



Rheinland-Pfalz

LANDESAMT FÜR UMWELT

WIEDERHOLUNGSINVENTUR VON BODENDAUERBEOBACHTUNGS- FLÄCHEN IN RHEINLAND-PFALZ



Impressum

Herausgeber

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Straße 7 • 55116 Mainz
Telefon: 06131/6033-0
www.lfu.rlp.de

Bearbeitung: Annett Drusba, Michael Goldschmitt & Matthias Hauenstein (LGB),
Dr. Martin Greve (FAWF), Dr. Cilia Derese & Kevin Handke (LfU)

Layout: Stabsstelle Planung und Information

Fotos Deckblatt: Hintergrund/Waldstück: Dr. Martin Greve (FAWF),
Probenahme: Florian Frank (FAWF),
Labor: Matthias Hauenstein (LGB)

1. Auflage März 2026

© Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz 2026

Nachdruck und Wiedergabe nur mit Genehmigung des Herausgebers

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

Bodenschutz ist Klimaschutz. Böden sind nach den Ozeanen der zweitgrößte Kohlenstoffspeicher der Erde. Sie speichern etwa viermal so viel Kohlenstoff wie die oberirdische Vegetation und mehr als doppelt so viel wie die Atmosphäre. Darüber hinaus sind sie wahre Multitalente: Sie bieten Lebensraum für Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen, dienen als Produktionsgrundlage für Land- und Forstwirtschaft, als Rohstoffquelle und als Siedlungsfläche. Zugleich speichern und filtern sie Wasser, puffern Schadstoffe und tragen durch ihre natürliche Wasserrückhaltefunktion zum Schutz vor Hochwasser bei. Gesunde Böden sind somit entscheidend für eine widerstandsfähige Umwelt.



Dieses empfindliche System ist jedoch zunehmend durch menschliche Nutzung und den Klimawandel gefährdet. Um Veränderungen frühzeitig zu erkennen und nachhaltige Strategien zu entwickeln, werden in Rheinland-Pfalz seit 2008 Bodendauerbeobachtungsflächen betrieben. Damals richtete das Landesamt für Umwelt (LfU) im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) im bestehenden Messnetz der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF) 16 Standorte ein. Die Erstuntersuchung erfolgte 2009 – 2010 durch das Landesamt für Geologie und Bergbau (LGB). Eine erneute Beprobung fand 2023 bis 2025 statt – wiederum als Kooperation zwischen LfU, LGB und FAWF.

Der aktuelle Untersuchungszyklus widmet sich neben der Bilanzierung der Kohlenstoffvorräte auch „neuen“ Schadstoffen. Von besonderem Interesse sind hierbei per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), die weltweit in Industrie und Alltagsprodukten eingesetzt werden und sich zunehmend in Böden nachweisen lassen. Ziel ist es, ihr Verhalten und ihre Auswirkungen besser zu verstehen, Gefährdungspotenziale abzuschätzen und Handlungsbedarfe zu identifizieren.

Die Bodendauerbeobachtung ist ein zentrales Instrument des Bodenschutzes in Rheinland-Pfalz. Mit der neuen europäischen „Richtlinie zur Bodenüberwachung und -resilienz“ (Soil Monitoring and Resilience Law) gewinnt sie weiter an Bedeutung. Ich freue mich daher, die Ergebnisse der „Wiederholungsinventur von Bodendauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz“ vorzustellen und damit Bürgerinnen und Bürger, Behörden, Fachbüros und Wissenschaft gleichermaßen für die Bedeutung gesunder Böden zu sensibilisieren.

Dr. Dirk Grünhoff

Präsident

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis Anhang	11
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung	16
1 EINLEITUNG	18
2 METHODEN	21
2.1 Probennahme	21
2.1.1 Probennahme Schurf und Eckpunkte 2009	22
2.1.2 Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	22
2.2 Labormethoden	24
2.3 Bestimmungsgrenzen	25
2.4 Berechnung der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Elementvorräte	28
2.5 Datenaufbereitung und Datenqualität	30
2.5.1 Vergleichbarkeit der Flächenmischproben 2010 und 2022	30
2.5.2 Vergleich der Trockenrohdichten nach AG Boden und der Messwerte der FAWF	32
2.5.3 Vergleichbarkeit der spezifischen Aktivität von ¹³⁷ Cäsium	33
2.5.4 Toxizitätsäquivalente von Dioxinen, Furanen, dl-PCB	34
3 ERGEBNISSE	35
3.1 Baumbestand und Streufall	35
3.2 Veränderungen auf den Bodendauerbeobachtungsflächen zum Zeitpunkt der 2. Kernflächenbeprobung 2022	37
3.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnisse	38
3.3.1 Organischer Kohlenstoff und Gesamtstickstoff	38
3.3.2 Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnisse	41
3.4 Kohlenstoff- und Elementvorräte	42
3.4.1 Kohlenstoff	42
3.4.2 Phosphor	44
3.4.3 Calcium, Magnesium und Kalium	46

3.5	pH-Wert	48
3.6	Arsen und Schwermetalle	51
3.6.1	Arsen	51
3.6.2	Blei	53
3.6.3	Cadmium	56
3.6.4	Chrom	58
3.6.5	Kupfer	59
3.6.6	Nickel	62
3.6.7	Quecksilber	64
3.6.8	Zink	66
3.7	¹³⁷Cäsium	68
3.8	Organische Schadstoffe	70
3.8.1	PFAS	70
	PFAS in der Feststoffanalytik	71
	PFAS in der Eluatanalytik	73
3.8.2	PFAS – Vergleich der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen	74
3.8.3	Dioxine, Furane und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle	79
3.8.4	Polychlorierte Biphenyle	82
3.8.5	Polyzyklische Kohlenwasserstoffe	83
3.8.6	Organochlorpestizide und schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe	85
3.8.7	Pentachlorphenol	87
	Literatur	88
	Anhang	90

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lage der BDF in Rheinland-Pfalz und Bezug zu Bodengroßlandschaften	19
Abb. 2:	Beprobungsschema von BDF in Rheinland-Pfalz	21
Abb. 3:	Beprobungsschema der 1. Kernflächenbeprobung 2010 und 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	23
Abb. 4 :	Vergleich gemessener und berechneter Werte je Tiefenstufe der Flächenmischprobe 2022	31
Abb. 5:	Relative Abweichung von gemessenen zu berechneten Werte der 2. Kernflächenbeprobung 2022	32
Abb. 6:	Gegenüberstellung der Trockenrohdichten im Mineralboden bis 30 cm nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und durch Messwerte der FAWF.....	33
Abb. 7:	Tiefenverteilung der Gehalte an organischem Kohlenstoff in Masse-% aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	38
Abb. 8:	Vergleich der Kohlenstoffgehalte in Masse-% in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	39
Abb. 9:	Tiefenverteilung der Gesamtstickstoffgehalte in Masse-% aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	40
Abb. 10:	Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% der org. Auflage (1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022)	40
Abb. 11:	Vergleich der C/N-Verhältnisse in der org. Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	41
Abb. 12:	Vergleich der C/N-Verhältnisse in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	42
Abb. 13:	Kohlenstoffvorräte in t/ha in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022 (berechnet mit TRD FAWF).....	43
Abb. 14:	Vergleich der Summe der Kohlenstoffvorräte in t/ha in der organischen Auflage und den Tiefenstufen bis 30 cm, 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	44
Abb. 15:	Relative Abweichung der Summe der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorvorräte in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe zwischen 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	45
Abb. 16:	Relative Abweichung der Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte in den Tiefenstufen 0 bis 30 cm zwischen 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	47
Abb. 17:	Tiefenverteilung der pH-Werte ($CaCl_2$) aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	49

Abb. 18: Vergleich der pH-Werte (CaCl ₂) in der organischen Auflage der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	50
Abb. 19: Vergleich der pH-Werte (CaCl ₂) in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	50
Abb. 20: Tiefenverteilung der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	52
Abb. 21: Vergleich der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	53
Abb. 22: Tiefenverteilung der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	54
Abb. 23: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	55
Abb. 24: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	55
Abb. 25: Tiefenverteilung der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	56
Abb. 26: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	57
Abb. 27: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	57
Abb. 28: Tiefenverteilung der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	58
Abb. 29: Vergleich der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	59
Abb. 30: Tiefenverteilung der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	60
Abb. 31: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	61
Abb. 32: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	61
Abb. 33: Tiefenverteilung der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	62
Abb. 34: Vergleich der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	63
Abb. 35: Tiefenverteilung der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	64

Abb. 36: Vergleich der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	65
Abb. 37: Tiefenverteilung der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	66
Abb. 38: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	67
Abb. 39: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	67
Abb. 40: Tiefenverteilung der spezifischen Aktivitäten von ¹³⁷ Cs in Bq/kg aller BDF der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung	68
Abb. 41: Vergleich der spezifischen Aktivitäten von ¹³⁷ Cäsium in Bq/kg in der organischen Auflage der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung 2022	69
Abb. 42: PFAS Feststoff in µg/kg in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022	71
Abb. 43: PFAS Feststoff in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	72
Abb. 44: PFAS Feststoff in µg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	72
Abb. 45: PFAS Eluat in µg/l in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	73
Abb. 46: PFAS Feststoff in µg/kg in der organischen Auflage von Laubbaumstandorten in Hessen und Laub- und Nadelbaumstandorten in Rheinland-Pfalz.....	75
Abb. 47: PFAS-Feststoffgehalte im mineralischen Oberboden der vergleichbaren BDF der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen (© HLNUG, Heller et al. 2025)	76
Abb. 48: PFAS Feststoff in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm von Laubbaumstandorten in Hessen und Laub- und Nadelbaumstandorten in Rheinland-Pfalz.....	77
Abb. 49: PFAS Eluat-Konzentrationen in µg/l in der organischen Auflage von Laubbaumstandorten in Hessen und Laub- und Nadelbaumstandorten in Rheinland-Pfalz.....	78
Abb. 50: Toxizitätsäquivalente von Dioxinen, Furanen und dl-PCB gemäß Bewertung der WHO 2005 nach Tiefenstufen bis 10 cm, 1. Kernflächenbeprobung 2010	80
Abb. 51: Toxizitätsäquivalente von Dioxinen, Furanen und dl-PCB gemäß Bewertung der WHO 2005 nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	80

Abb. 52: Vergleich der Toxizitätsäquivalente gemäß Bewertung der WHO 2005 in ng TEQ/kg in der organischen Auflage der 1. Und 2. Kernflächen- beprobung 2010 und 2022	81
Abb. 53: Vergleich der Toxizitätsäquivalente gemäß Bewertung der WHO 2005 in ng TEQ/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	81
Abb. 54: PCB ₆ in µg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	83
Abb. 55: PAK ₁₆ in mg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	84
Abb. 56: p,p'-DDE-Gehalte in µg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächen- beprobung 2022.....	86
Abb. 57: p,p'-DDT-Gehalte in µg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächen- beprobung 2022.....	86

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abb. A1: Vergleich der Auflagenmächtigkeiten von Laub- und Nadelbaumstandorten.....	90
Abb. A2: Vergleich der Trockenrohdichte von Laub- und Nadelbaumstandorten	90
Abb. A3: Vergleich des pH-Werts (CaCl_2) von Laub- und Nadelbaumstandorten.....	91
Abb. A4: Vergleich des C/N-Verhältnisses von Laub- und Nadelbaumstandorten	91
Abb. A5: Vergleich der Kohlenstoffgehalte in Masse-% in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	92
Abb. A6: Vergleich der Massenanteile C_{org} in Masse-% in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022, gruppiert nach Baumbestand	92
Abb. A7: Vergleich der Kohlenstoffgehalte in Masse-% in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	93
Abb. A8: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	93
Abb. A9: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	94
Abb. A10: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	94
Abb. A11: Vergleich der C/N-Verhältnisse in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	95
Abb. A12: Vergleich der C/N-Verhältnisse in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	95
Abb. A13: Tiefenverteilung der pH-Werte (H_2O) aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	96
Abb. A14: Vergleich der pH-Werte (CaCl_2) in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	96
Abb. A15: Vergleich der pH-Werte (CaCl_2) in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010/2022	97
Abb. A16: Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	97
Abb. A17: Vergleich der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	98

Abb. A18: Vergleich der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	98
Abb. A19: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	99
Abb. A20: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	99
Abb. A21: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	100
Abb. A22: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	100
Abb. A23: Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	101
Abb. A24: Vergleich der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	101
Abb. A25: Vergleich der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	102
Abb. A26: Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	102
Abb. A27: Vergleich der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	103
Abb. A28: Vergleich der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	103
Abb. A29: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	104
Abb. A30: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	104
Abb. A31: Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	105

Abb. A32: Vergleich der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	105
Abb. A33: Vergleich der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	106
Abb. A34: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	106
Abb. A35: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	107
Abb. A36: Vergleich der spezifischen Aktivität von ¹³⁷ Cäsium in Bq/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung 2022	107
Abb. A37: Vergleich der spezifischen Aktivität von ¹³⁷ Cäsium in Bq/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung 2022	108
Abb. A38: PFAS Feststoff kurzkettiger PFAS in µg/kg in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022	108
Abb. A39: PFAS Feststoff, kurzkettiger PFAS in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	109
Abb. A40: PFAS Feststoff, kurzkettiger PFAS in µg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	109
Abb. A41: PFAS Feststoff, langkettiger PFAS in µg/kg in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022	110
Abb. A42: PFAS Feststoff, langkettiger PFAS in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	110
Abb. A43: PFAS Feststoff, langkettiger PFAS in µg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022	111
Abb. A44: PFAS Eluat in µg/l in der Tiefenstufe 0-5 cm der 2. Kernflächenbeprobung 2022	111
Abb. A45: PFAS Eluat in µg/l in der Tiefenstufe 5-10 cm der 2. Kernflächenbeprobung 2022	112
Abb. A46: Vergleich TEQ WHO 2005 in ng TEQ/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	112

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bodenkundliche Eckdaten der BDF	20
Tab. 2:	Gegenüberstellung der hergestellten Mischproben der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	23
Tab. 3:	Methoden der Probenvorbereitung und Analytik	24
Tab. 4:	Analytik sowie Bestimmungsgrenzen relevanter Elemente	25
Tab. 5:	Bestimmungsgrenzen organischer Schadstoffe 2010 und 2022.....	26
Tab. 6:	Wertigkeit und molare Masse der Elemente Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Natrium (Na)	28
Tab. 7:	Volumenanteil (φ_{GB}) abgeleitet nach Ad-hoc-AG Boden (2005)	29
Tab. 8:	Trockenrohdichte (TRD) abgeleitet nach Ad-hoc-AG Boden (2005).....	30
Tab. 9:	Übersicht über Auflagenmächtigkeit, Trockenrohdichte, Kohlenstoffanteil, C/N- Verhältnis und Bodentyp der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022	36
Tab. 10:	Übersicht über Trockenrohdichte, Kohlenstoffanteil, C/N-Verhältnis und Bodentyp der Tiefenstufe 0-5 cm der 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	36
Tab. 11:	Übersicht über beräumte und teilberäumte BDF zum Zeitpunkt der 2. Kernflächenbeprobung 2022	37
Tab. 12:	Vergleich der Summe der Kohlenstoff- und Gesamtstickstoffvorräte in t/ha und der Phosphorvorräte in kg/ha in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe, 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022.....	45
Tab. 13:	Vorräte der austauschbaren Elemente (Bariumchlorid-Extraktion) in kg/ha in der organischen Auflage aller BDF für die 2. Kernflächenbeprobung 2022.....	46
Tab. 14:	Vergleich der Vorräte der austauschbaren Elemente (Ammoniumchlorid-Extraktion) in kg/ha im Mineralboden 0 bis 30 cm Tiefe der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022	48
Tab. 15:	Die gemessenen 13 PFAS-Einzelsubstanzen, gruppiert nach Kettenlänge	70
Tab. 16:	Gegenüberstellung des Probenahmeschemas und der Methoden der PFAS-Bestimmung der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen	74
Tab. 17:	PCDD/F und dl-PCB mit Toxizitätsäquivalent gemäß Bewertung WHO 2005.....	79
Tab. 18:	PCB ₆ Einzelverbindungen	82
Tab. 19:	PAK ₁₆ Einzelverbindungen	84
Tab. 20:	Organochlorpestizide und schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe.....	85

Abkürzungsverzeichnis

BDF	Bodendauerbeobachtungsfläche
BG	Bestimmungsgrenze
EP	Eckpunkt
FB	Feinboden
GB	Grobboden
KW	Königswasser-Extraktion
OG	Obergrenze
TEF	Toxizitätsäquivalentfaktor
TEQ	Toxizitätsäquivalent
TK 25	Topographische Karte 1:25.000
TRD	Trockenrohdichte
TS	Tiefenstufe
UG	Untergrenze

Zusammenfassung

Im Rahmen der langfristigen Überwachung der Veränderungen des Bodenzustandes und der Bodenfunktionen wurden im Jahr 2009 durch das Landesamt für Geologie und Bergbau 16 Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) angelegt. Diese Flächen liegen überwiegend in den rheinland-pfälzischen Mittelgebirgen und stellen industrieferne Reinluftgebiete dar, die ausschließlich durch atmosphärischen Eintrag gekennzeichnet sind. Die Flächen werden nach guter fachlicher Praxis forstlich bewirtschaftet.

Zur Statusermittlung wurden im Jahr 2009 jeweils ein Schurf je BDF sowie die Eckpunkte der entsprechenden Kernflächen beprobt. Zur Erfassung von Veränderungen wurde in den Jahren 2009 und 2010 bzw. in den Jahren 2022 bis 2024 eine Beprobung der Kernflächen nach definierten Tiefenstufen durchgeführt. Die Proben wurden auf bodenphysikalische und bodenchemische Parameter hin untersucht. In Bezug auf umweltrelevante Fragestellungen konnten folgende Kernpunkte herausgearbeitet werden:

- Einige BDF zeigen deutliche Veränderungen. Vor allem Fichtenbestände waren von anhaltender Trockenheit und Schädlingsbefall betroffen. Dies machte eine teilweise bis vollständige Entnahme des Baumbestandes auf einzelnen Bodendauerbeobachtungsflächen notwendig.
- Die Gehalte an organischem Kohlenstoff in der organischen Auflage sind im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung unter Laubwald zum Teil sehr niedrig.
- Die Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden (0-30 cm) inklusive der organischen Auflagen haben sich im Vergleich zur 1. Kernflächenbeprobung 2010 verringert. Das weist auf eine Freisetzung von Kohlenstoff hin.
- Der Kohlenstoffverlust geht mit einem gleichzeitigen Rückgang wichtiger Nährstoffe einher, insbesondere Stickstoff, Phosphor sowie der austauschbaren Kationen Calcium, Magnesium und Kalium.
- Die pH-Werte sind insgesamt sehr niedrig. Die Bodenversauerung ist zum einen ein natürlicher Prozess, kann jedoch durch langanhaltende Einträge atmosphärischer Schadstoffe beschleunigt werden, was zu einer stärkeren Versauerung der Böden auf den ohnehin zumeist basenarmen Ausgangsteinen geführt hat. Zudem findet auf den BDF keine Bodenschutzkalkung statt. Ebenso spielen der Baumbestand und der Streufall eine Rolle. Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 wurden im mineralischen Oberboden zum Teil geringfügig höhere pH-Werte festgestellt als im Jahr 2010.
- Die Konzentrationen der Schwermetalle sind größtenteils gering. Eine Ausnahme bildet Blei, das bis in die 1980er Jahre als Additiv in Kraftstoffen verwendet und somit in hohem Maße atmosphärisch eingetragen wurde.
- ¹³⁷Cäsium aus dem radioaktiven Fallout infolge des Reaktorunfalls in Tschernobyl im April 1986 war im Rahmen der Statusbeprobung 2009 in allen BDF nachweisbar. Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 hat sich gezeigt, dass die Konzentration von ¹³⁷Cäsium erwartungsgemäß abgenommen hat.

- PCDD/F, PCB und PAK als persistente organische Schadstoffe können nach wie vor in der organischen Auflage nachgewiesen werden. Auf der vorliegenden Datenbasis ist ein direkter Vergleich der 1. und 2. Kernflächenbeprobung größtenteils nicht möglich, da unterschiedliche Bestimmungsgrenzen der Laboranalytik vorliegen.
- PFAS wurden im Jahr 2022 erstmals untersucht. Dabei konnten diese in allen BDF nachgewiesen werden, was auf eine ubiquitäre Verbreitung dieser Substanzen hinweist.
- Hinsichtlich des Baumbestandes (Laub- bzw. Nadelbäume und des daraus resultierenden Streufalls) lassen sich, ungeachtet standortspezifischer Bedingungen, Unterschiede in Parametern wie pH-Wert, Gehalt an organischem Kohlenstoff, Auflagenmächtigkeit sowie in den Konzentrationen einzelner Schadstoffe feststellen.

Der folgende Bericht stellt den Versuch dar, bodenbezogene Veränderungen über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren darzustellen und wenn möglich, einzuordnen, auch in Hinblick auf den zukünftigen Umgang mit Bodendauerbeobachtungsflächen. Weitere vertiefende Informationen zum Zustand der rheinland-pfälzischen Waldökosysteme liefert ebenso der Waldzustandsbericht aus dem Jahr 2025 (MKUEM 2025).

1 EINLEITUNG

Die Bodendauerbeobachtung ist ein zentrales Instrument des vorsorgenden Bodenschutzes zur langfristigen Beobachtung, Kontrolle und Bewertung von Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenfunktionen im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG). Im Fokus stehen dabei folgende Zielsetzungen:

- Erfassung und Beschreibung des aktuellen Zustandes der Böden,
- Erfassung und langfristige Überwachung von Veränderungen,
- Erarbeitung von Prognosen über zukünftige Entwicklungen.

Mit der Verwaltungsvereinbarung aus dem Jahr 2008 wurde das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) vom Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) mit der Einrichtung von 16 Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) beauftragt. Diese BDF wurden im Jahr 2009 auf emissionsfernen, forstlichen Umweltkontrollstellen der Forschungsanstalt für Waldökologie für Forstwirtschaft (FAWF) eingerichtet. Die Flächen waren bereits in das seit 1991 bestehende Messnetz des intensiven forstlichen Umweltmonitorings der FAWF eingebunden. Die 1. Kernflächenbeprobung der BDF fand im Jahr 2010 statt.

