Analyse vorbereitet wurden, wurden die Proben anhand der optischen Emissionsspektrometrie mit induziertem Plasma (ICP-OES) analysiert. Dieses Verfahren ermöglicht eine Multielementanalyse (Alloway, 1996). In dieser Projektstudie wurden die Elemente Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb und Zn analysiert. Hierbei wurden die Bodenproben einmal gemessen, wohingegen die Löwenzahnproben jeweils zweimal gemessen wurden.

Fazit

Insgesamt lieferten die Messungen der beiden Labore vergleichbare Ergebnisse. Auch die Messergebnisse der HSWT, die unter der Bestimmungsgrenze liegen, sind im Vergleich zu den Messergebnissen des LfU, die ebenfalls kleinere Werte detektierten, plausibel. Die teils schwankenden Ergebnisse zwischen den einzelnen Messtagen könnten ggf. durch Kontamination der Löwenzahnproben durch Boden verursacht worden sein, da es an einem Probenahmezeitpunkt zuvor gestürmt und geregnet hatte. Außerdem lässt sich bei einigen Metallen ein höherer Gehalt am Standort Ansbach feststellen. Dieser Standort liegt nahe einer viel befahrenen Straße und ist somit mehr Emissionen ausgesetzt als Standorte, die in naturnäheren Bereichen liegen.

Zieht man zudem einen Vergleich zu Literaturwerten aus dem Moosmonitoring, so erkennt man, dass sich die Werte der Analysen größtenteils in vergleichbaren Größenordnungen wiederfinden. So liegen die Literaturwerte aus dem Moosmonitoring von Blei (2,4 mg/kg), Cadmium (0,21 mg/kg), Chrom (0,69 mg/kg) und Nickel (0,85 mg/kg) sehr nahe an den Werten dieser Projektstudie mit Löwenzahn. Die Literaturwerte von Barium (35 mg/kg) und Mangan (110 mg/kg) lagen etwas höher als die Messergebnisse der Löwenzahnproben. Die Literaturwerte von Kupfer (5,8 mg/kg) und Zink (24 mg/kg) lagen etwas niedriger im Vergleich zu den Gehalten, die in dieser Arbeit detektiert wurden (LfU, 2016).

Grenzen und Chancen der Methode

Allgemeine Grenzen des Passiven Biomonitorings sind, dass nur Untersuchungsstandorte erfasst werden können, auf denen genügend Probematerial vorhanden ist (Herzig & Urech, 1991). Auf diese Grenze wurde im Rahmen dieses Projekts insbesondere an den Standorten der DBS Ansbach und der DBS Augsburg gestoßen, da dort bei beiden Probenahmezeitpunkten relativ wenig Löwenzahn vorhanden war, und zudem vor der zweiten Probenahme dort frisch gemäht worden war. Dieses Problem wurde so umgangen, indem in einem weitläufigeren Gebiet eine zweite Teilprobe entnommen wurde. Eine weitere Möglichkeit diesem Umstand entgegenzuwirken wäre, zuvor mit den entsprechenden Ansprechpartnern terminlich die Mähung der Flächen und der Probenahme aufeinander anzupassen. An allen anderen Standorten war jedoch ausreichend Probenmaterial vorhanden.

Die gewonnenen Daten schaffen eine erste Datenbasis für die Entwicklung eines passiven Monitorings mittels Löwenzahn zum Erkennen lokaler Emissionen und Problemgebieten und dienen zudem der Ermittlung des Ausmaßes der regionalen Belastung durch bestimmte Schwermetalle.

In Folgenden könnten weitere Beprobungen an Löwenzahn stattfinden um weitere Daten zu generieren, sowie die Daten aus dem aktiven Biomonitoring des LfU für einen Vergleich herangezogen werden. Zusätzlich dazu könnten im Weiteren die Ergebnisse aus den Analysen der Organik betrachtet werden.

Da die anthropogene Luftbelastung immer stärkere Ausmaße annimmt und natürliche Kreisläufe immer stärker belastet und gestört werden, besteht das dringende Bedürfnis nach geeigneten Warn- und Überwachungssystemen (Herzig & Urech, 1991). Das passive Biomonitoring mittels Löwenzahn könnte die bestehenden Monitoringsysteme ergänzen und Bereiche abdecken, in denen andere Monitoringsysteme versagen.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