Mit einer weiteren Verwaltungsvereinbarung aus dem Jahr 2023 wurde das LGB mit der ersten Wiederholungsinventur vom LfU beauftragt. Die im Rahmen der Wiederholungsinventur bereits 2022 bis 2024 durchgeführte Kernflächenbeprobung hatte als Ziel, die Veränderungen der BDF hinsichtlich der Kohlenstoff- und Elementvorräte sowie der Bodeneigenschaften zu untersuchen.

Das Analysenspektrum wurde gegenüber der Erstbeprobung um die Stoffgruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) erweitert. Diese sind ausschließlich synthetischen Ursprungs, zeichnen sich durch eine hohe Persistenz in der Umwelt aus und haben zum Teil eine erhebliche toxische Relevanz. Durch die Untersuchung von PFAS auf den forstlichen BDF sollen erste Hinweise zu den Konzentrationen und der räumlichen Verteilung von PFAS in den rheinland-pfälzischen Böden gewonnen werden.

Die Lage der Bodendauerbeobachtungsflächen im Kontext der Bodengroßlandschaften ist in Abb. 1 dargestellt, die bodenkundlichen Eckdaten sind in Tab. 1 zusammengefasst.

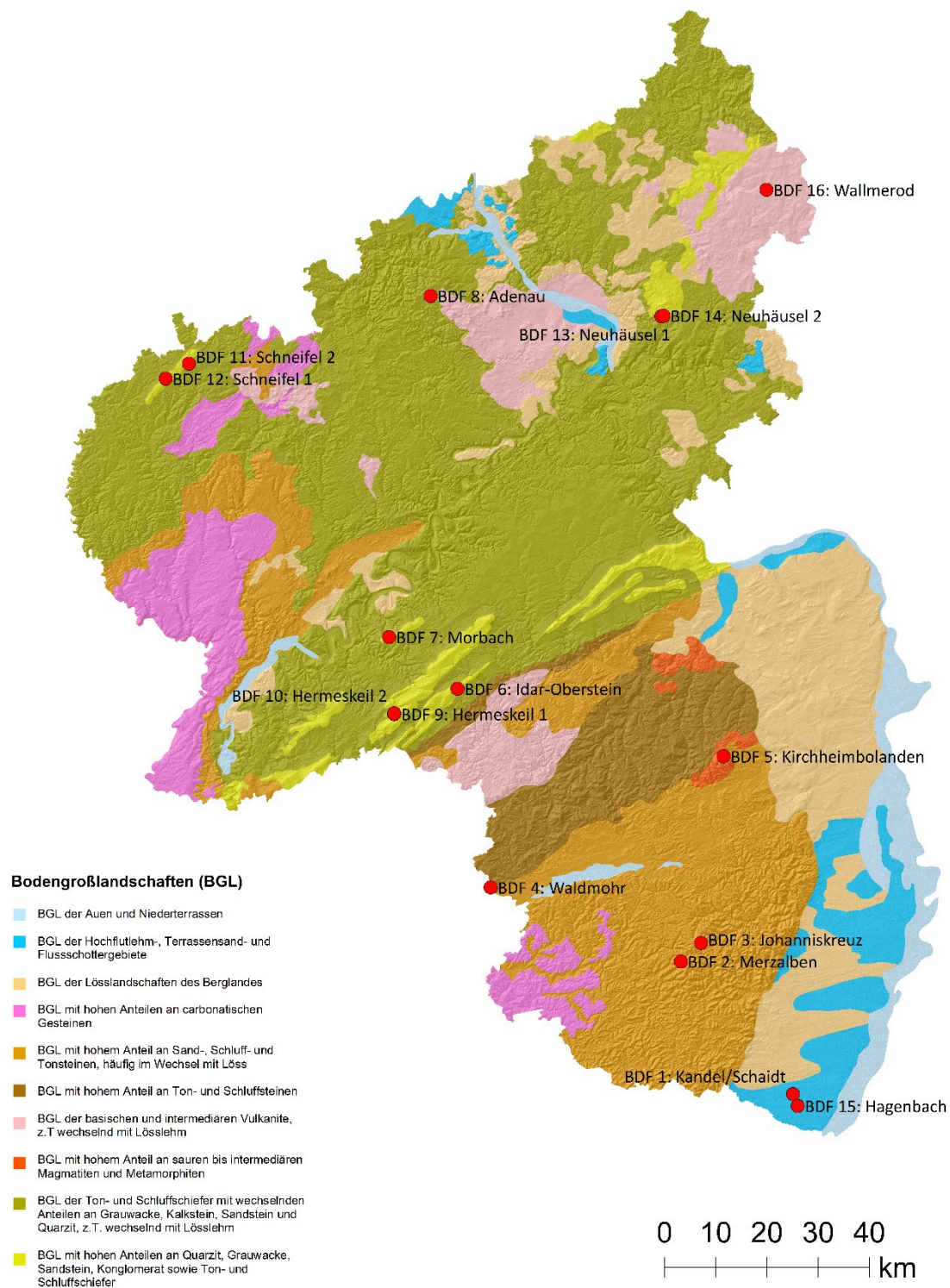


Abb. 1: Lage der BDF in Rheinland-Pfalz und Bezug zu Bodengroßlandschaften

Tab. 1: Bodenkundliche Eckdaten der BDF

BDF	TK 25 Nummer	Kurzbezeichnung LGB	Standortbezeichnung	Bodenbildendes Ausgangsgestein	Bodentyp (Schurf, EP, Status 2009)
1	6914	SAI	Kandel/Schaidt	fluviatiler Sand (Quartär)	Gley-Podsol
2	6712	MER	Merzalben	Sandstein (Buntsandstein)	Podsolige Braunerde
3	6613	ELM	Johanniskreuz	Sandstein (Buntsandstein)	Podsol (Schurf, EP2), Braunerde-Podsol (EP1)
4	6609	NKI	Waldmohr	Sandstein (Oberkarbon)	Braunerde
5	6313	DAF	Kirchheimbolanden	Rhyolith (Rotliegend)	Lockerbraunerde
6	6209	IDO	Idar-Oberstein	Quarzit (Devon)	Braunerde-Podsol
7	6108	MOB	Morbach	Quarzit (Devon)	Lockerbraunerde
8	5508	KEM	Adenau	Silt- und Feinsandstein (Devon)	Braunerde-Podsol
9	6308	BIW	Hermeskeil 1	Sandstein (Devon)	Pseudogley-Podsol (Schurf), Podsol-Braunerde (EP1), Podsol (EP2)
10	6308	BIW	Hermeskeil 2	Sandstein (Devon)	Pseudovergleyte Lockerbraunerde (Schurf), Podsol-Braunerde (EP1, 2)
11	5604	HAL	Schneifel 2	Ton- und Siltstein (Devon)	Braunerde
12	5704	PRM	Schneifel 1	Quarzit (Devon)	Pseudovergleyte Podsol-Braunerde (Schurf), Podsol-Braunerde
13	5512	MON	Neuhäusel 1	Bimslapilli, Lösslehm (Quartär)	Lockerbraunerde
14	5512	MON	Neuhäusel 2	Sandstein (Devon)	Lockerbraunerde (Schurf, EP1), Podsol-Braunerde (EP2)
15	6914	SAI	Hagenbach	fluviatiler Sand (Quartär)	Gley (Schurf, EP2), Braunerde-Gley (EP1)
16	5314	REN	Wallmerod	Basalt (Tertiär)	Podsoliger Pseudogley

Erläuterung: TK 25 = Topographische Karte 1:25.000, EP = Eckpunkte

2 METHODEN

2.1 Probennahme

Eine Bodendauerbeobachtungsfläche besteht aus einer Kernfläche mit einer Kantenlänge von 50 m innerhalb eines abgezaunten Bereichs variierender Größe. Die Eckpunkte der Kernflächen sind mit GPS-eingemessenen Vermessungsposten gekennzeichnet. Auf der Kernfläche sind 4 Reihen mit jeweils 6 Rasterpunkten markiert (Abb. 2).

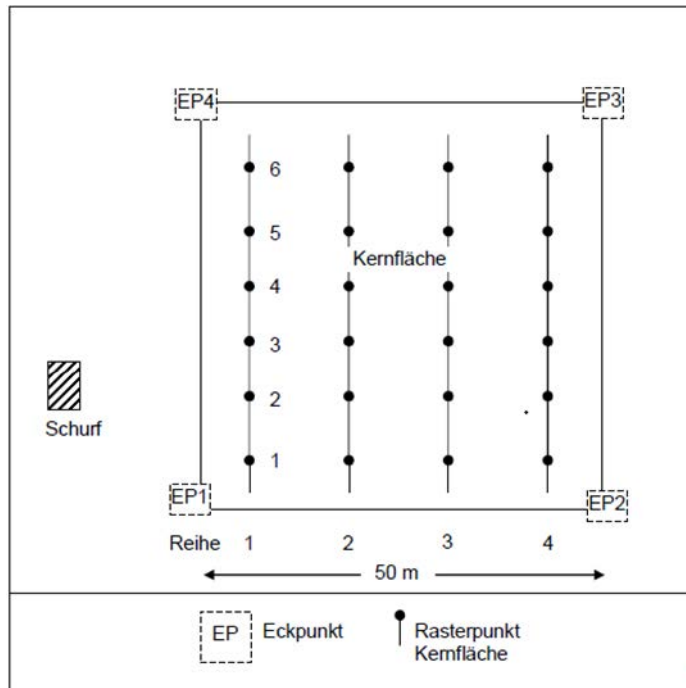


Abb. 2: Beprobungsschema von BDF in Rheinland-Pfalz

Im Jahr 1993 wurden die zwischen 1989 und 1991 angelegten forstlichen Umweltkontrollstellen, die heute als BDF-Standorte dienen, einer ersten Beprobung unterzogen (ZOTH & BLOCK, 1993).

Im Jahr 2009 erfolgten eine Profilaufnahme am Schurf und die Beprobung ausgewählter Eckpunkte mittels Rammkernsondierung. Auf Basis der Profilaufnahme wurde eine detaillierte Standortbeschreibung erstellt (DEHNER et al. 2012). Die Beprobung der Kernfläche wurde im Jahr 2009 und 2010 durchgeführt (im Folgenden 1. Kernflächenbeprobung 2010).

Die 2. Kernflächenbeprobung fand in den Jahren 2022 bis 2024 statt (im Folgenden 2. Kernflächenbeprobung 2022). Von einer erneuten Profilaufnahme sowie weiteren Rammkernsondierungen der Eckpunkte wurde abgesehen, da der Status 2009 als unverändert angenommen wird.

2.1.1 Probennahme Schurf und Eckpunkte 2009

Neben Proben für die bodenchemische Analyse wurden mittels Stechzylinder bzw. Stechkappen ungestörte Proben am Schurf zur Bestimmung von Trockenrohdichte und Porenvolumen entnommen. Diese Beprobung erfolgte horizontweise.

An den Eckpunkten der Bodendauerbeobachtungsflächen wurden, aufgrund zum Teil hoher Variabilität der Horizontierung, jeweils die EP 1 und 3 einzeln beprobt und keine Mischproben gebildet. Die Probennahme erfolgte mittels Rammkernsondierung und Murach'schem Wurzelbohrer. Der Mineralboden wurde nach Tiefenstufen beprobt (TS 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-60, 60-90, 90-140 und 140-200 cm). Die organische Auflage wurde mittels Stechrahmen und bei mächtigeren Auflagen mittels Murach'schem Wurzelbohrer beprobt.

2.1.2 Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Bei der 1. Kernflächenbeprobung 2010 wurde größtenteils bis zu einer Tiefe von 30 cm beprobt, in Ausnahmefällen bis zu 90 cm. Die Probennahme erfolgte mittels Murach'schem Wurzelbohrer und wurde in der organischen Auflage sowie im Mineralboden in den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm (wenn möglich 30-60 cm und 60-90 cm) durchgeführt. Je Tiefenstufe wurden jeweils 3 Proben einer Reihe zu einer Mischprobe zusammengeführt. Die organische Auflage wurde als eine Einheit betrachtet und nicht differenziert beprobt.

Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 wurde bis zu einer Tiefe von mindestens 60 cm und, dort wo es möglich war, bis zu einer Tiefe von 90 cm beprobt. Die gewählten Tiefenstufen entsprechen denen der 1. Kernflächenbeprobung 2010. Es wurden jedoch aus 6 Proben einer Reihe eine Mischprobe erstellt, so dass jeweils 4 Reihenmischproben pro Tiefenstufe zur Verfügung stehen (Abb. 3). Aus allen Proben wurde pro BDF und je Tiefenstufe eine Flächenmischprobe hergestellt. Dies war 2010 nicht der Fall (Tab. 2).

Aufgrund anhaltender ungünstiger Witterungsbedingungen und sehr hoher Grundwasserstände war im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 keine umfassende Beprobung der BDF 15 - Hagenbach möglich. Es konnten nur Proben bis zu einer Tiefe von 10 cm entnommen werden. Diese wurden auf organische Schadstoffe untersucht. Eine weitere Beprobung der organischen Auflage und der Tiefenstufen 0 bis 90 cm erfolgte im September und Oktober 2025. Die Analytik wird im LGB im Jahr 2026 erfolgen. Eine Veröffentlichung als separater Kurzbericht findet im Nachgang statt.

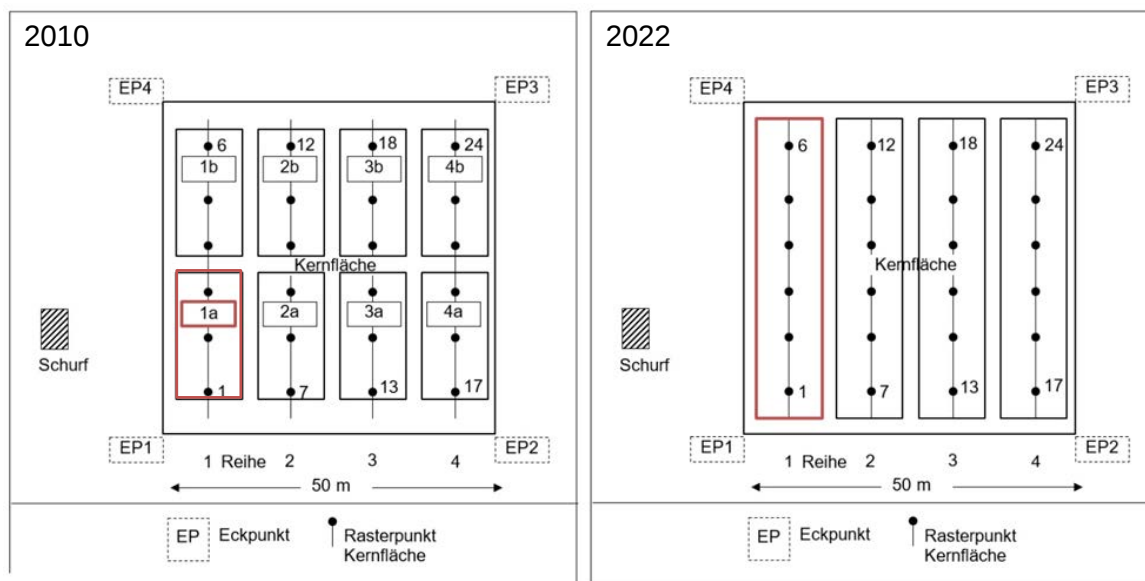


Abb. 3: Beprobungsschema der 1. Kernflächenbeprobung 2010 und 2. Kernflächenbeprobung 2022

Tab. 2: Gegenüberstellung der hergestellten Mischproben der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

1. Kernflächenbeprobung 2010		2. Kernflächenbeprobung 2022	
zusammengefasste Punkt je Tiefenstufe	Mischprobe	zusammengefasste Punkte je Tiefenstufe	Mischprobe
1-3	1a	1-6	1
4-6	1b	7-12	2
7-9	2a	13-18	3
10-12	2b	19-24	4
13-15	3a	1-24	1-4
16-18	3b		
19-21	4a		
22-24	4b		

2.2 Labormethoden

Die bodenchemischen und -physikalischen Parameter wurden im Labor des LGB untersucht.

Zur Bestimmung der Gehalte organischer Schadstoffe wurde ein externes Labor beauftragt. Zur Eluatherstellung im Zuge der Bestimmung der PFAS-Konzentrationen im Bodeneluat wurde aufgrund hoher Humusgehalte in der organischen Auflage ein Elutionsverhältnis von 10:1 nach DIN EN 12457-4 (2008) angewandt. Somit wurde den Empfehlungen gemäß BMUKN (2022) gefolgt. Um die Ergebnisse in der Tiefenverteilung miteinander vergleichen zu können, wurde dieses Elutionsverhältnis auch für die Mischproben im mineralischen Oberboden angewendet. In der folgenden Tabelle (Tab. 3) sind angewendeten Methoden der Probenvorbereitung und Analytik beschrieben.

Tab. 3: Methoden der Probenvorbereitung und Analytik

Parameter	Methoden 2010	Methoden 2022
Bodenchemische Parameter		
Probenaufbereitung	DIN ISO 11464	DIN ISO 11464
pH-Wert (CaCl ₂), (H ₂ O)	DIN ISO 10390	DIN ISO 10390
Gesamtkohlenstoff (C _{ges})	DIN ISO 10694	DIN ISO 10694
Carbonate	Volumetrische Bestimmung nach SCHEIBLER, DIN ISO 10693	Volumetrische Bestimmung nach SCHEIBLER, DIN ISO 10693
Organischer Kohlenstoff (C _{org})	berechnet nach DIN ISO 10694	berechnet nach DIN ISO 10694
Gesamtstickstoff (N _{ges})	DIN ISO 13878	DIN ISO 13878
Effektive Austauschkapazität in carbonatfreien Böden	BZE-Verfahren (vgl. Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2005)	BZE-Verfahren (vgl. Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2005)
Königswasser-Extraktion Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Zn	DIN ISO 11466 As, Cr, Hg, Ni wurde nur im Mineralboden analysiert	DIN ISO 11466
Ammoniumnitrat-Extraktion Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Zn	Wurde im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 nicht durchgeführt	DIN 19730
Citrat-Extraktion: Ca, K, Mg, P	Wurde im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 nicht durchgeführt	Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2005
¹³⁷ Cäsium	Wurde im Rahmen der Statusbeprobung 2009 durchgeführt	Gammaspektroskopie

Parameter	Methoden 2010	Methoden 2022
Organische Schadstoffe		
Polychlorierte Dibenzodioxine/ -furane (PCDD/F)	nach Klärschlammverordnung unter Beachtung von DIN 38414-24	DIN EN 16190
	Summenparameter TEQ NATO, TEQ WHO 1997	Summenparameter TEQ NATO, TEQ WHO 2005
Organochlorpestizide, schwer- flüchtige Kohlenwasserstoffe und PCB	DIN ISO 10382, DIN 38414 S20	DIN ISO 10382, DIN 38414 S20
PAK	DIN ISO 18287 (GC-MS)	DIN ISO 18287 (GC-MS)
PFAS Feststoff	wurde im Rahmen der Status- und 1. Kernflächenbeprobung 2010 nicht durchgeführt	DIN 38141-14
PFAS Eluat		Eluatherstellung: DIN EN 12457-4Messung: DIN 38707
Bodenphysik (nur Statusbeprobung 2009) (DEHNER ET AL. 2012)		

Während im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 gemahlene Proben für die Königswasser-Extraktion verwendet wurden, kamen während der Folgebeprobung 2022 ungemahlene Proben zum Einsatz. Zudem wurden im Rahmen der Erstbeprobung 2010 die Gesamtgehalte der Schwermetalle Chrom, Nickel, und Quecksilber, sowie Arsen mittels Königswasser-Extraktion in der organischen Auflage nicht bestimmt.

2.3 Bestimmungsgrenzen

Die Bestimmungsgrenzen (BG) der analytischen Methoden sind 2022 im Vergleich zur 1. Kernflächenbeprobung 2010 deutlich gesunken. Dennoch muss beachtet werden, dass die Bestimmungsgrenze diverser Parameter in Einzelproben aufgrund von Matrixeffekten angehoben wurde.

Tab. 4: Analytik sowie Bestimmungsgrenzen relevanter Elemente

Element	Analytik	KW-Extraktion nach DIN ISO 11466		NH ₄ NO ₃ -Extraktion nach DIN 19730		Einheit
		BG 2010	BG 2022	BG 2009	BG 2022	
Aluminium (Al)	DIN EN ISO 17294-2	6	3	0,5	0,2	mg/kg
Arsen (As)	DIN EN ISO 17294-2	0,3	0,2	0,02	0,001	mg/kg
Blei (Pb)	DIN EN ISO 17294-2	0,4	0,1	0,03	0,004	mg/kg
Cadmium (Cd)	DIN EN ISO 17294-2	0,06	0,01	0,004	0,001	mg/kg
Calcium (Ca)	DIN EN ISO 17294-2	10	3	1	0,1	mg/kg
Chrom (Cr)	DIN EN ISO 17294-2	0,2	0,1	0,015	0,001	mg/kg
Eisen (Fe)	DIN EN ISO 17294-2	3	1	0,1	0,01	mg/kg

Element	Analytik	KW-Extraktion nach DIN ISO 11466		NH ₄ NO ₃ -Extraktion nach DIN 19730		Einheit
		BG 2010	BG 2022	BG 2009	BG 2022	
Kalium (K)	DIN EN ISO 17294-2	50	10	4	0,1	mg/kg
Kupfer (Cu)	DIN EN ISO 17294-2	0,2	0,1	0,01	0,001	mg/kg
Magnesium (Mg)	DIN EN ISO 17294-2	1	1	0,07	0,09	mg/kg
Mangan (Mn)	DIN EN ISO 17294-2	0,2	1,18	0,01	0,005	mg/kg
Natrium (Na)	DIN EN ISO 17294-2	2,8	2	0,21	0,05	mg/kg
Nickel (Ni)	DIN EN ISO 17294-2	0,5	0,1	0,03	0,001	mg/kg
Phosphor (P)	DIN EN ISO 17294-2	20	5	n.a.	19	mg/kg
Quecksilber (Hg)	DIN EN 1483	0,006	0,005	0,0001	0,0001	mg/kg
Zink (Zn)	DIN EN ISO 17294-2	1,2	0,2	0,08	0,01	mg/kg

Erläuterung: KW = Königswasser, NH₄NO₃ = Ammoniumnitrat

Tab. 5: Bestimmungsgrenzen organischer Schadstoffe 2010 und 2022

	BG 2010	BG 2022	Einheit
Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS)			
PFAS Feststoff	keine PFAS-Analytik	0,1	mg/kg
PFAS Eluat	keine PFAS-Analytik	0,001	mg/l
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)			
2,3,7,8-TCDD	0,1	0,03	ng/kg
1,2,3,7,8-PeCDD	0,15	0,03	ng/kg
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,3	0,03	ng/kg
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,3	0,03	ng/kg
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,3	0,03	ng/kg
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,5	0,03	ng/kg
OctaCDD	1,0	0,03	ng/kg
2,3,7,8-TCDF	0,2	0,03	ng/kg
1,2,3,7,8-PeCDF	0,15	0,03	ng/kg
2,3,4,7,8-PeCDF	0,15	0,03	ng/kg
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,3	0,03	ng/kg
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,3	0,03	ng/kg
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,3	0,03	ng/kg
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,3	0,03	ng/kg
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,5	0,03	ng/kg
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,5	0,03	ng/kg
OctaCDF	1,0	0,03	ng/kg
Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB)		0,1	ng/kg
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	0,01	0,001	mg/kg

	BG 2010	BG 2022	Einheit
Polyzyklische aromatische Chlorkohlenwasserstoffe (PAK)			
Naphthalin	0,005	0,001	mg/kg
Acenaphthylen	0,005	0,001	mg/kg
Acenaphthen	0,005	0,001	mg/kg
Fluoren	0,005	0,001	mg/kg
Phenanthren	0,005	0,001	mg/kg
Anthracen	0,005	0,001	mg/kg
Fluoranthren	0,005	0,001	mg/kg
Pyren	0,005	0,001	mg/kg
Benzo(a)anthracen	0,005	0,002	mg/kg
Chrysen	0,005	0,001	mg/kg
Benzo(b)fluoranthren	0,005	0,001	mg/kg
Benzo(k)fluoranthren	0,005	0,004	mg/kg
Benzo(a)pyren	0,005	0,003	mg/kg
Dibenz(ah)anthracen	0,005	0,001	mg/kg
Benzo(ghi)perylene	0,005	0,001	mg/kg
Ideno(1,2,3-cd)pyren	0,005	0,003	mg/kg
Organochlorpestizide und schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe			
Aldrin	0,02	0,001	mg/kg
o,p'-DDD	0,02	0,001	mg/kg
p,p'-DDD	0,02	0,001	mg/kg
o,p'-DDE	0,02	0,001	mg/kg
p,p'-DDE	0,02	0,001	mg/kg
o,p'-DDT	0,2	0,001	mg/kg
p,p'-DDT	0,2	0,001	mg/kg
Dieldrin	0,02	0,001	mg/kg
Endrin	0,02	0,001	mg/kg
Heptachlor	0,04	0,001	mg/kg
Heptachlorpoxid	0,02	0,001	mg/kg
Hexachlorbenzol	0,02	0,001	mg/kg
α -HCH	0,02	0,001	mg/kg
β -HCH	0,02	0,001	mg/kg
γ -HCH (Lindan)	0,02	0,001	mg/kg
δ -HCH	0,02	0,001	mg/kg
ϵ -HCH	0,02	0,001	mg/kg
Methoxychlor	0,2	0,001	mg/kg
Pentachlorbenzol	0,02	0,001	mg/kg
Pentachlorphenol	0,1	var. < 0,005	mg/kg

Erläuterung: BG = Bestimmungsgrenze

2.4 Berechnung der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Elementvorräte

Die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte werden mittels folgender Formelfolge berechnet:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad V_{\text{ges}} [\text{m}^3/\text{ha}] &= h [\text{m}] * A [\text{m}^2/\text{ha}] \\
 (2) \quad V_{\text{FB}} [\text{m}^3/\text{ha}] &= V_{\text{ges}} [\text{m}^3/\text{ha}] / 100 [\text{Vol-}\%] * \varphi_{\text{FB}} [\text{Vol-}\%] \\
 (3) \quad m_{\text{FB}} [\text{kg}/\text{ha}] &= V_{\text{FB}} [\text{m}^3/\text{ha}] * \text{TRD} [\text{kg}/\text{m}^3] \\
 (4) \quad m_{\text{Corg}} [\text{kg}/\text{ha}] &= m_{\text{FB}} [\text{kg}/\text{ha}] * (w_{\text{Corg}} [\%] / 100 [\%]) \\
 (5) \quad m_{\text{Corg}} [\text{t}/\text{ha}] &= m_{\text{Corg}} [\text{kg}/\text{ha}] / 1000 [\text{kg}/\text{t}]
 \end{aligned}$$

mit $A = 1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2$

V_{ges} = Gesamtvolumen Boden $[\text{m}^3/\text{ha}]$

V_{FB} = Volumen Feinboden (Korngröße $< 2 \text{ mm}$) $[\text{m}^3/\text{ha}]$

φ_{FB} = Volumenanteil Feinboden $[\text{Vol-}\%]$

m_{FB} = Feinbodenvorrat $[\text{kg}/\text{ha}]$

TRD = Trockenrohdichte $[\text{kg}/\text{m}^3]$

w_{Corg} = Massenanteil C_{org} , N_{ges} $[\%]$

m_{Corg} = Kohlenstoffvorrat $[\text{kg}/\text{ha}]$ bzw. $[\text{t}/\text{ha}]$ (analog N_{ges})

Zur Berechnung der Vorräte der austauschbaren Elemente Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium werden für die organische Auflage die Messwerte der Bariumchlorid (BaCl_2)-Extraktion und für den Mineralboden die Messwerte der Ammoniumchlorid (NH_4Cl)-Extraktion herangezogen (vgl. Gutachterausschuss Forstliche Analytik 2005). Diese liegen als Ladungsäquivalente in der Einheit $[\text{cmol}/(\text{eq})/\text{kg}]$ vor und werden mittels der molaren Masse und der Wertigkeit der jeweiligen Ionen in den Massenanteil $[\text{mg}/\text{kg}]$ umgerechnet.

$$(6) \quad w_{\text{E}} [\text{mg}/\text{kg}] = (10 * \text{Leq} [\text{cmol}/(\text{eq})/\text{kg}] * M_{\text{E}} [\text{g}/\text{mol}]) / z_{\text{E}}$$

mit w_{E} = Massenanteil Element $[\text{mg}/\text{kg}]$

Leq = Ladungsäquivalent

M_{E} = molare Masse Element in g/mol (Tab. 6:)

z_{E} = Wertigkeit Element

Tab. 6: Wertigkeit und molare Masse der Elemente Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Natrium (Na)

Element	Wertigkeit z	Molare Masse $[\text{g}/\text{mol}]$
Calcium (Ca)	2	40,08
Magnesium (Mg)	2	24,32
Kalium (K)	1	39,10
Natrium (Na)	1	22,99

Zur weiteren Berechnung der Vorräte der Elemente Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium und Phosphor (P) (liegt in mg/kg vor) werden anstatt der Schritte (4) und (5) folgende Rechenschritte ausgeführt:

$$(7) \quad m_E \text{ [mg/ha]} = m_{FB} \text{ [kg/ha]} * w_E \text{ [mg/kg]}$$

$$(8) \quad m_E \text{ [kg/ha]} = m_E \text{ [mg/ha]} / 10^6 \text{ [mg/kg]}$$

mit w_{Element} = Massenanteil Element [mg/kg]

Die Einteilung des Grobbodenanteils nach Ad-hoc-AG Boden (2005) wurde zur Bestimmung des Volumenanteils des Feinbodens herangezogen (Tab. 7).

Die Trockenrohdichte wurde aus zwei Quellen hinzugezogen:

- 1) Bewertung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) (Tab. 8)
- 2) Messwerte der FAWF zur 2. Kernflächenbeprobung 2022
(beprobte mit Murach'schem Wurzelbohrer)

Tab. 7: Volumenanteil (ϕ_{GB}) abgeleitet nach Ad-hoc-AG Boden (2005)

Klasse	Beschreibung	ϕ_{GB} [Vol-%]	UG	OG	ϕ_{GB} (MW) [Vol-%]	Hinweis
1	sehr schwach	< 2	0	2	1	fix
2	schwach	2 bis < 10	2	10	6	berechnet
3	mittel	10 bis < 25	10	25	17,5	berechnet
4	stark	25 bis < 50	25	50	37,5	berechnet
5	sehr stark	50 < 75	50	75	62,5	berechnet
6	extrem stark	≥ 75	75	100	87,5	fix

Erläuterung: GB = Grobboden, MW = Mittelwert UG/OG

Tab. 8: Trockenrohdichte (TRD) abgeleitet nach Ad-hoc-AG Boden (2005)

Klasse	Beschreibung	TRD [g/cm ³]	UG	OG	TRD (MW) [g/cm ³]	Hinweis
1	sehr gering	< 1,2	0	1,2	1,1	fix
2	gering	1,2 - 1,4	1,2	1,4	1,3	berechnet
3	mittel	1,4 - 1,6	1,4	1,6	1,5	berechnet
4	hoch	1,6 - 1,8	1,6	1,8	1,7	berechnet
5	sehr hoch	> 1,8	1,8		1,9	fix

Erläuterung: MW = Mittelwert UG/OG

2.5 Datenaufbereitung und Datenqualität

2.5.1 Vergleichbarkeit der Flächenmischproben 2010 und 2022

Die Auswertung wurde anhand der Werte der Flächenmischproben beider Kernflächenbeprobungen durchgeführt. Diese wurden ausgewählt, um gegebene räumliche Heterogenitäten auszugleichen und somit den Einfluss auf den Vergleich beider Kernflächenbeprobungen zu minimieren.

Diese Flächenmischproben stehen bei der aktuellen 2. Kernflächenbeprobung pro BDF für jede Tiefenstufe zur Verfügung. Im Gegensatz dazu wurden im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 keine Flächenmischproben pro BDF und Tiefenstufe zusammengestellt und analysiert. Aus diesem Grund wurden für diese Beprobung Mittelwerte der Ergebnisse der Teilmischproben 1a bis 4b pro Tiefenstufe berechnet (Tab. 2). Die Mittelwerte wurden mit den Ergebnissen der Flächenmischproben aus der aktuellen 2. Kernflächenbeprobung verglichen.

Um sicherzustellen, ob die berechneten Mittelwerte von Reihenmischproben grundsätzlich für einen Vergleich geeignet sind, wurden diese auch für die aktuelle Probennahme berechnet und mit den Werten der Flächenmischproben verglichen. Die statistische Auswertung dazu ist in Abb. 4 und Abb. 5 grafisch dargestellt.

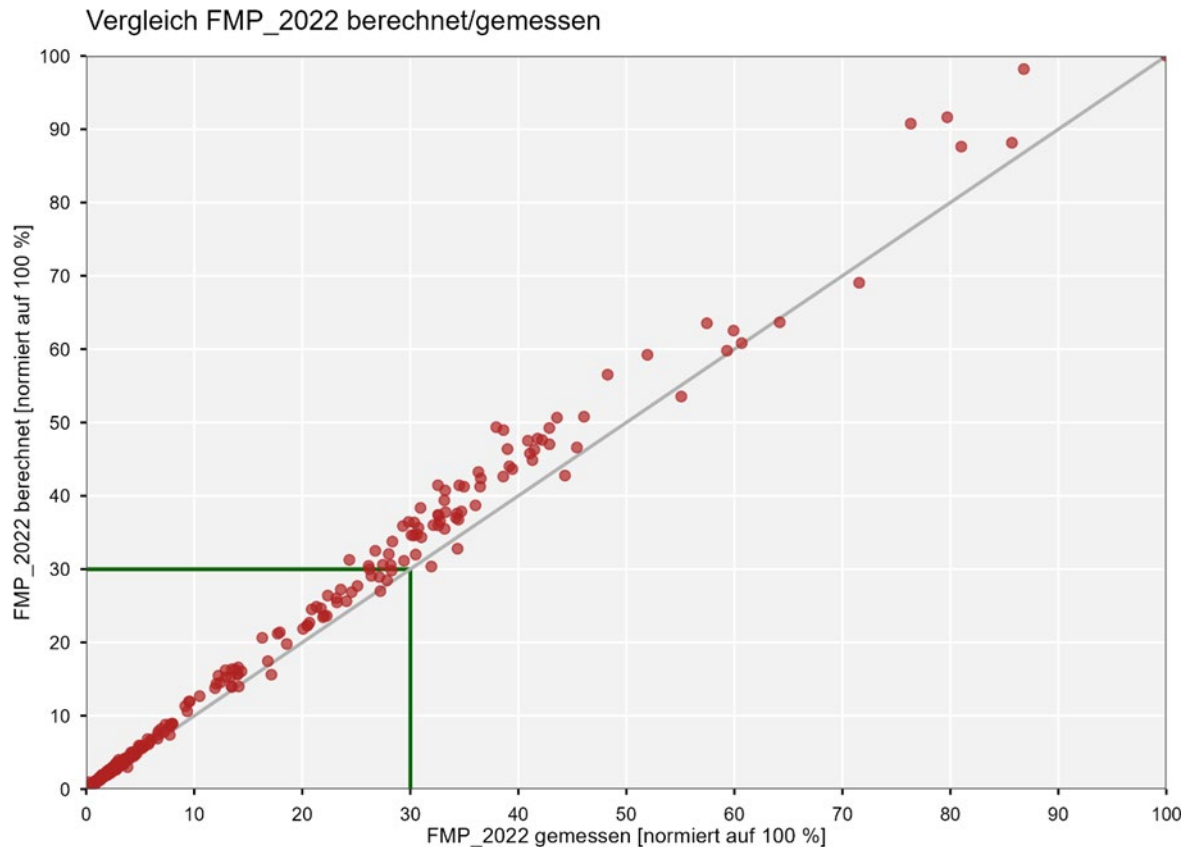


Abb. 4 : Vergleich gemessener und berechneter Werte je Tiefenstufe der Flächenmischprobe 2022

Abb. 4 vergleicht die gemessenen Werte ausgewählter Parameter (pH-Wert, C_{org} , N_{ges} , As und Schwermetalle) der Flächenmischproben mit den berechneten Mittelwerten der Teilmischproben 1 bis 4 der 2. Kernflächenbeprobung 2022. Um eine grafische Darstellung zu ermöglichen wurden diese Messwerte auf 100 % normiert.

Im Vergleich liegen die Werte nahe der Ideallinie ($y = x$), was eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten zeigt. Besonders im Bereich kleiner Werte (0-30 %) ist die Abweichung sehr gering. Bei höheren Werten nimmt die Abweichung zu. Grundsätzlich ist jedoch keine systematische Verschiebung erkennbar. Es gibt keine extremen Ausreißer.

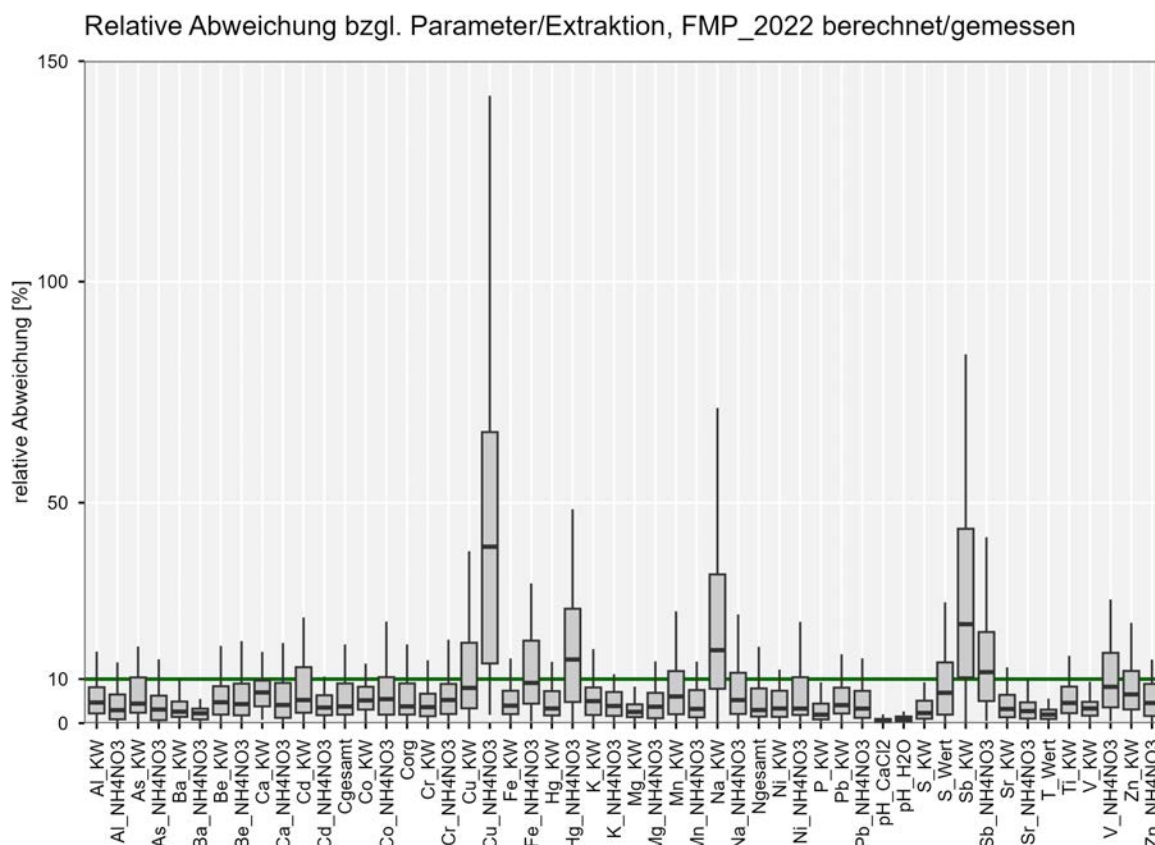


Abb. 5: Relative Abweichung von gemessenen zu berechneten Werten der 2. Kernflächenbeprobung 2022

Abb. 5 zeigt die relative Abweichung der gemessenen zu den berechneten Werten als Boxplot. Bis auf wenige Ausnahmen liegen alle Werte in einem Bereich unter 10 % Fehlerquote.

Aufgrund der guten Übereinstimmung gemessener und berechneter Werte der 2. Kernflächenbeprobung 2022 lässt sich schlussfolgern, dass die berechneten Mittelwerte der Teilmischproben 1a bis 4b der 1. Kernflächenbeprobung 2010 zur vergleichenden Auswertung mit den Flächenmischproben der 2. Kernflächenbeprobung 2022 herangezogen werden können.

2.5.2 Vergleich der Trockenrohdichten nach AG Boden und der Messwerte der FAWF

Die Trockenrohdichte geht als wichtiger Parameter in die Berechnung der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Elementvorräte mit ein. Dazu wurden zwei Quellen herangezogen:

- 1) Bewertung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) (Tab. 8)
- 2) Messwerte der FAWF zur 2. Kernflächenbeprobung 2022 (beprobte mit Murach'schem Wurzelbohrer)

Die im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 durch die FAWF gemessenen Trockenrohdichten sind mit wenigen Ausnahmen deutlich geringer als die Abschätzungen nach Ad-hoc-AG Boden (2005).

Somit kommt es bei der Auswertung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) zu einer Überschätzung der Trockenrohdichten, was in der Folge zu höheren Kohlenstoff-, Stickstoff- und Elementvorräten führt.

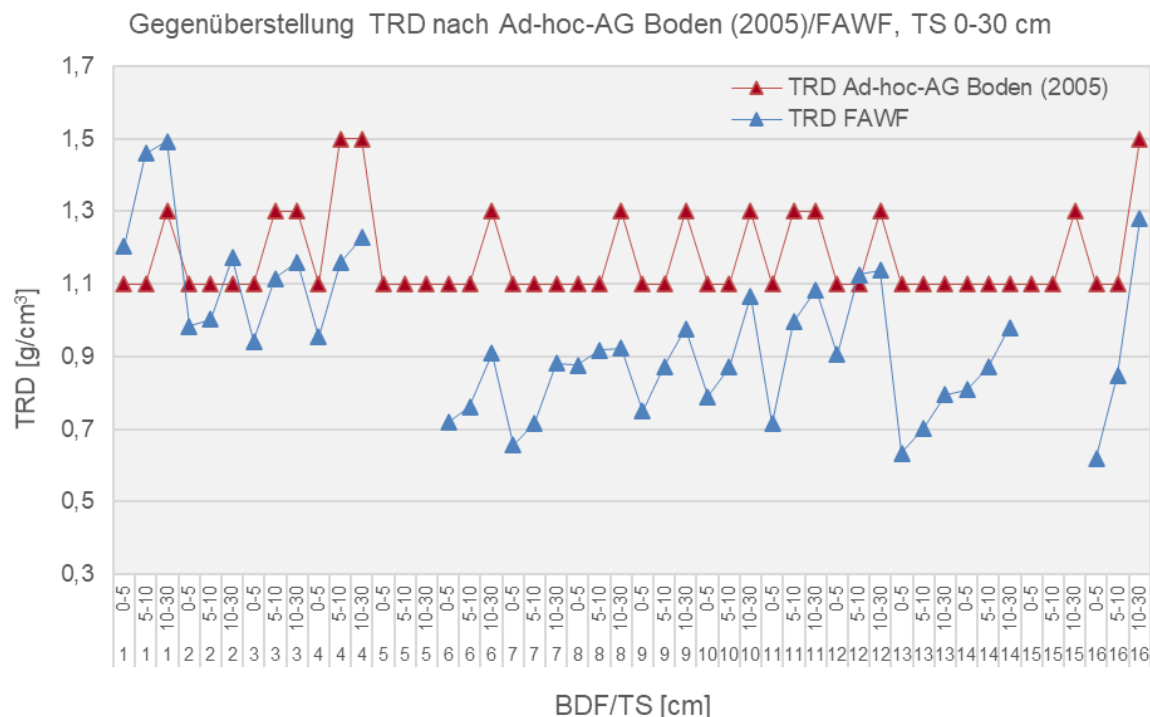


Abb. 6: Gegenüberstellung der Trockenrohdichten im Mineralboden bis 30 cm nach Ad-hoc-AG Boden (2005) und durch Messwerte der FAWF

2.5.3 Vergleichbarkeit der spezifischen Aktivität von $^{137}\text{Cäsium}$

Die spezifische Aktivität von $^{137}\text{Cäsium}$ wurde im Rahmen der Statusbeprobung 2009 an den Proben der Eckpunkte, sowie im Zuge der 2. Kernflächenbeprobung 2022 an der Flächenmischprobe bestimmt. Zudem wurden die Ergebnisse jeweils mittels Zerfallsgleichung (9) auf den 01.01.1997 (Referenzdatum des LGB) normiert, um Messwerte beider Probenahmen vergleichbar zu machen und zerfallsunabhängige Mobilisierungsprozesse herausarbeiten zu können:

$$(9) N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 fand keine $^{137}\text{Cäsium}$ -Analytik statt. Da die Probenahme der Eckpunkte horizontbezogen stattfand, wurden die spezifische $^{137}\text{Cäsium}$ -Aktivität mittels gewichteter Mittelwerte in Tiefenstufen umgerechnet, um die Statusbeprobung 2009 mit der 2. Kernflächenbeprobung 2022 vergleichen zu können.

2.5.4 Toxizitätsäquivalente von Dioxinen, Furanen und dl-PCB

Dioxine und Furane liegen stets als Gemisch von Einzelverbindungen (Kongeneren) unterschiedlicher Zusammensetzung vor. Es wird davon ausgegangen, dass die verschiedenen Einzelverbindungen die gleichen toxischen Wirkmechanismen haben und sich nur in der Stärke ihrer Wirkung unterscheiden. Diese unterschiedliche Wirkungsstärke wird mit einem Faktor, dem Toxizitätsäquivalentfaktor (TEF), berücksichtigt. Dabei wird dem hochgiftigen 2,3,7,8 Tetrachlor-Dibenzo-p-Dioxin (2,3,7,8 TCDD), auch bekannt als „Seveso-Gift“ ein TEF von 1 zugewiesen. Die TEF aller anderen Verbindungen stehen im Verhältnis dazu. Die toxische Wirkung des Gesamtgemisches ergibt sich aus der Multiplikation der Gehalte der Einzelverbindungen mit dem zugehörigen TEF und die darauffolgende Addition der Werte zur Berechnung des Toxizitätsäquivalents (TEQ). Das TEQ ergibt sich aus folgender Formel:

$$(10) \text{ TEQ} = \sum_i (C_i \times \text{TEF}_i)$$

Für die Auswertung der BDF ergibt sich das TEQ gemäß der Bewertung durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 2005 aus der Summe der Produkte aus Konzentration c und TEF von 7 Dioxinen und 10 Furanen. Das TEQ gemäß dieser Bewertung zieht zudem noch weitere Verbindungen hinzu, darunter zwölf dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB). Diese weisen eine den PCDD/PCDF ähnliche räumliche Molekülstruktur, eine vergleichbare Elektronenverteilung sowie eine ähnliche toxische Wirkung auf (VAN DEN BERG et al. 2006).

3 ERGEBNISSE

3.1 Baumbestand und Streufall

Der Baumbestand und damit die Art des Streufalls haben einen direkten Einfluss auf die Eigenschaften der organischen Auflage. Je nach Baumart unterscheidet sich die Zusammensetzung des Streufalls (Blätter, Nadeln) und bestimmt maßgeblich die resultierenden Eigenschaften, wie Humusform, Dichte, pH-Wert, den Gehalt an organischem Kohlenstoff und somit das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis bezogen auf organischen Kohlenstoff. Diese Faktoren bestimmen, in welchem Umfang Schadstoffe gebunden bzw. mobilisiert werden können.

Die erschwerte Zersetzung von Nadelstreu und die stetige Anreicherung organischer Säuren führt in Böden zu einer niedrigen biologischen Aktivität und zu niedrigen pH-Werten, was die Zersetzung zusätzlich hemmt und dadurch die fortschreitende Versauerung sowie die Ausbildung von Rohhumus begünstigt. Dieser Prozess wird durch anthropogene Säureinträge seit der Mitte des 19. Jahrhunderts verstärkt. Es kommt zur Humusakkumulation, die sich in hohen Auflagemächtigkeiten widerspiegelt. Durch die verzögerte Mineralisierung ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff hoch, ebenso das C/N-Verhältnis.

Laub ist in der Regel leichter abbaubar als Nadeln und wird unter entsprechend günstigen Bedingungen wesentlich schneller mikrobiell umgesetzt. Es bilden sich bevorzugt Moder und Mull. Zudem findet eine beschleunigte Freisetzung der basischen Kationen statt, was einer Versauerung entgegenwirkt. Laub enthält zudem mehr Stickstoff als Nadeln. Dieser wird freigesetzt und abgebaut, wodurch der Gehalt an organischem Kohlenstoff sinkt. Das C/N-Verhältnis ist dadurch insgesamt niedriger als bei Böden unter Nadelbaumbeständen. Es bilden sich meist nur wenig mächtige organische Auflagen.

Der Hauptmasseneintrag von Laub an Laubbaumstandorten findet im Herbst statt. Die gemessene Trockenrohdichte der organischen Auflage hängt also vom Zeitpunkt der Probenahme ab. Standorte mit Nadelbestand weisen aufgrund des nur teilweisen Abwurfs der Gesamtnadelmasse und der geringen Zersetzungsrate der Nadeln in der Regel eine wenig ausgeprägte saisonale Variabilität der Humusauflage auf.

Geringe Trockenrohdichten gehen mit einem höheren Porenvolumen einher. Dies kann einerseits die Durchlässigkeit fördern, andererseits jedoch in Abhängigkeit von der Porengröße gegebenenfalls eine große Oberfläche für Sorptionsprozesse bereitstellen. Das Sorptionsverhalten selbst ist jedoch ebenso vom zu bindenden Stoff und weiteren Faktoren abhängig (vor allem vom pH-Wert und Humusgehalt).

Aufgrund ihres stärkeren Auskämmvermögens, bedingt durch ganzjährig benadelte Kronen und einer höheren Oberfläche pro Flächeneinheit, filtern Nadelbäume im Verhältnis zu Laubbäumen mehr Stoffe aus der Atmosphäre. Mit den Niederschlägen gelangen höhere Nähr- und Schadstofffrachten in die organische Auflage und in den Mineralboden.

Im Folgenden wird lediglich nach Laub- und Nadelbaumstandorten unterschieden. In die Gruppe der Nadelbaumstandorte wurden ebenso Mischwaldstandorte zugeordnet, die Nadelbaum-Dominanz aufweisen.

Die Messwerte der untersuchten BDF (Tab. 9 und Tab. 10) spiegeln größtenteils all die oben genannten Zusammenhänge wider.

Der Anteil an Kohlenstoff erreicht im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung in der organischen Auflage vor allem bei Laubbaumstandorten geringere Werte, was auf mögliche Einmischung von mineralischem Oberboden in Auflagenmaterial bei der Probennahme zurückgeführt werden kann. Dennoch können folgende Trends abgeleitet werden:

Die Auflagenmächtigkeiten an Nadelbaumstandorten sind höher als an Laubbaumstandorten. An Nadelbaumstandorten wurde ungeachtet standortspezifischer Bedingungen in der organischen Auflage und im mineralischen Oberboden (Tiefenstufe 0-5 cm) geringere pH-Werte als an Laubbaumstandorten festgestellt. Verbunden mit höheren Kohlenstoffgehalten nimmt die Trockenrohdichte ab (vgl. Anhang Abb. A1, Abb. A2, Abb. A3 und Abb. A4).

Tab. 9: Übersicht über Auflagenmächtigkeit, Trockenrohdichte, Kohlenstoffanteil, C/N-Verhältnis und Bodentyp der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022

BDF	Streufall	Horizont Auflage	Mächtigkeit [cm]	TRD FAWF [g/cm ³]	pH (CaCl ₂)	C _{org} [%]	C/N	Bodentyp (Schurf, EP) (Status 2009)
2	Laub	L/Of/Oh	6,0	0,49	3,5	9,5	18,7	Podsolige Braunerde
4	Laub	L/Of/Oh	3,5	0,30	4,2	12,3	19,1	Braunerde
5	Laub	L/Of/Oh	3,0	n.a.	4,7	37,9	20,7	Lockerbraunerde
11	Laub	L/Of	3,0	0,22	3,8	23,0	20	Braunerde
13	Laub	L/Of/Oh	5,5	0,35	4,1	18,3	18	Lockerbraunerde
14	Laub	L/Of/Oh	5,0	0,37	3,6	16,7	19	Lockerbraunerde, Podsol-Braunerde
15	Laub	Of	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Gley, Braunerde-Gley
1	Nadeln	L/Of/Oh	10,5	0,23	3,1	36,9	25	Gley-Podsol
3	Nadeln	L/Of/Oh	9,0	0,29	2,9	29,4	28	Podsol, Braunerde-Podsol
6	Nadeln	L/Of/Oh	12,0	0,17	2,9	34,4	23	Braunerde-Podsol
7	Nadeln	L/Of/Oh	6,0	0,34	3,6	24,7	24	Lockerbraunerde
8	Nadeln	L/Of/Oh	11,0	0,18	3,0	38,0	26	Braunerde-Podsol
9	Nadeln	L/Of/Oh	19,0	0,32	3,3	20,1	21	Pseudogley-Podsol, Podsol-Braunerde, Podsol
10	Nadeln	L/Of/Oh	12,5	0,30	3,0	25,4	23	Pseudovergleyte Lockerbraunerde, Podsol-Braunerde
12	Nadeln	L+Of/Oh	9,0	0,22	3,1	35,2	24	Pseudovergleyte Podsol-Braunerde, Podsol-Braunerde
16	Nadeln	L/Of/Oh	8,5	0,22	3,4	39,2	23	Podsoliger Pseudogley

Tab. 10: Übersicht über Trockenrohdichte, Kohlenstoffanteil, C/N-Verhältnis und Bodentyp der Tiefenstufe 0-5 cm der 2. Kernflächenbeprobung 2022

BDF	TS [cm]	Streufall	TRD FAWF [g/cm ³]	pH (CaCl ₂)	C _{org} [%]	C/N	Bodentyp (Schurf, EP) (Status 2009)
2	0-5	Laub	0,98	3,7	3,38	19	Podsolige Braunerde
4	0-5	Laub	0,95	3,7	3,30	17	Braunerde

BDF	TS [cm]	Streufall	TRD FAWF [g/cm ³]	pH (CaCl ₂)	C _{org} [%]	C/N	Bodentyp (Schurf, EP) (Status 2009)
5	0-5	Laub	n.a.	3,7	14,02	16	Lockerbraunerde
11	0-5	Laub	0,71	3,5	6,14	14	Braunerde
13	0-5	Laub	0,63	4,2	9,46	16	Lockerbraunerde
14	0-5	Laub	0,81	3,9	5,52	18	Lockerbraunerde, Podsol-Braunerde
15	0-5	Laub	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Gley, Braunerde-Gley
1	0-5	Nadeln	1,20	3,3	3,94	23	Gley-Podsol
3	0-5	Nadeln	0,94	3,0	3,28	26	Podsol, Braunerde-Podsol
6	0-5	Nadeln	0,72	3,0	6,54	24	Braunerde-Podsol
7	0-5	Nadeln	0,66	3,4	8,75	27	Lockerbraunerde
8	0-5	Nadeln	0,88	3,1	6,46	31	Braunerde-Podsol
9	0-5	Nadeln	0,75	3,8	6,70	19	Pseudogley-Podsol, Podsol-Braunerde, Podsol
10	0-5	Nadeln	0,79	3,5	7,07	22	Pseudovergleyte Lockerbraun- erde, Podsol-Braunerde
12	0-5	Nadeln	0,91	3,2	6,02	26	Pseudovergleyte Podsol-Braun- erde, Podsol-Braunerde
16	0-5	Nadeln	0,62	3,2	11,95	15	Podsoliger Pseudogley

3.2 Veränderungen auf den Bodendauerbeobachtungsflächen zum Zeitpunkt der 2. Kernflächenbeprobung 2022

Zum Zeitpunkt der 2. Kernflächenbeprobung waren auf sechs BDF-Standorten aufgrund von Borkenkäferbefall die Fichtenbestände teilweise bis vollständig abgestorben. Betroffen sind die BDF 6, 7, 8, 9, 10 und 16 (Tab. 11). Das Derbholz wurde entnommen, dünneres Kronenmaterial verblieb auf der Fläche.

Tab. 11: Übersicht über beräumte und teilberäumte BDF zum Zeitpunkt der 2. Kernflächenbeprobung 2022

BDF	Zustand zum Zeitpunkt 2. Kernflächenbeprobung 2022
6	Entnahme von 50 % des Fichtenaltbestandes
7	Entnahme des Fichtenaltbestandes zeitnah nach 1. Kernflächenbeprobung 2010, vergraste Fläche mit einzelnen Pionierbaumarten
8	Entnahme einzelner Bäume
9	Borkenkäferbefall und Entnahme des Fichtenaltbestandes nach Beprobung
10	Borkenkäferbefall und Entnahme des Fichtenaltbestandes nach Beprobung
16	Freiflächencharakter mit 1/5 Fichten-Naturverjüngung

Im Falle von BDF 6, 8 und 16 ist davon auszugehen, dass sich die teilweise bis vollständige Entnahme des Fichtenaltbestandes vor der aktuellen Probennahme auf die Zusammensetzung der organischen Auflage und des Oberbodens ausgewirkt hat. Darüber hinaus vermindert die Entnahme von Bäumen die Beschattung des Bodens und verändert ebenso die Temperatur-, Wasser- und Windverhältnisse.

3.3 Kohlenstoff, Stickstoff und Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnisse

3.3.1 Organischer Kohlenstoff und Gesamtstickstoff

Bei sehr niedrigen pH-Werten, wie sie in den Böden der BDF vorliegen ($\text{pH}(\text{CaCl}_2)$) von 2,5 bis 5, Kap. 3.4), kann davon ausgegangen werden, dass der Gesamtkohlenstoff dem organischen Kohlenstoff entspricht. Carbonate sind in saurem Milieu nicht stabil und lösen sich auf, während organischer Kohlenstoff stabil gebunden ist. Deshalb wird im Folgenden nur der organische Kohlenstoff (C_{org}) betrachtet.

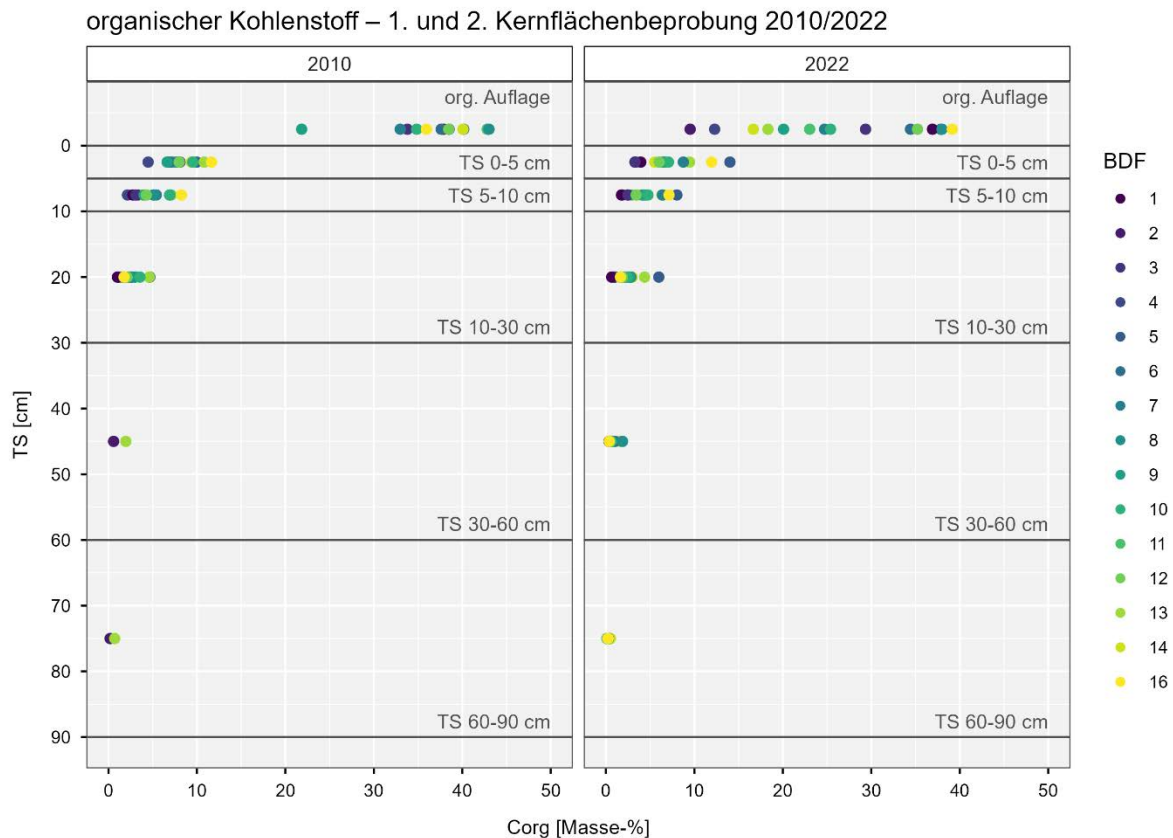


Abb. 7: Tiefenverteilung der Gehalte an organischem Kohlenstoff in Masse-% aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Abb. 7 zeigt die Tiefenverteilung der Gehalte an organischem Kohlenstoff hinsichtlich aller BDF. Der höchste Anteil ist aufgrund von Streufalleintrag und Bodenfauna in der organischen Auflage zu finden und nimmt deutlich mit der Tiefe ab.

Im Vergleich zum Jahr 2010 werden im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 in der organischen Auflage zum Teil deutlich geringere Gehalte an organischem Kohlenstoff gemessen. Laubbaumstandorte fallen dahingehend besonders auf (Abb. 8). Diese Unterschiede könnten unter anderem auf geringere Auflagenmächtigkeiten an Laubbaumstandorten und die dadurch erschwerte Probennahme bei der Trennung der organischen Auflage vom Mineralboden zurückgeführt werden.

Nadelbaumstandorte zeigen im Vergleich eine Abnahme um 8,5 % im Median. Lediglich BDF 16 zeigt eine Zunahme des Kohlenstoffgehaltes.

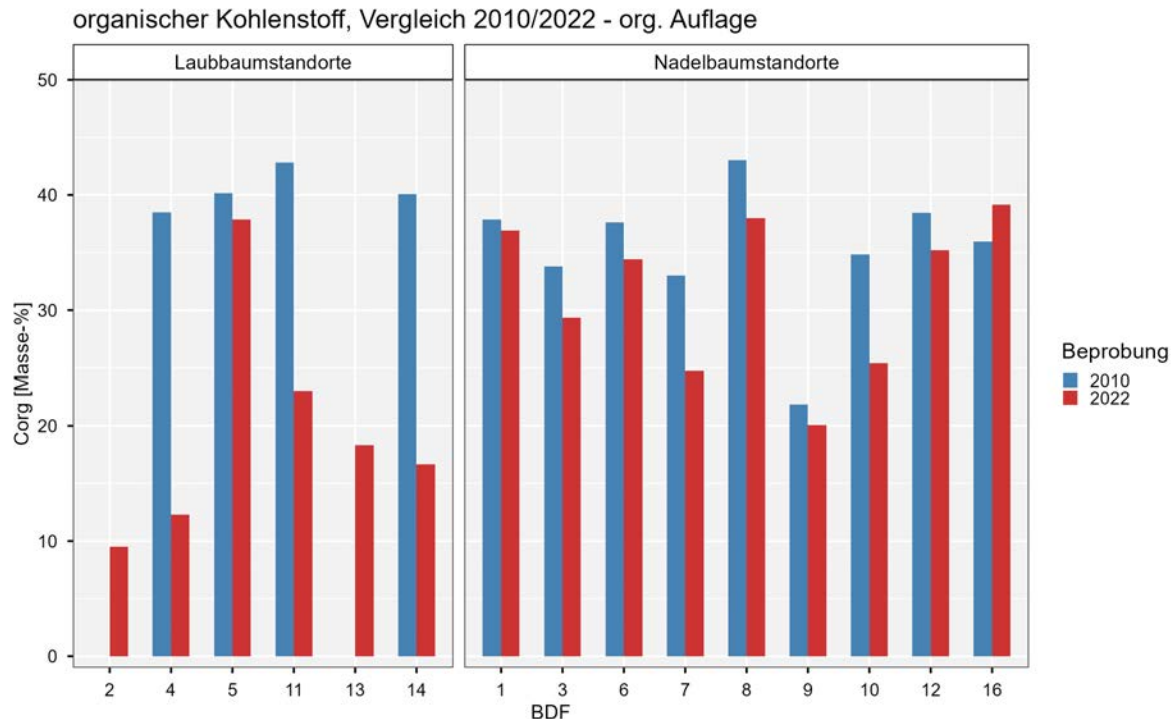


Abb. 8: Vergleich der Kohlenstoffgehalte in Masse-% in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Bei der Betrachtung der Tiefenstufen bis 30 cm zeigen sich ebenfalls im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 niedrigere Massenanteile an organischem Kohlenstoff als bei der 1. Kernflächenbeprobung 2010 (Anhang Abb. A5, Abb. A6 und Abb. A7).

Die Gesamtstickstoff-Gehalte (N_{ges}) zeigen gegenüber dem organischen Kohlenstoff ähnliche Abnahmetendenzen (Abb. 9).

Dies ist in der organischen Auflage (Abb. 10) sowie in den Tiefenstufen bis 30 cm (Anhang Abb. A8, Abb. A9 und Abb. A10) zu sehen.

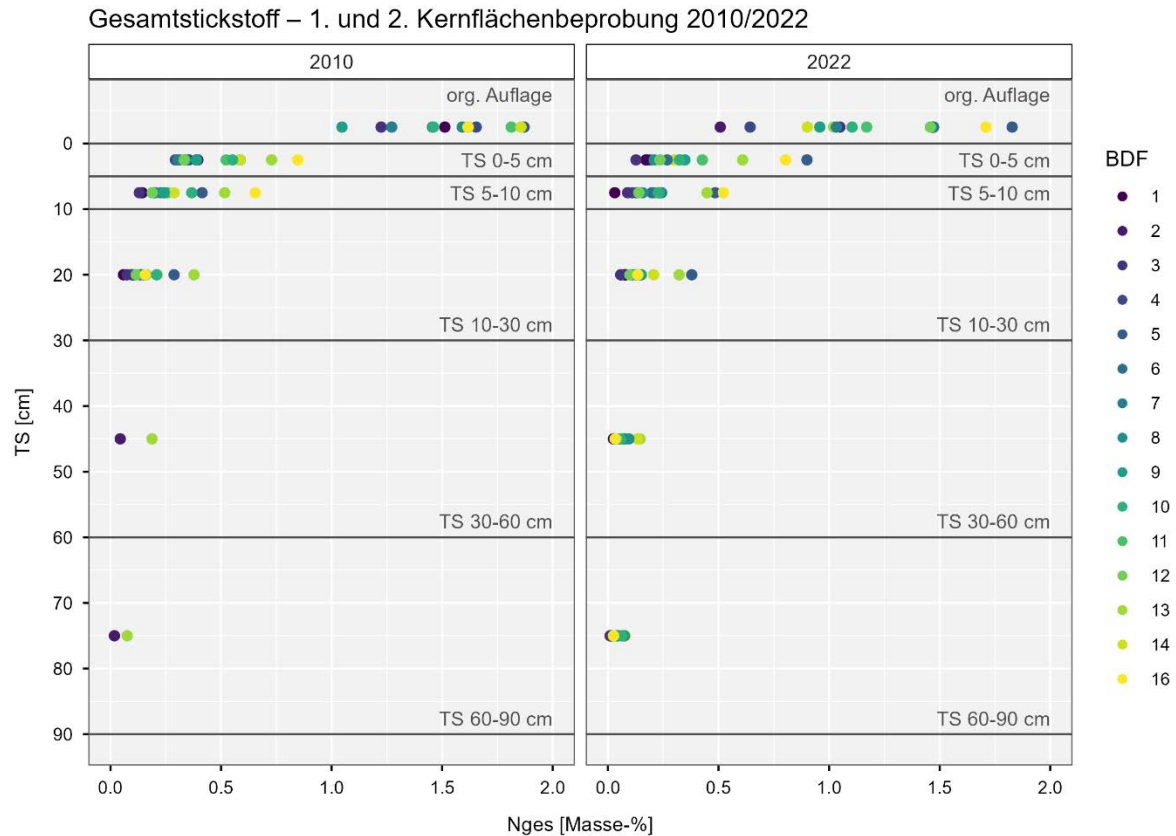


Abb. 9: Tiefenverteilung der Gesamtstickstoffgehalte in Masse-% aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

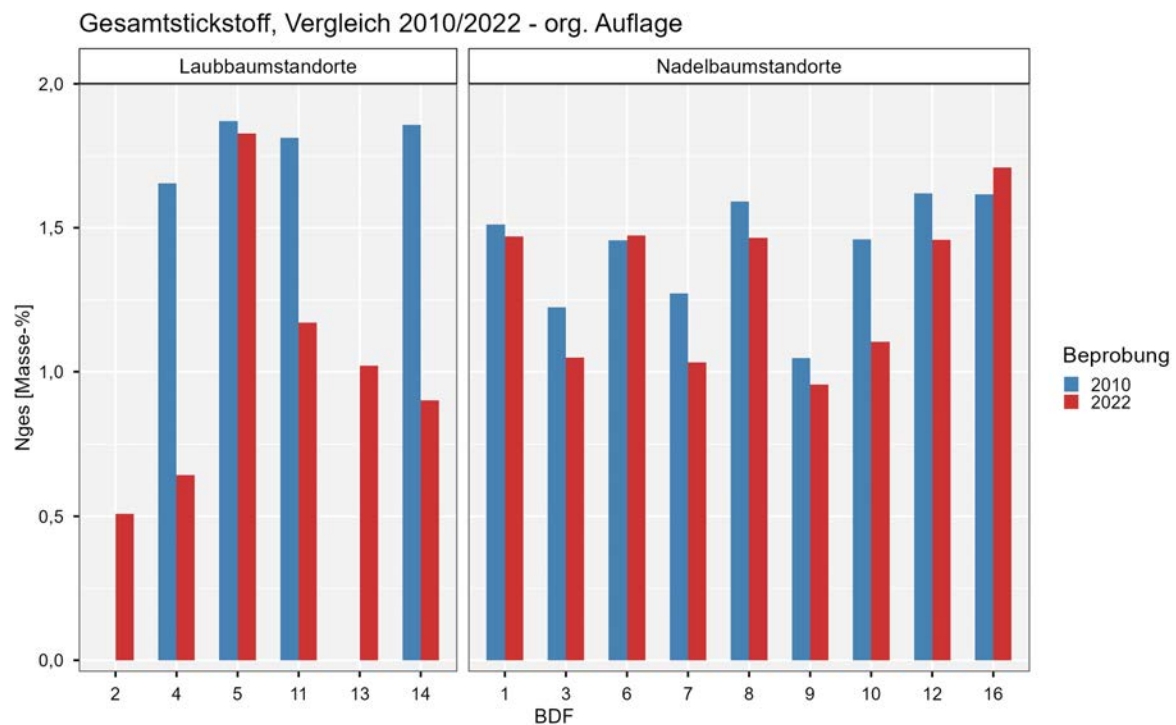


Abb. 10: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% der org. Auflage (1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022)

3.3.2 Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnisse

Nadelbaumstandorte zeigen in der organischen Auflage C/N-Verhältnisse über 20, Laubbaumstandorte weisen etwas geringere Werte auf (Abb. 11). Im Vergleich liegen die C/N-Verhältnisse in beiden Kernflächenbeprobungen zum Teil auf ähnlichem Niveau, zum Teil sind diese im Jahr 2022 geringer. Die ermittelten Werte liegen in dem Bereich, den auch der Waldbodenzustandsbericht 2012 angibt (MKUEM 2012).

Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 ist das C/N-Verhältnis der meisten BDF im Mineralboden in der Regel etwas höher als bei der Beprobung 2010 (Abb. 12, Anhang Abb. A11 und Abb. A12). Organischer Kohlenstoff und Gesamtstickstoff dienen als Berechnungsgrundlage des C/N-Verhältnisses und zeigen beide abnehmende Tendenzen. Um die Zunahme im C/N-Verhältnis zu erklären, müsste die Gehaltsabnahme von Gesamtstickstoff im Verhältnis zum organischen Kohlenstoff höher sein.

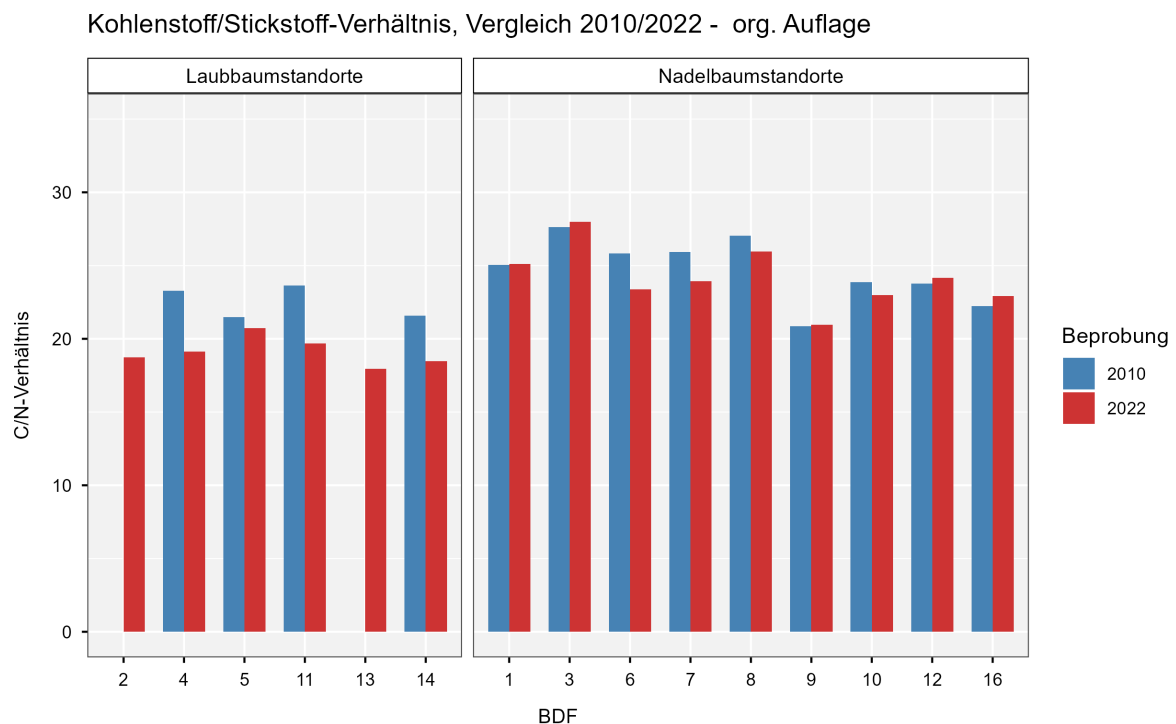


Abb. 11: Vergleich der C/N-Verhältnisse in der org. Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

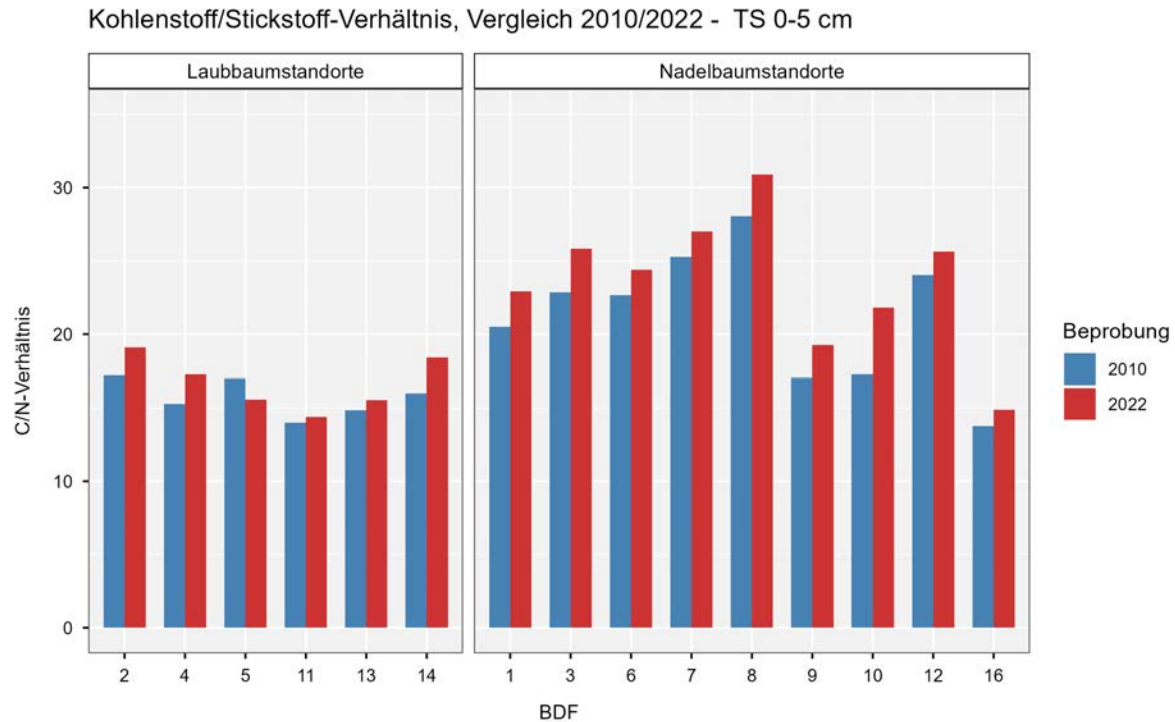


Abb. 12: Vergleich der C/N-Verhältnisse in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.4 Kohlenstoff- und Elementvorräte

Die Kohlenstoff-, Stickstoff und Phosphorvorräte sowie die Vorräte der austauschbaren Elemente Calcium (Ca), Kalium (K) und Magnesium (Mg) wurden mit Hilfe der Formeln in Kapitel 2.4 berechnet. Hinzugezogen wurden die im Gelände durch die FAWF gemessenen sowie die nach Ad-hoc-AG Boden (2005) abgeschätzten Trockenrohdichten (Kap. 2.5.2).

3.4.1 Kohlenstoff

Naturgemäß unterscheiden sich Standorte mit Laubbaumbestand in ihren Eigenschaften bezüglich der organischen Auflage deutlich von Nadelbaumstandorten. Laubbaumstandorte zeigen unter anderem niedrigere Auflagenmächtigkeiten sowie grundsätzlich niedrigere Gehalte an organischem Kohlenstoff, welches ebenso in den hier untersuchten BDF der Fall ist. **Für die Nadelbaumstandorte liegen die Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage in Bereichen von 50 bis 100 t/ha, im Ausnahmefall von BDF 9 bei knapp 130 t/ha. Für die Laubbaumstandorte liegen die Kohlenstoffvorräte zwischen 10 und 35 t/ha (Abb. 13).**

Kohlenstoffvorräte, 2. Kernflächenbeprobung 2022, org. Auflage

berechnet mit TRD FAWF Beprobung 2022

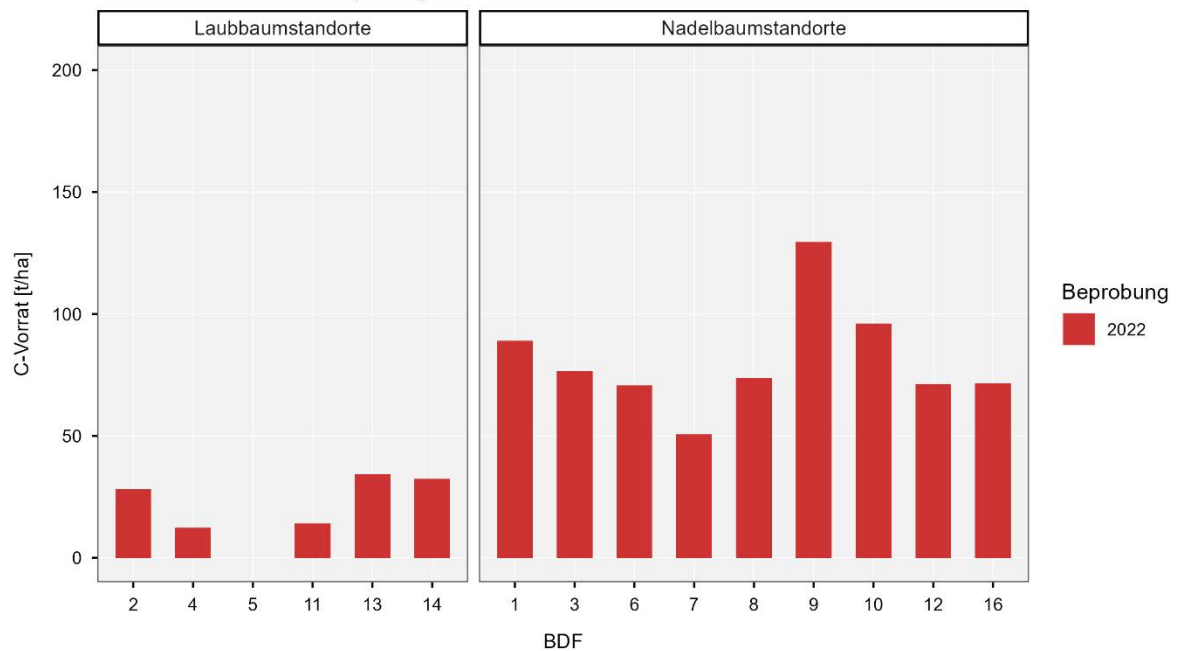


Abb. 13: Kohlenstoffvorräte in t/ha in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022 (berechnet mit TRD FAWF)

Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte im mineralischen Oberboden für beide Kernflächenbeprobungen die nach Ad-hoc-AG Boden (2005) geschätzten Trockenrohdichten verwendet. Die Kohlenstoffvorräte der organischen Auflage der 1. Kernflächenbeprobung 2010 wurden analog zur 2. Kernflächenbeprobung 2022 mittel Trockenrohdichte der FAWF berechnet. Diese Vorräte wurden aufsummiert und in Abbildung Abb. 14 vergleichend dargestellt.

Im Allgemeinen ist eine Abnahme der Kohlenstoffvorräte zu beobachten. Ausnahmen bilden die BDF 5, 9 und 12 und 13.

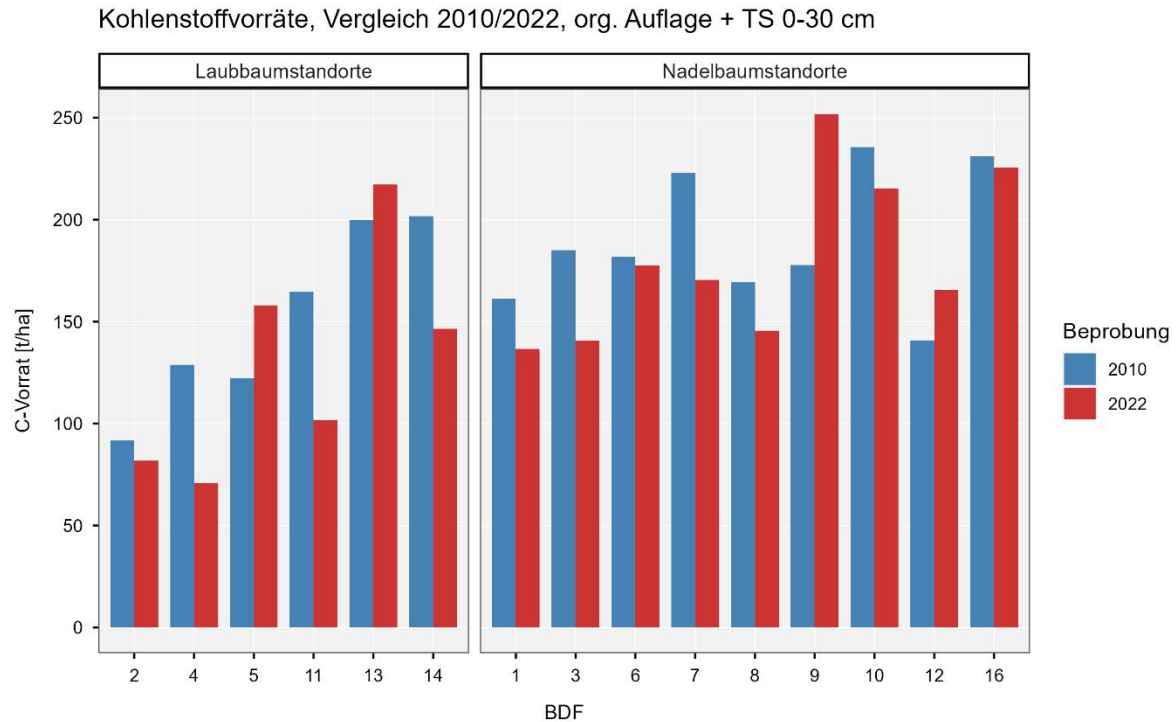


Abb. 14: Vergleich der Summe der Kohlenstoffvorräte in t/ha in der organischen Auflage und den Tiefenstufen bis 30 cm, 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.4.2 Phosphor

Abb. 15 stellt die relative Abweichung der Summe der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorvorräte (P) aller BDF vergleichend für beide Beprobungen in der organischen Auflage und im Mineralboden 0 bis 30 cm Tiefe dar. Die größtenteils deutliche Abnahme der Kohlen- und Stickstoffgehalte wurden bereits in Kapitel 3.2 diskutiert.

Relative Abweichung der C-, N- und P-Vorräte zwischen 1. und 2.
Kernflächenbeprobung 2010 und 2022, Aufl + TS 0-30 cm

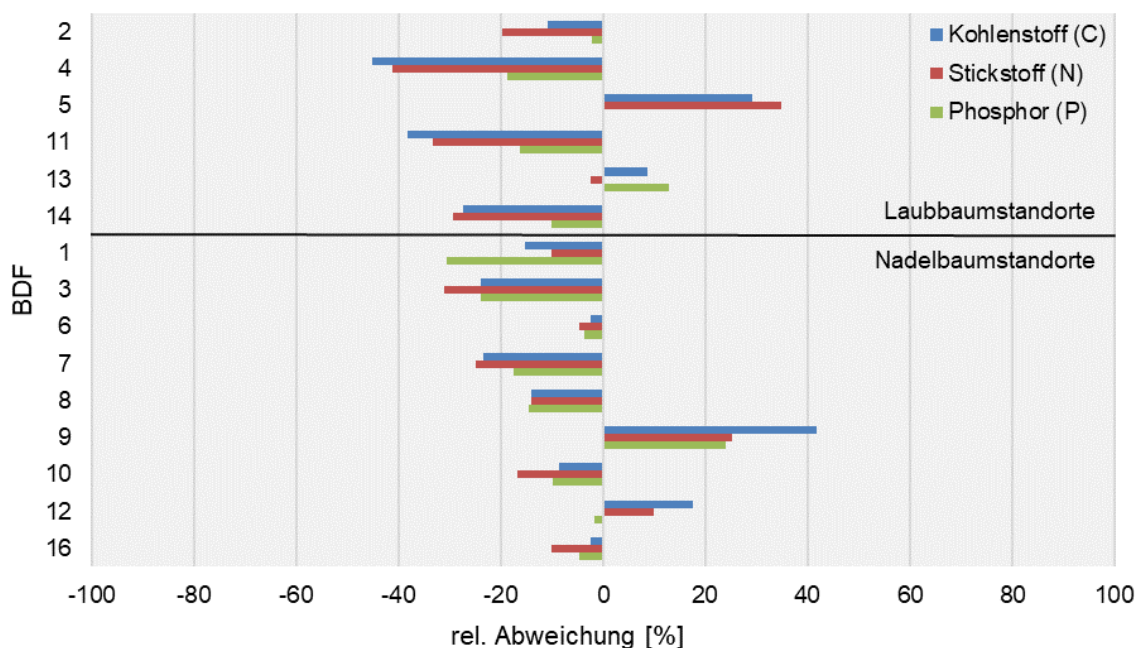


Abb. 15: Relative Abweichung der Summe der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorvorräte in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe zwischen 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Bis auf die Ausnahmen BDF 9 und 13 zeigt sich im Vergleich beider Beprobungen zum Teil eine deutliche Abnahme der Phosphorvorräte. Nur wenige BDF zeigen Vorräte auf gleichem Niveau wie im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010.

Die folgende Tab. 12 stellt die Summe der Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphorvorräte aller BDF in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe dar.

Tab. 12: Vergleich der Summe der Kohlenstoff- und Gesamtstickstoffvorräte in t/ha und der Phosphorvorräte in kg/ha in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 30 cm Tiefe, 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

BDF	Tiefe	m _{FB} [t/ha]	org. Kohlenstoff (C) [t/ha]		Gesamtstickstoff (N) [t/ha]		Phosphor (P) [kg/ha]	
			2010	2022	2010	2022	2010	2022
1	org. Auflage, TS 0-30 cm	3901	161,4	136,7	7,5	6,7	443,2	307,3
2	org. Auflage, TS 0-30 cm	3595	91,6	81,8	5,6	4,5	744,3	728,3
3	org. Auflage, TS 0-30 cm	3395	185,0	140,7	7,3	5,1	390,8	297,1
4	org. Auflage, TS 0-30 cm	4139	128,9	70,9	7,7	4,5	1246,1	1011,9
5	org. Auflage, TS 0-30 cm	2063	122,4	158,0	7,4	10,0	1161,9	1161,3
6	org. Auflage, TS 0-30 cm	3257	181,8	177,6	8,6	8,2	1002,1	965,0
7	org. Auflage, TS 0-30 cm	2919	222,8	170,6	9,4	7,1	944,0	779,4
8	org. Auflage, TS 0-30 cm	2507	169,3	145,5	6,9	5,9	599,0	512,3
9	org. Auflage, TS 0-30 cm	4141	177,7	251,7	10,3	12,9	1274,1	1581,1
10	org. Auflage, TS 0-30 cm	3878	235,7	215,3	12,5	10,4	1384,7	1249,1
11	org. Auflage, TS 0-30 cm	3633	164,5	101,7	11,1	7,4	1800,5	1508,3

BDF	Tiefe	m _{FB} [t/ha]	org. Kohlenstoff (C) [t/ha]		Gesamtstickstoff (N) [t/ha]		Phosphor (P) [kg/ha]	
			2010	2022	2010	2022	2010	2022
12	org. Auflage, TS 0-30 cm	3680	140,9	165,5	6,6	7,3	926,4	910,8
13	org. Auflage, TS 0-30 cm	3486	199,9	217,2	15,2	14,8	2453,9	2768,5
14	org. Auflage, TS 0-30 cm	3458	201,8	146,6	12,9	9,1	1642,3	1478,2
16	org. Auflage, TS 0-30 cm	4284	231,1	225,6	16,1	14,5	2194,5	2092,0

Erläuterung: m_{FB} = Feinbodenvorrat

3.4.3 Calcium, Magnesium und Kalium

Tab. 13 zeigt die Vorräte der austauschbaren Elemente Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Natrium (Na) in der organischen Auflage im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022. Ein Vergleich der Vorräte in der organischen Auflage beider Beprobungen ist nicht möglich da unterschiedliche Methoden zur Gehaltsbestimmung austauschbarer Elemente angewendet worden sind.

Tab. 13: Vorräte der austauschbaren Elemente (Bariumchlorid-Extraktion) in kg/ha in der organischen Auflage aller BDF für die 2. Kernflächenbeprobung 2022

BDF	TS	Mächtigkeit [cm]	TRD* [g/cm ³]	m _{FB} [t/ha]	Calcium (Ca) [kg/ha]	Magnesium (Mg) [kg/ha]	Kalium (K) [kg/ha]	Natrium (Na) [kg/ha]
1	Auflage	10,4	0,23	241,0	144,5	29,6	79,6	12,8
2	Auflage	6,1	0,49	297,4	89,1	18,6	44,6	9,1
3	Auflage	9,0	0,29	260,9	209,8	26,5	59,1	13,7
4	Auflage	3,3	0,30	99,4	140,9	21,3	30,7	4,3
5	Auflage	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
6	Auflage	12,0	0,17	205,5	183,6	29,2	62,3	16,8
7	Auflage	6,0	0,34	204,9	517,1	81,7	66,2	9,0
8	Auflage	10,7	0,18	194,1	252,2	38,1	58,0	20,4
9	Auflage	20,0	0,32	645,4	103,2	30,3	101,7	35,5
10	Auflage	12,4	0,30	378,3	134,0	37,7	88,0	27,0
11	Auflage	2,8	0,22	60,8	134,5	19,6	25,3	3,0
12	Auflage	9,3	0,22	202,5	219,4	27,9	60,4	14,5
13	Auflage	5,3	0,35	186,9	141,4	15,1	38,5	8,2
14	Auflage	5,2	0,37	194,1	126,9	16,1	46,6	9,6
16	Auflage	8,2	0,22	182,4	569,6	60,9	80,5	14,4

*Trockenrohdichte, Messwerte FAWF, 2. Kernflächenbeprobung 2022

Abb. 16 stellt die relative Abweichung vergleichend für beide Beprobungen im Mineralboden in den Tiefenstufen von 0 bis 30 cm dar. Diese Darstellung zeigt eine deutliche Abnahme der Elementvorräte bis 30 cm. Lediglich BDF 5 zeigt eine Zunahme der Element Calcium, Magnesium und Kalium. Im Falle von BDF 7 ist dies für Calcium und Kalium der Fall, bei BDF 4 und 6 nur für Kalium.

Diese Abnahme kann auf die sauren Bedingungen zurückgeführt werden. Die als basisch geltenden Kationen der Elemente Calcium, Magnesium und Kalium werden aufgrund des niedrigen pH-Wertes von ihren Austauschern verdrängt und sind somit mobilisier- und damit auswaschbar. Der resultierende Verlust kann nicht durch atmosphärische Einträge bzw. Mineralverwitterung ausgeglichen werden (FAWF, 2012).

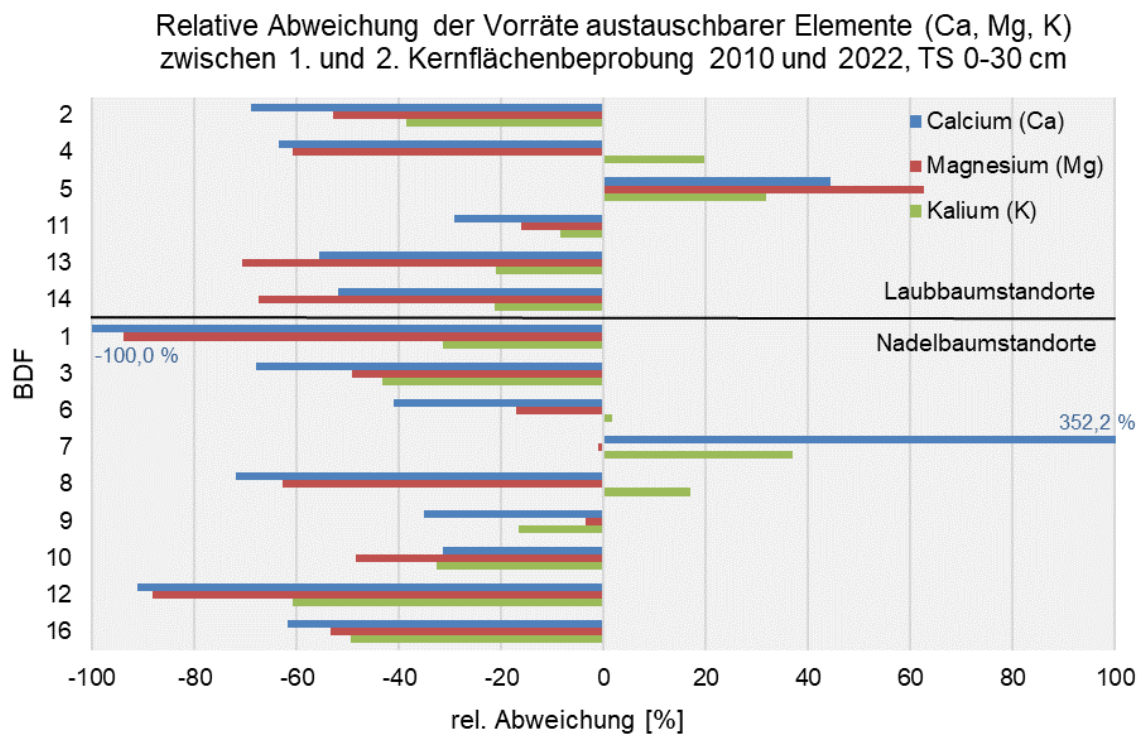


Abb. 16: Relative Abweichung der Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte in den Tiefenstufen 0 bis 30 cm zwischen 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Tab. 14 zeigt für beide Beprobungen die Vorräte von Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Mineralboden in den Tiefenstufen bis 30 cm.

Tab. 14: Vergleich der Vorräte der austauschbaren Elemente (Ammoniumchlorid-Extraktion) in kg/ha im Mineralboden 0 bis 30 cm Tiefe der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

BDF	TS [cm]	FB [t/ha]	Calcium (Ca) [kg/ha]		Magnesium (Mg) [kg/ha]		Kalium (K) [kg/ha]		Natrium (Na) [kg/ha]	
			2010	2022	2010	2022	2010	2022	2010	2022
1	0-30	3663	60,3	n.a.	20,4	1,3	90,0	61,7	23,3	9,9
2	0-30	3300	115,6	35,9	33,4	15,7	141,9	87,3	15,9	20,5
3	0-30	3135	129,5	41,5	21,7	11,0	105,6	59,9	44,5	23,5
4	0-30	4042	304,9	111,5	83,5	32,8	198,4	237,7	26,3	6,1
5	0-30	2063	396,6	572,7	57,5	93,6	154,9	204,0	21,5	44,0
6	0-30	3053	82,8	48,7	25,5	21,1	110,3	112,2	27,1	17,5
7	0-30	2723	148,0	669,4	124,2	122,9	104,8	143,5	33,8	8,9
8	0-30	2313	80,2	22,6	20,2	7,5	65,4	76,4	16,7	19,1
9	0-30	3478	52,4	34,0	13,0	12,6	124,1	103,4	38,6	18,0
10	0-30	3478	49,7	34,0	31,9	16,5	151,6	102,1	37,0	20,2
11	0-30	3572	259,3	183,8	75,7	63,6	230,2	210,5	31,9	28,6
12	0-30	3478	277,3	24,7	64,2	7,5	334,7	131,6	90,4	20,5
13	0-30	3300	415,4	184,8	32,9	9,7	237,2	187,1	41,2	38,8
14	0-30	3267	200,0	96,5	37,5	12,2	202,9	159,9	37,5	13,4
16	0-30	4100	4500,6	1723,3	783,8	365,0	675,7	341,9	199,3	44,8

3.5 pH-Wert

Im Rahmen beider Kernflächenbeprobungen liegen die pH-Werte aller BDF auf insgesamt sehr niedrigem Niveau.

In dieser Auswertung werden pH-Werte (CaCl_2) betrachtet, da Ca^+ gebundene H^+ -Ionen verdrängt und diese Methode somit den tatsächlich wirksamen Säuregrad des Bodens zeigt. Abb. 17 veranschaulicht die Tiefenverteilung der pH-Werte (CaCl_2) aller BDF für die 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022. Diese liegen ungeachtet standortspezifischer Bedingungen und Tiefenstufe in einem Bereich von > 2,5 bis 5 (pH CaCl_2).

Die pH-Werte (H_2O) liegen naturgemäß etwas höher als die pH-Werte (CaCl_2) und sind im Anhang dargestellt (Abb. A13).

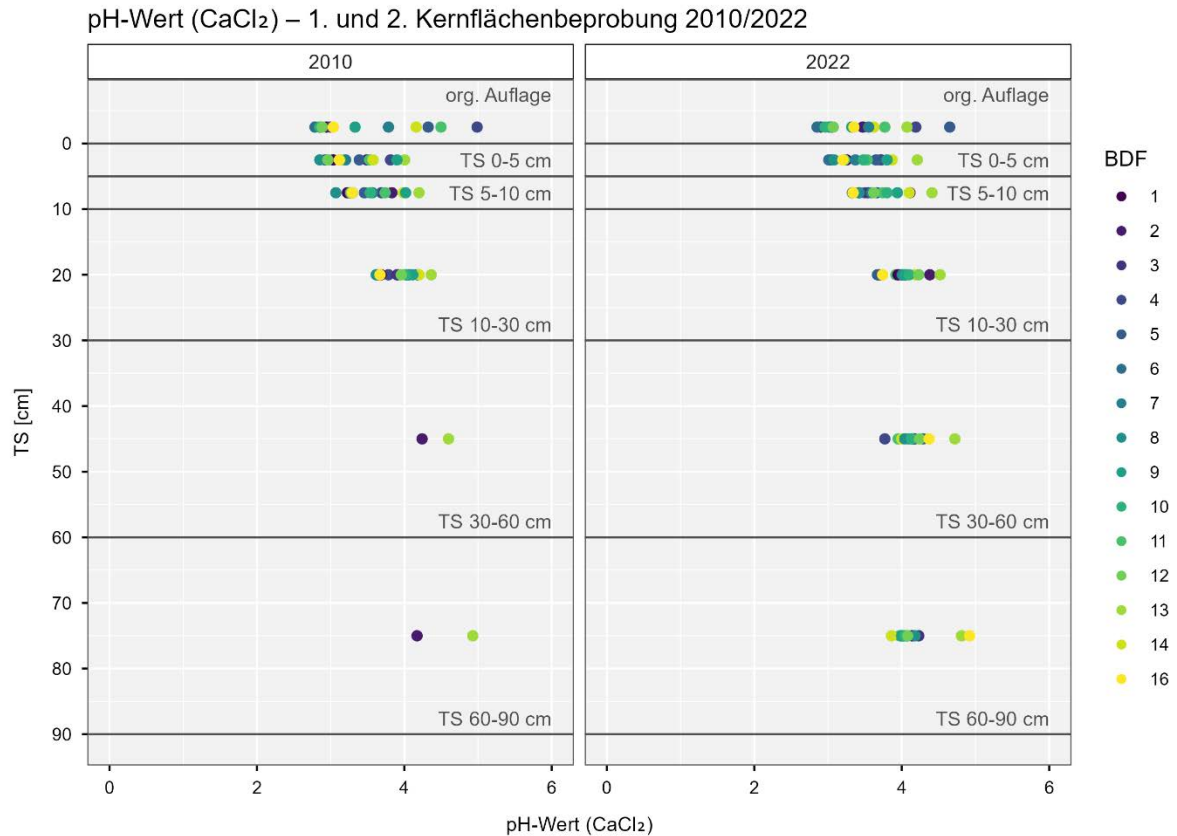


Abb. 17: Tiefenverteilung der pH-Werte (CaCl₂) aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

In der organischen Auflage liegen die pH-Werte (CaCl₂) an Laubbaumstandorten im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 in einem Bereich von 4,2 bis 5,0 und 3,5 bis 4,7 für die 2. Kernflächenbeprobung 2022. An Nadelbaumstandorten werden niedrigere pH-Werte in einem Bereich von 2,8 bis 3,8 (2010) bzw. 2,9 bis 3,6 (2022) gemessen.

Wird der Mineralboden betrachtet, zeigt sich im Rahmen beider Beprobungen die Tendenz zum Anstieg der pH-Werte in die Tiefe.

Abb. 18 vergleicht die pH-Werte (CaCl₂) in der organischen Auflage beider Kernflächenbeprobungen. Grundsätzlich liegen die Werte auf ähnlichem Niveau. Auf Basis der Messwerte ist in der organischen Auflage kein eindeutiger Trend feststellbar. Im mineralischen Oberboden kann ein leichter Trend zu höheren pH-Werten vermutet werden (Abb. 19, Anhang Abb. A14 und Abb. A15), dennoch ist der Probenumfang zu gering, um eine wirklich belastbare Aussage zu treffen.

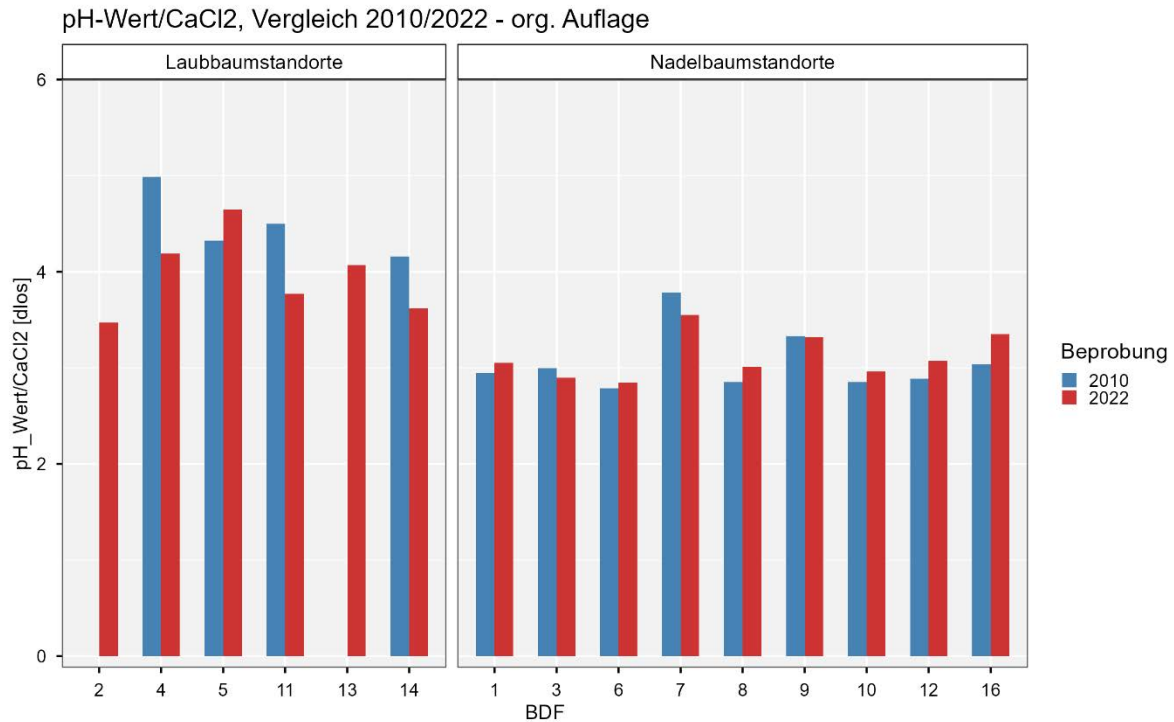


Abb. 18: Vergleich der pH-Werte (CaCl₂) in der organischen Auflage der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

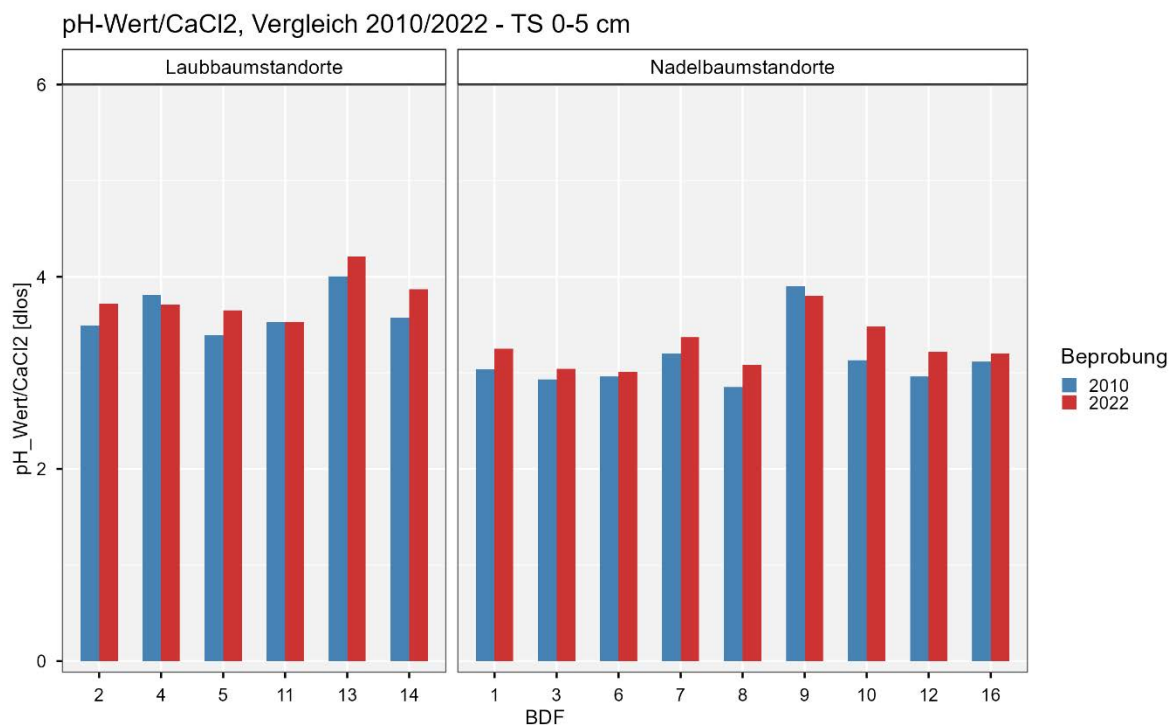


Abb. 19: Vergleich der pH-Werte (CaCl₂) in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6 Arsen und Schwermetalle

Arsen und Schwermetalle sind einerseits natürliche Bestandteile von Gesteinen, die bei Verwitterung und Bodenbildung freigesetzt werden (geogene Hintergrundgehalte), andererseits werden bzw. wurden sie ebenso anthropogen eingetragen. In Rheinland-Pfalz ist der anthropogene Eintrag überwiegend auf historischen Bergbau und Verhüttung, auf die Emission aus industriellen Prozessen, die Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie den Straßenverkehr zurückzuführen.

Auch wenn einige Schwermetalle als Spurenelemente ernährungsphysiologische Bedeutung haben, sind alle Schwermetalle sowie Arsen in höheren Konzentrationen toxisch für Bodenorganismen und Pflanzen. Vor allem die Verfügbarkeit und die Mobilität spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle. Unterhalb eines elementspezifischen pH-Wertes steigen beide Faktoren bei Arsen und den meisten Schwermetallen stark an.

Im Boden der BDF werden größtenteils nur geringe Schwermetallgehalte festgestellt. Im Vergleich zur 1. Kernflächenbeprobung 2010 zeigen die Schwermetalle Arsen, Chrom, Kupfer und Quecksilber im Vergleich mit der 2. Kernflächenbeprobung 2022 eine Tendenz zu geringeren Gehalten. Für Cadmium, Nickel und Zink ist ein solcher allgemeine Trend nicht feststellbar; je nach Standort sind die Gehalte im Vergleich zur früheren Probennahme höher oder geringer. Blei zeigt zum Teil hohe Gesamtgehalte in den organischen Auflagen sowie deutliche Unterschiede hinsichtlich Zu- und Abnahme zwischen Laub- und Nadelbaumstandorten.

Aussagen bezüglich der Mobilität (Pflanzenverfügbarkeit) sind in den Steckbriefen (separate Veröffentlichung) der einzelnen BDF hinterlegt (Ammoniumnitrat-Extraktion).

3.6.1 Arsen

Arsen (As) kommt im Boden in unterschiedlichen Oxidationsstufen mit unterschiedlichem Bindungsverhalten und verschiedener Mobilität vor. Eine Betrachtung nach Oxidationsstufen findet nicht statt. Bei pH-Werten unter 4,5 ist Arsen deutlich mobilisierbar (LABO 2024).

Bei Betrachtung der Tiefenverteilung von Arsen (Abb. 20) in den BDF kann erwartungsgemäß in der organischen Auflage keine Anreicherung beobachtet werden.

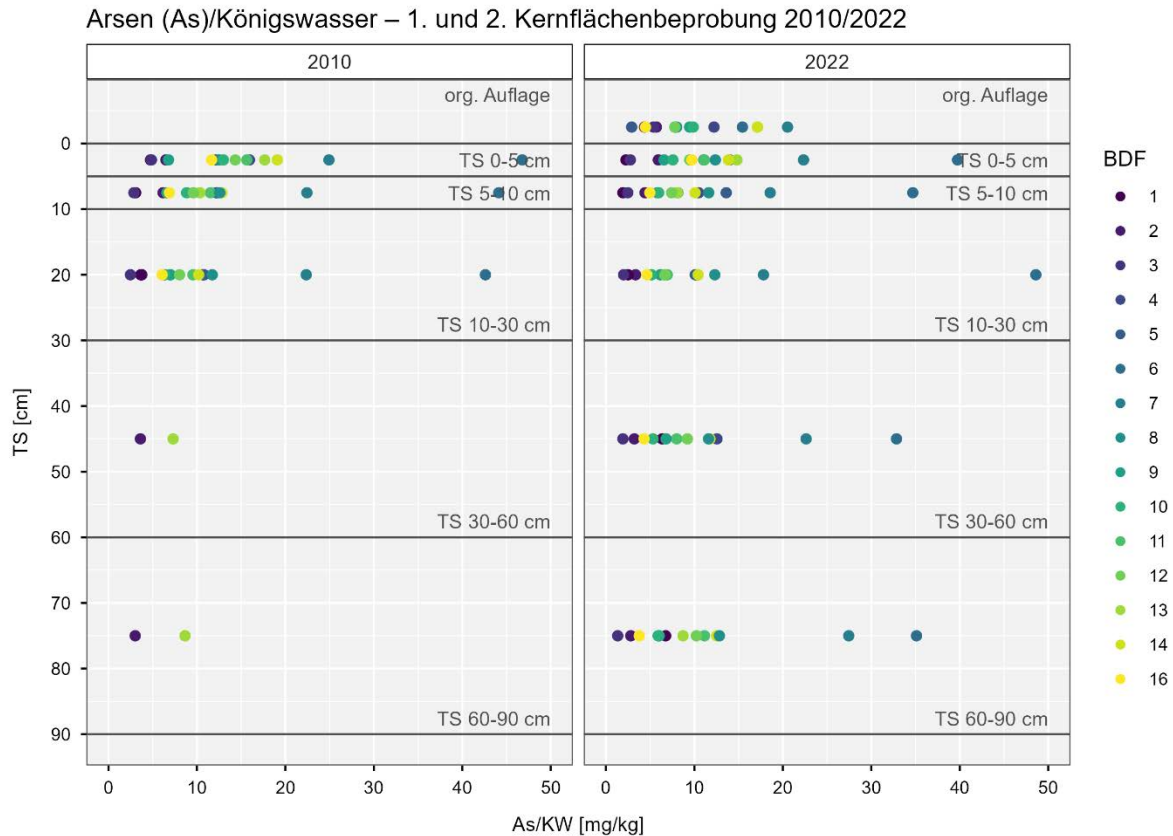


Abb. 20: Tiefenverteilung der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Die Arsengehalte in der organischen Auflage liegen nur für die 2. Kernflächenbeprobung 2022 vor (Abb. A16).

Im Vergleich beider Kernflächenbeprobungen zeigt sich im mineralischen Oberboden eine Abnahme der Arsengehalte in allen BDF. Bis auf wenige Ausnahmen setzt sich dieser Trend in die Tiefe fort (Abb. 21, Anhang Abb. A17 und Abb. A18). Der Unterschied der Arsengehalte zwischen Laub- und Nadelbaumstandorten ist unauffällig. Zwei deutliche Ausnahmen bilden die BDF 6 und 7. Die Gesamtgehalte liegen hier weit über den Hintergrundwerten (MKUEM 2022). Einen Hinweis dazu liefert der Bodenzustandsbericht Rheinland-Pfalz Birkenfeld (MUEEF 2018), bei dem in dieser Region ebenfalls sehr hohe Arsengehalte gemessen wurden. Diese werden auf tektonische Störungen zurückgeführt, entlang derer syndimentär arsenreiche Wässer aufstiegen und das bodenbildende Ausgangsgestein anreicherten.

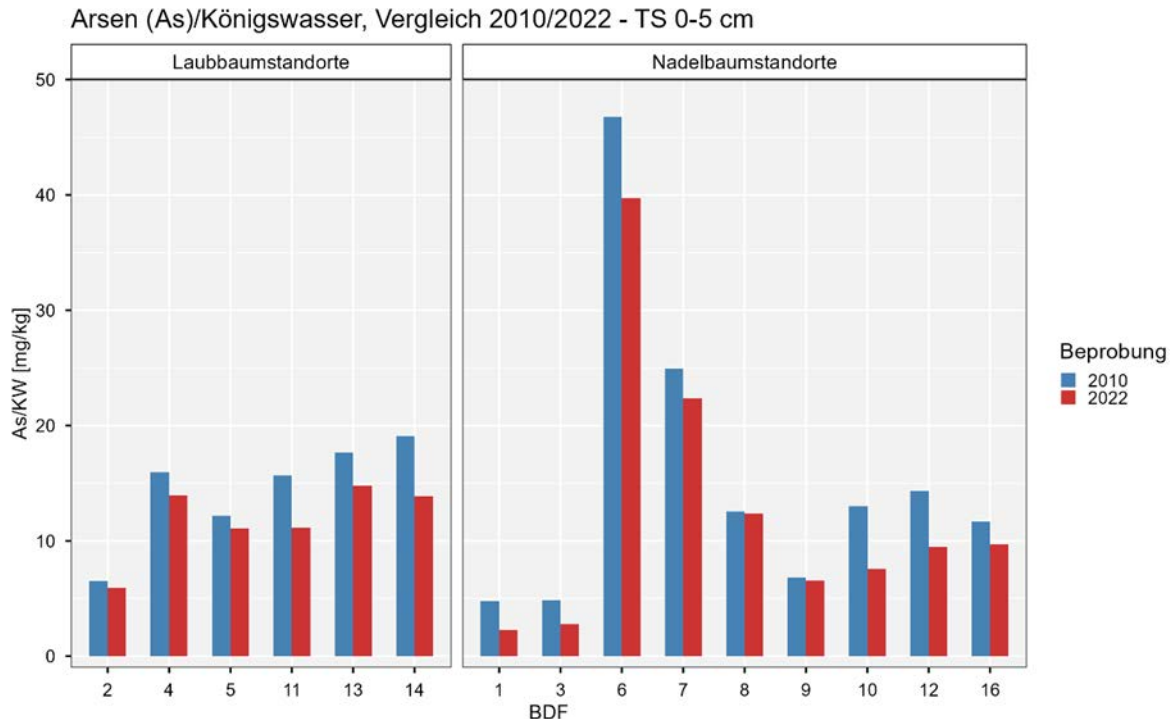


Abb. 21: Vergleich der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.2 Blei

In der organischen Auflage wird Blei unter Bildung metallorganischer Komplexe stark an Huminstoffe gebunden, im Mineralboden bevorzugt an Tonminerale sowie an Eisen-, Aluminium- und Manganoxide, und ist dadurch weniger mobil. Die Mobilität von Blei ist jedoch stark pH-abhängig. Bei pH-Werten unter 4,5 nimmt diese wegen der höheren Löslichkeit und der geringeren Sorption stark zu (BAFU, 2007). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Bleikonzentration ab.

Die BDF zeigen an Nadelbaumstandorten die höchsten Blei-gehalte in der organischen Auflage sowie eine Abnahme der Gehalte mit der Tiefe. Für Laubbaumstandorte bilden sich im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 die höchsten Blei-gehalte nicht in der organischen Auflage, sondern in der Tiefenstufe 0-5 cm ab. Bei der 2. Kernflächenbeprobung 2022 sind die Blei-gehalte in der organischen Auflage auffallend hoch (Abb. 22).

An einigen wenigen Standorten werden durch atmosphärischen Eintrag und Akkumulation Blei-gehalte in der organischen Auflage und im mineralischen Oberboden von mehr als 200 mg/kg erreicht.

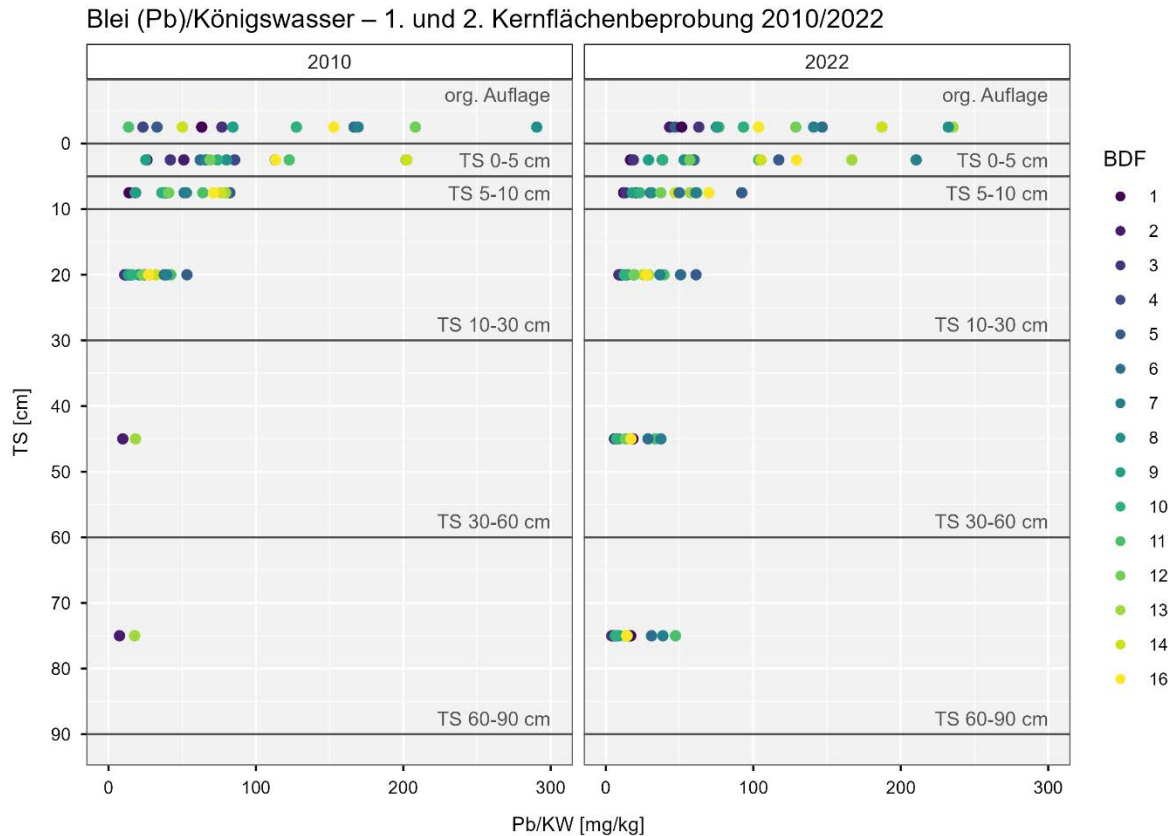


Abb. 22: Tiefenverteilung der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Werden die 1. und 2. Kernflächenbeprobung vergleichend betrachtet, zeigen sich für die Erstbeprobung 2010 in der organischen Auflage unterschiedliche Gehalte in Abhängigkeit vom Baumbestand (Abb. 23). An Laubbaumstandorten wurden 2010 deutlich geringere Bleigehalte gemessen als an Nadelbaumstandorten. Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 zeigen sich diese Unterschiede nicht. Die Bleigehalte liegen unabhängig vom Baumbestand in vergleichbaren Größenordnungen. Das heißt, bei der Beprobung 2022 werden an Laubbaumstandorten deutlich höhere Bleigehalte gemessen als im Jahr 2010. Für Nadelbaumstandorte hingegen ist eine Abnahme der Bleigehalte zu verzeichnen.

Im Mineralboden bilden sich diese Unterschiede nicht ab. Laubbaumstandorte zeigen in der Tiefenstufe 0-5 cm im Rahmen beider Kernflächenbeprobungen höhere Bleigehalte als Nadelbaumstandorte (Abb. 24). Die geringermächtigen organischen Auflagen der Laubbaumstandorte werden aufgrund höherer biologischer Aktivität schneller mineralisiert und in den Mineralboden eingearbeitet. Damit geht auch die Tiefenverlagerung von Blei und anderer mobilisierbarer Schadstoffe einher.

In allen Tiefenstufen bis 30 cm zeigt sich im Vergleich beider Beprobungen bis auf wenige Ausnahmen eine Abnahme des Bleigehalts (Anhang Abb. A19 und Abb. A20). Lediglich BDF 7, ein Nadelbaumstandort, zeigt eine deutliche Zunahme des Bleigehaltes in der Tiefenstufe 0-5 cm.

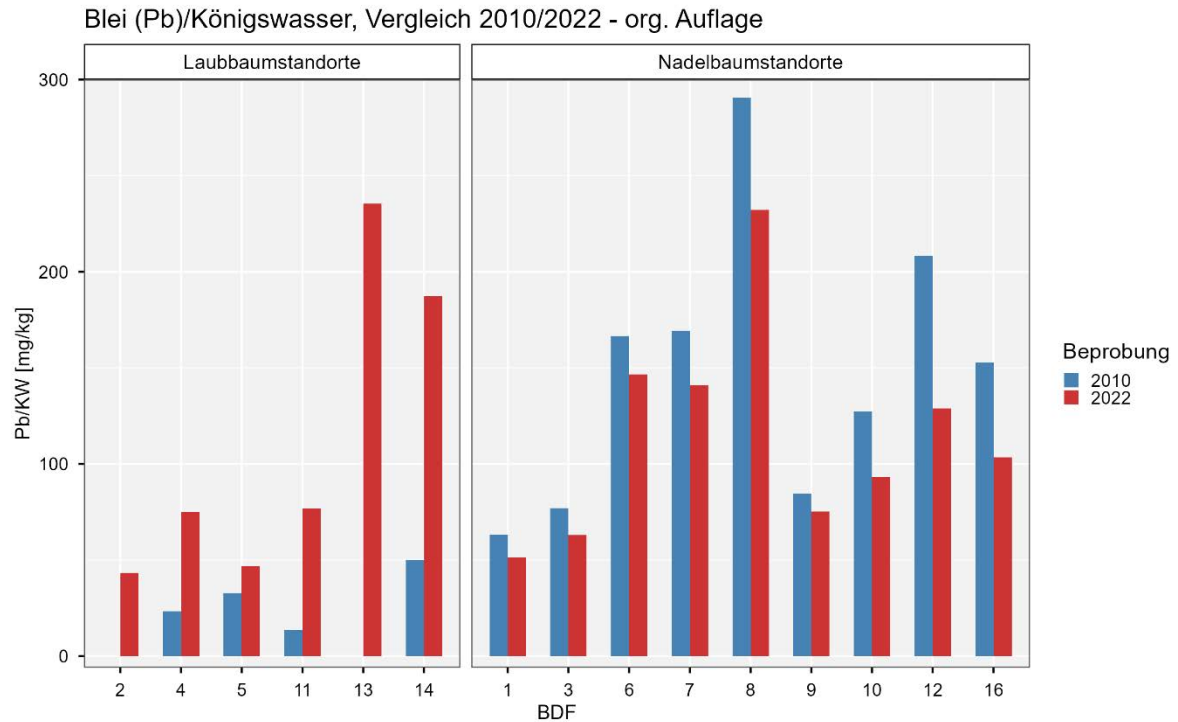


Abb. 23: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

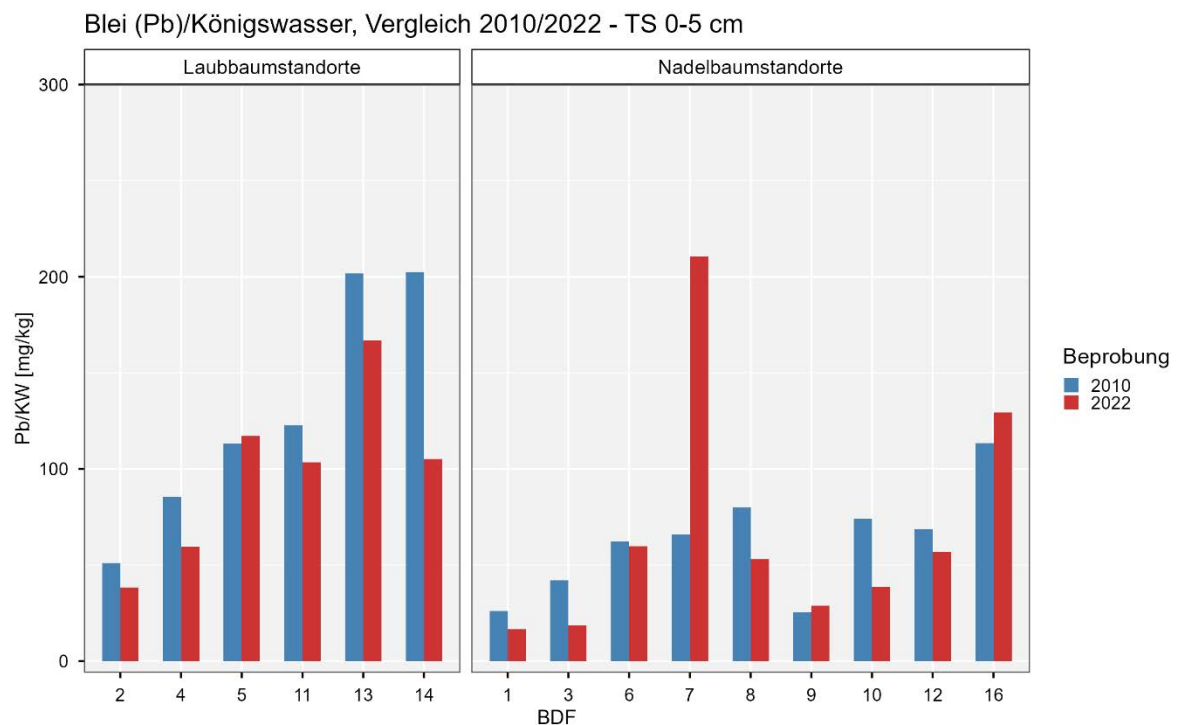


Abb. 24: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.3 Cadmium

Cadmium (Cd) reichert sich in der organischen Auflage an, ist jedoch bei niedrigen pH-Werten in erheblichem Umfang mobilisierbar.

Abb. 25 zeigt die Konzentrationsverteilung für Cadmium für alle BDF in Bezug auf die untersuchten Tiefenstufen. Die höchsten Cadmiumgehalte finden sich in der organischen Auflage.

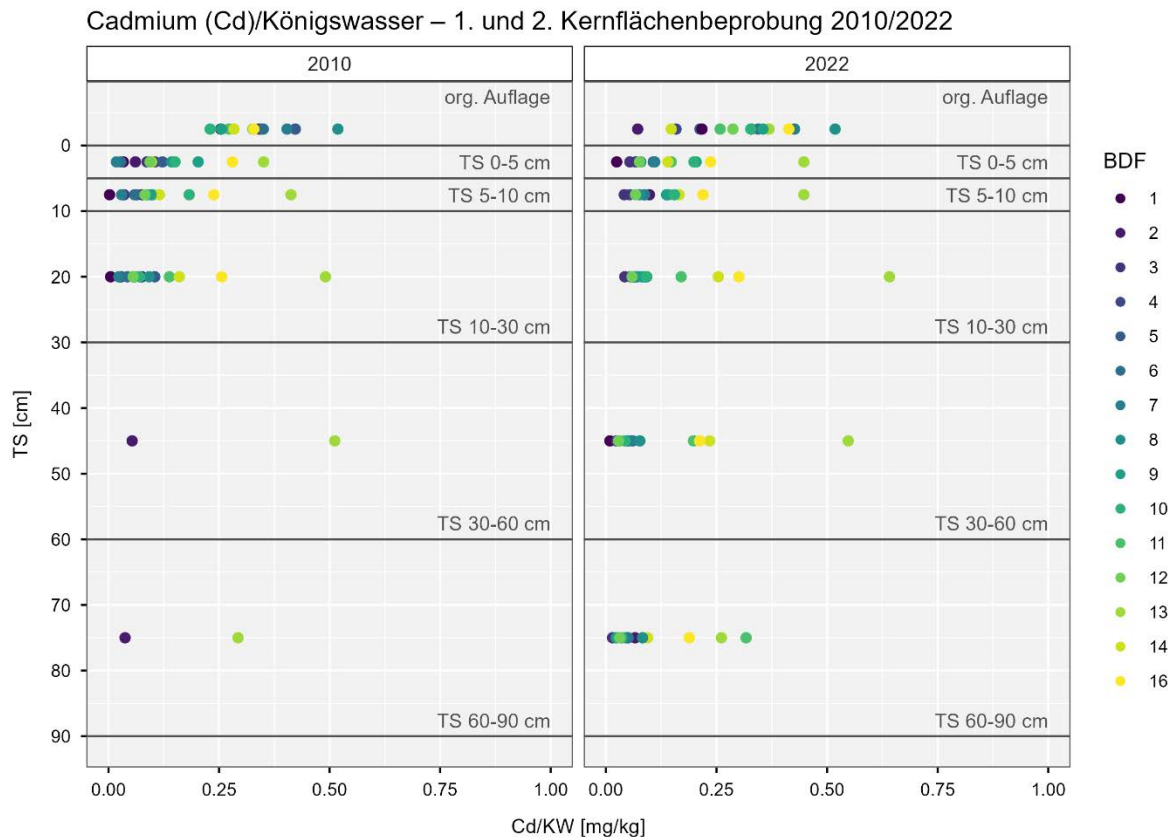


Abb. 25: Tiefenverteilung der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Im Vergleich beider Beprobungen liegen die Cadmiumgehalte in der organischen Auflage vor allem an den Nadelbaumstandorten auf ähnlichem Niveau. Die Laubbaumstandorte zeigen eine Abnahme. Jedoch stehen in diesem Fall nur vier BDF für eine vergleichenden Auswertung zur Verfügung, so dass kein Trend abgeleitet werden kann (Abb. 26).

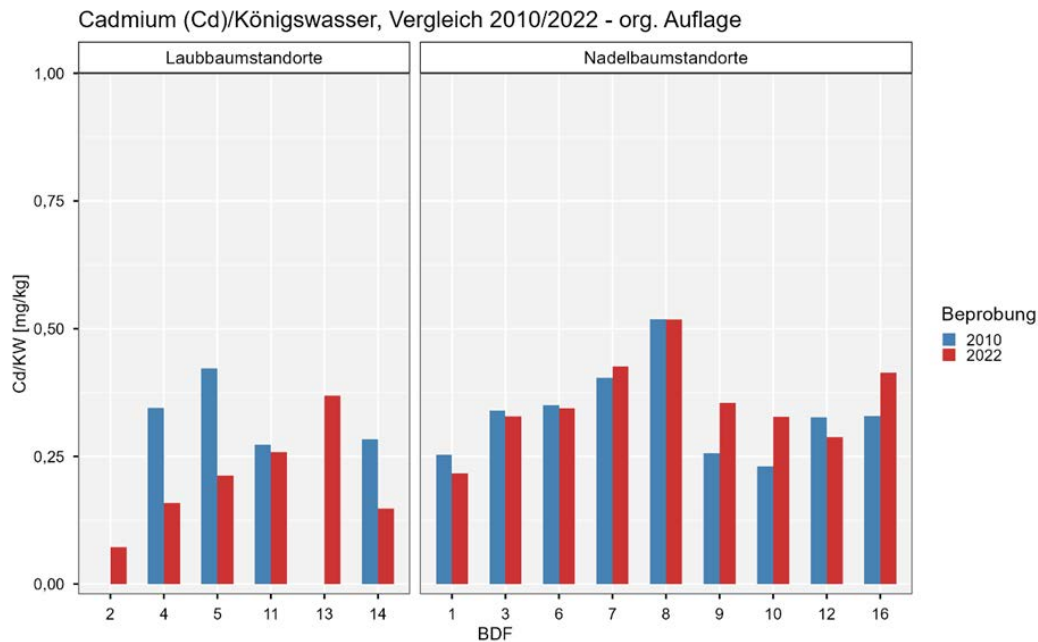


Abb. 26: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Im mineralischen Oberboden liegen die Cadmiumgehalte ebenfalls auf ähnlichem Niveau. Auf Basis der Daten für die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm kann kein Trend abgeleitet werden (Abb. 27, Anhang Abb. A21). In Tiefen unter 10 cm fallen vereinzelte BDF durch einen Anstieg der Cadmiumgehalte auf, was einerseits auf Tiefenverlagerung, andererseits ebenso auf geogene Hintergrundwerte dieser Standorte zurückzuführen sein kann (Abb. A22).

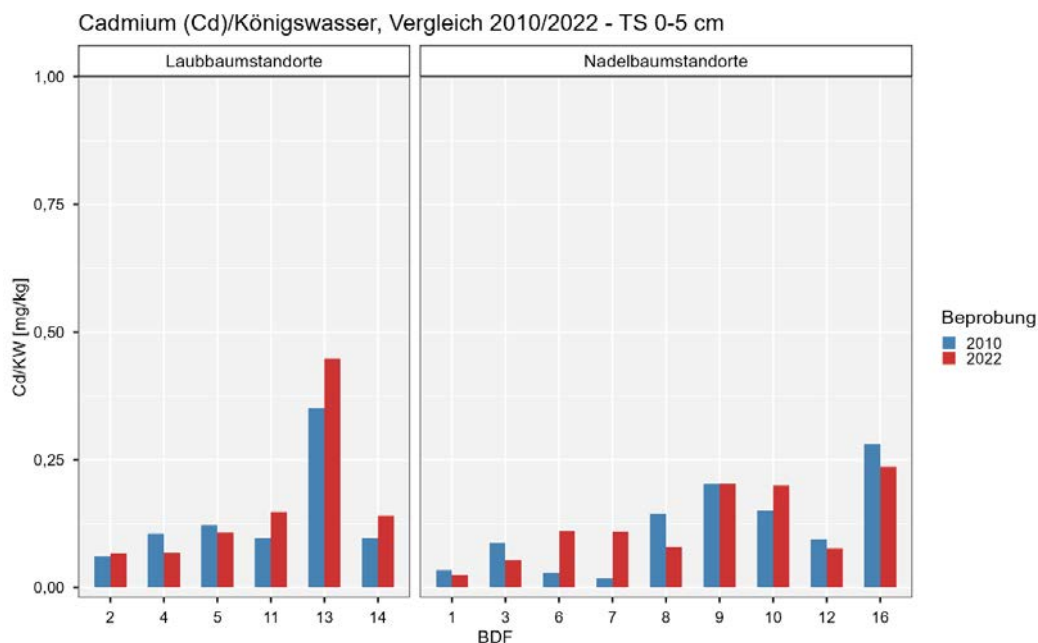


Abb. 27: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.4 Chrom

Abb. 28 zeigt die Tiefenverteilung der Chromgehalte beider Beprobungen. Chrom (Cr) liegt gewöhnlich in zwei Oxidationsstufen vor, Cr (III) und Cr (VI), welche unterschiedliche Mobilitäten zeigen (FAWF, 2012). In dieser Betrachtung werden diese Oxidationsstufen jedoch nicht differenziert betrachtet. Grundsätzlich ist festzustellen, dass Chrom nicht in höheren Gehalten in der organischen Auflage zu finden ist.

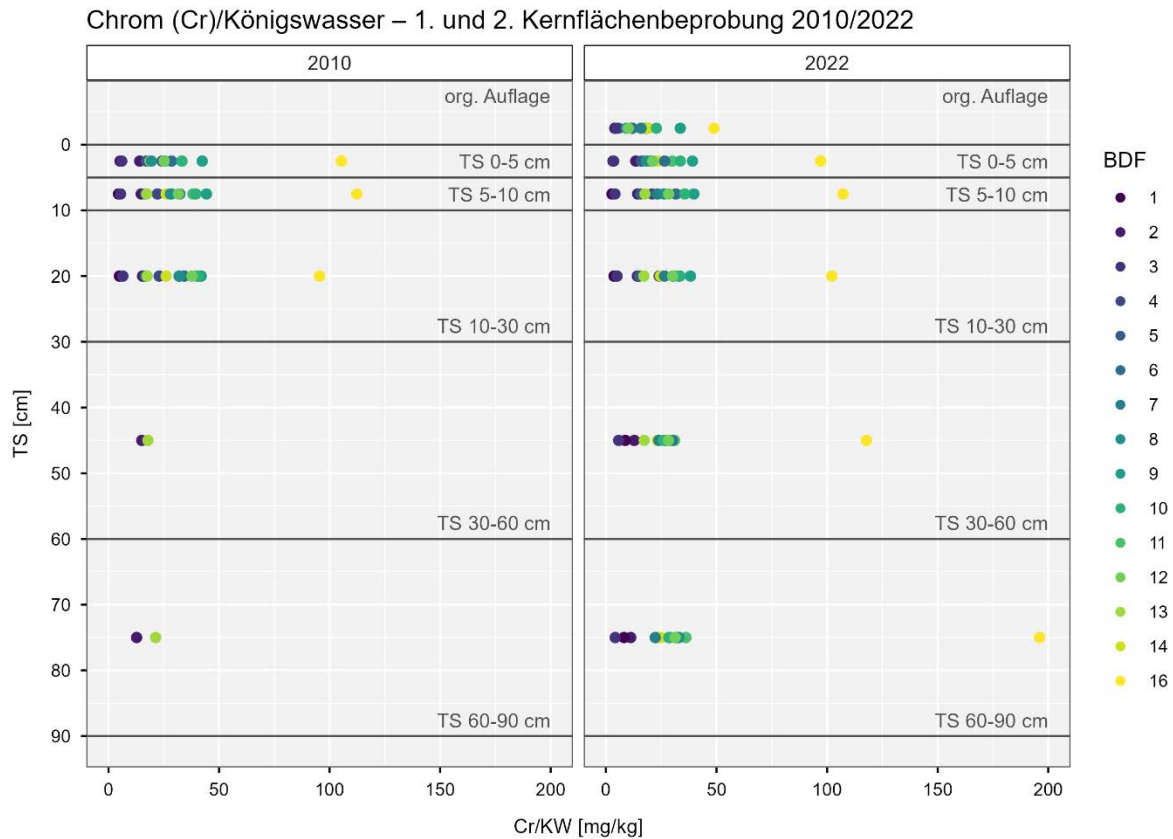


Abb. 28: Tiefenverteilung der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Die Chromgehalte in der organischen Auflage liegen nur für die 2. Kernflächenbeprobung 2022 vor (Abb. A23).

Im Mineralboden zeigt sich im Vergleich beider Beprobungen bis auf wenige Ausnahmen eine geringfügige Abnahme der Chromgehalte. Der Median der relativen Abweichung beträgt 8 % für die Tiefenstufe 0-5 cm. In die Tiefe setzt sich dieser Trend in ähnlicher Größenordnung fort (Abb. 29, Anhang Abb. A24 und Abb. A25).

Die hohen Gesamtgehalte auf BDF 16 können als geogen betrachtet werden (MKUEM 2022).

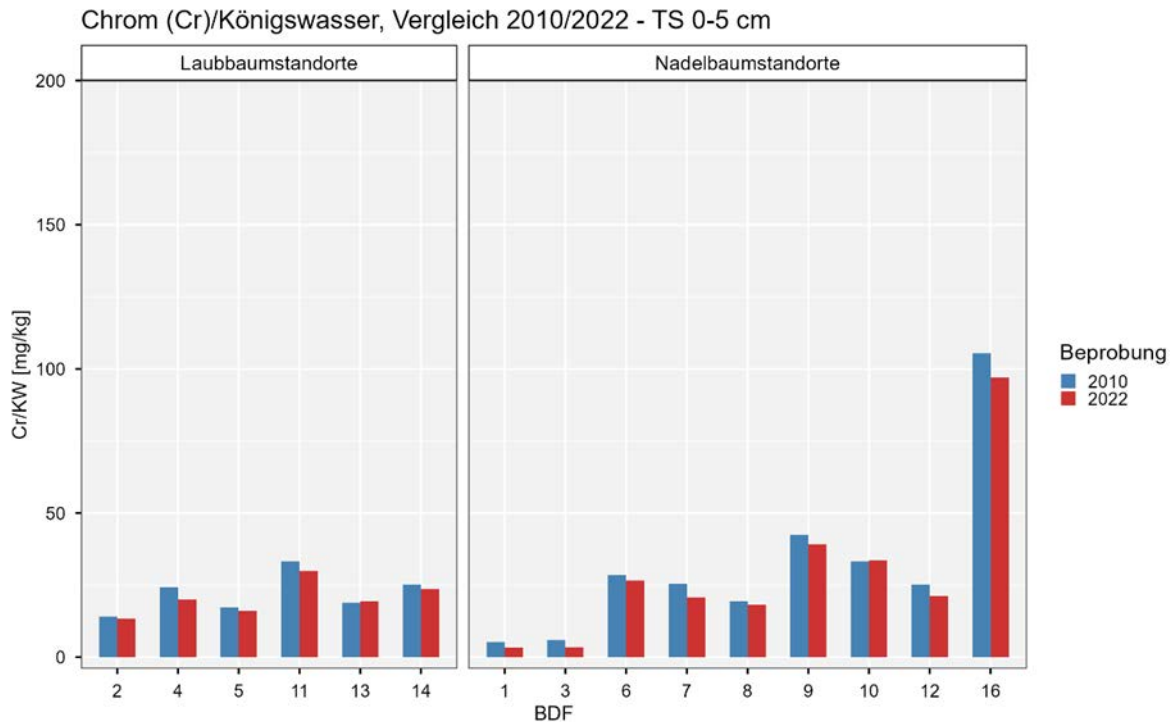


Abb. 29: Vergleich der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.5 Kupfer

Abb. 30 zeigt die Tiefenverteilung von Kupfer (Cu) in allen BDF. Die höchsten Kupfergehalte finden sich in der organischen Auflage.

Direkt auffallend ist, dass sich die Kupfergehalte in der organischen Auflage und der Tiefenstufe 0-5 cm im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 in einem niedrigeren Wertebereich befinden als im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010.

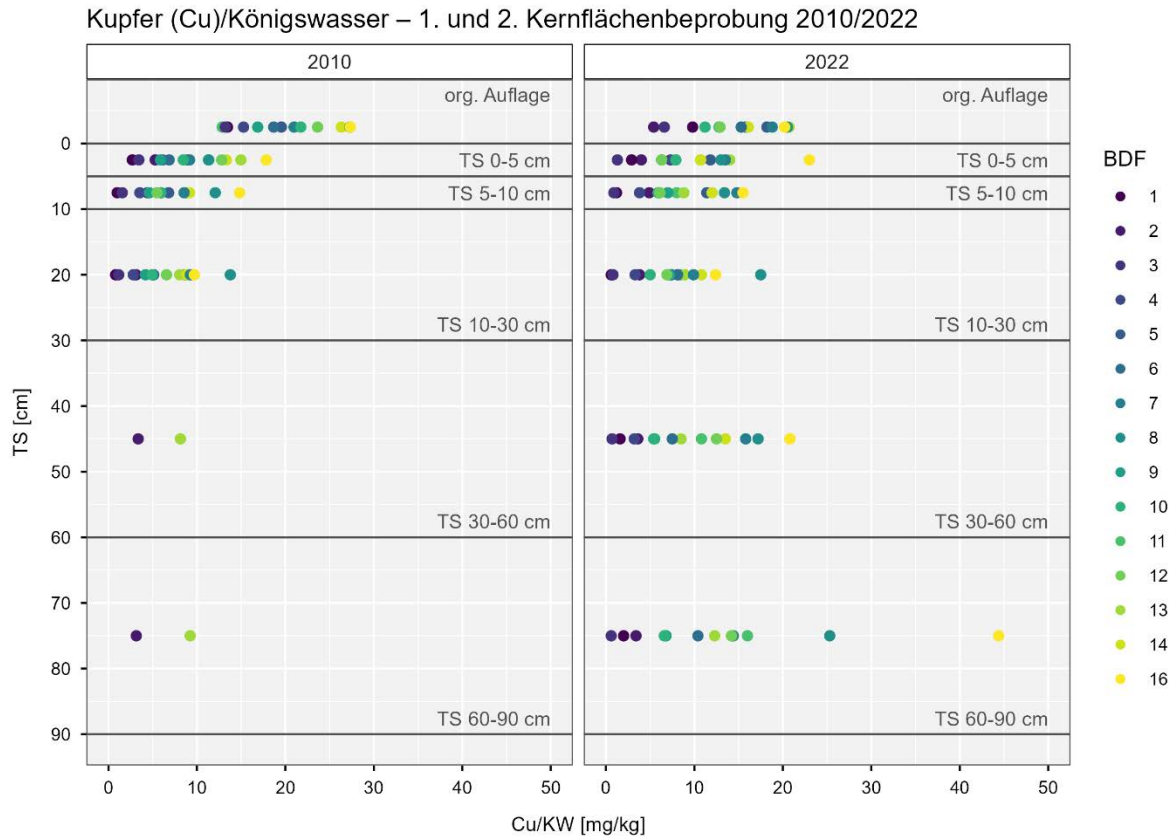


Abb. 30: Tiefenverteilung der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Abb. 31 stellt die Kupfergehalte in der organischen Auflage vergleichend dar. Diese unterscheiden sich nicht wesentlich je nach Baumbestand. Im zeitlichen Verlauf können für die begrenzte Anzahl an beprobten Laubbaumstandorten keine eindeutigen Trends der Kupfergehalte abgeleitet werden; **bei den Nadelbaumstandorten werden bei der aktuellen Probenahme jedoch durchgängig geringere Kupfergehalte als bei der Erstbeprobung 2010 festgestellt**. Die relative Abnahme beträgt im Median 26 % mit einer Standardabweichung der Einzelwerte von 13 %.

Im Vergleich zeigt sich in der Tiefenstufe 0-5 cm der Kupfergehalt je nach BDF variabel ab- bzw. zunehmend (Abb. 32). **Wird die Tiefenstufen ab 5 cm abwärts betrachtet, ist an nahezu allen Standorten eine Zunahme der Kupfergehalte festzustellen (Anhang Abb. A29 und Abb. A30)**. Lediglich BDF 3 und 11 sind die Ausnahme. Dies spricht für eine Tiefenverlagerung.

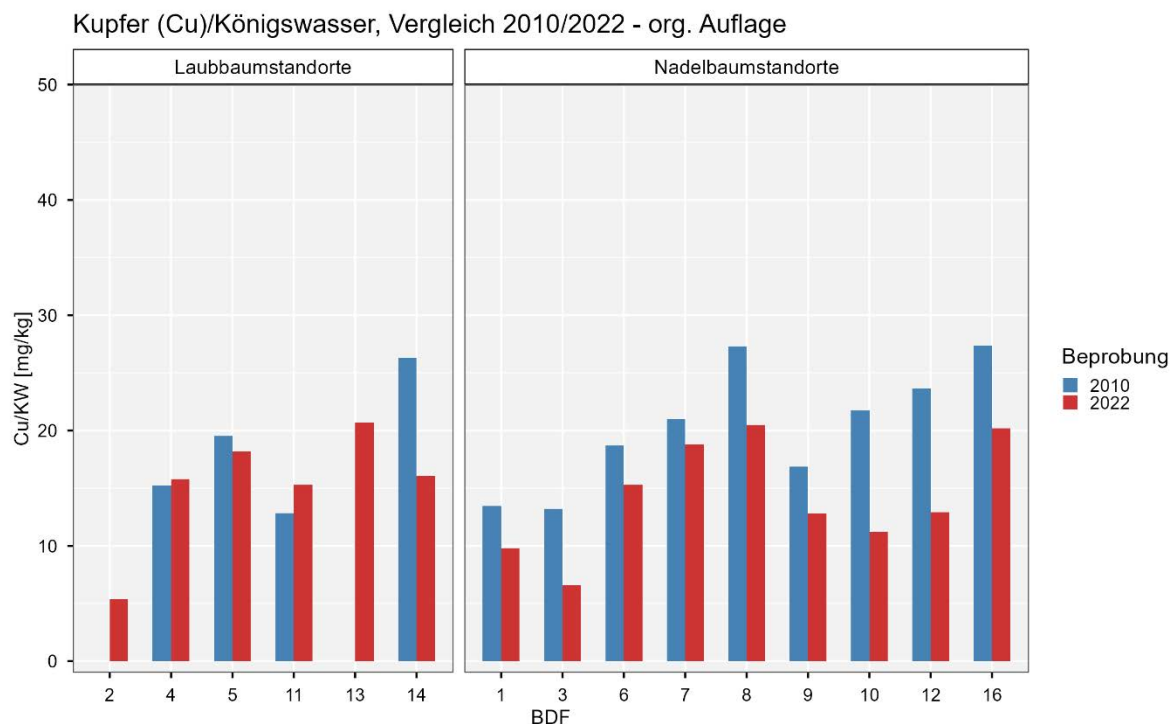


Abb. 31: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

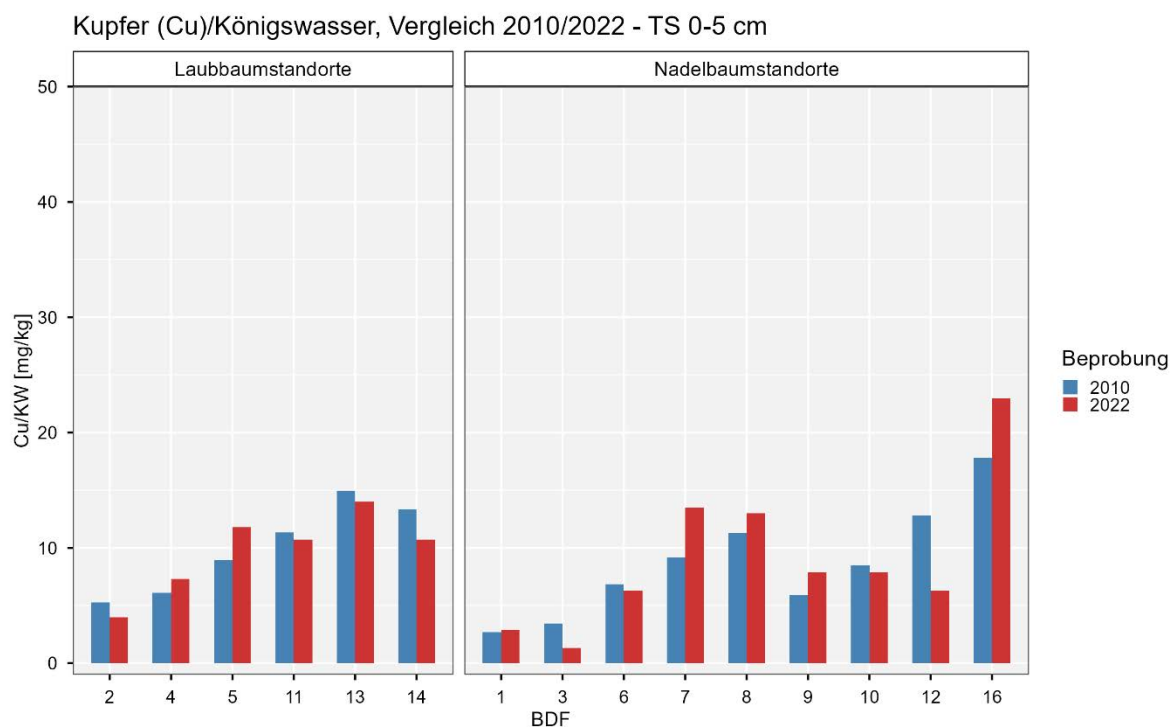


Abb. 32: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.6 Nickel

Nickel (Ni) ist im Boden relativ mobil. Vor allem niedrige pH-Werte fördern die Mobilität (LABO 2024). Somit findet unter gegebenen Bedingungen in der organischen Auflage keine nennenswerte Anreicherung statt. Das zeigt sich in den gemessenen Nickelgehalten der BDF (Abb. 33).

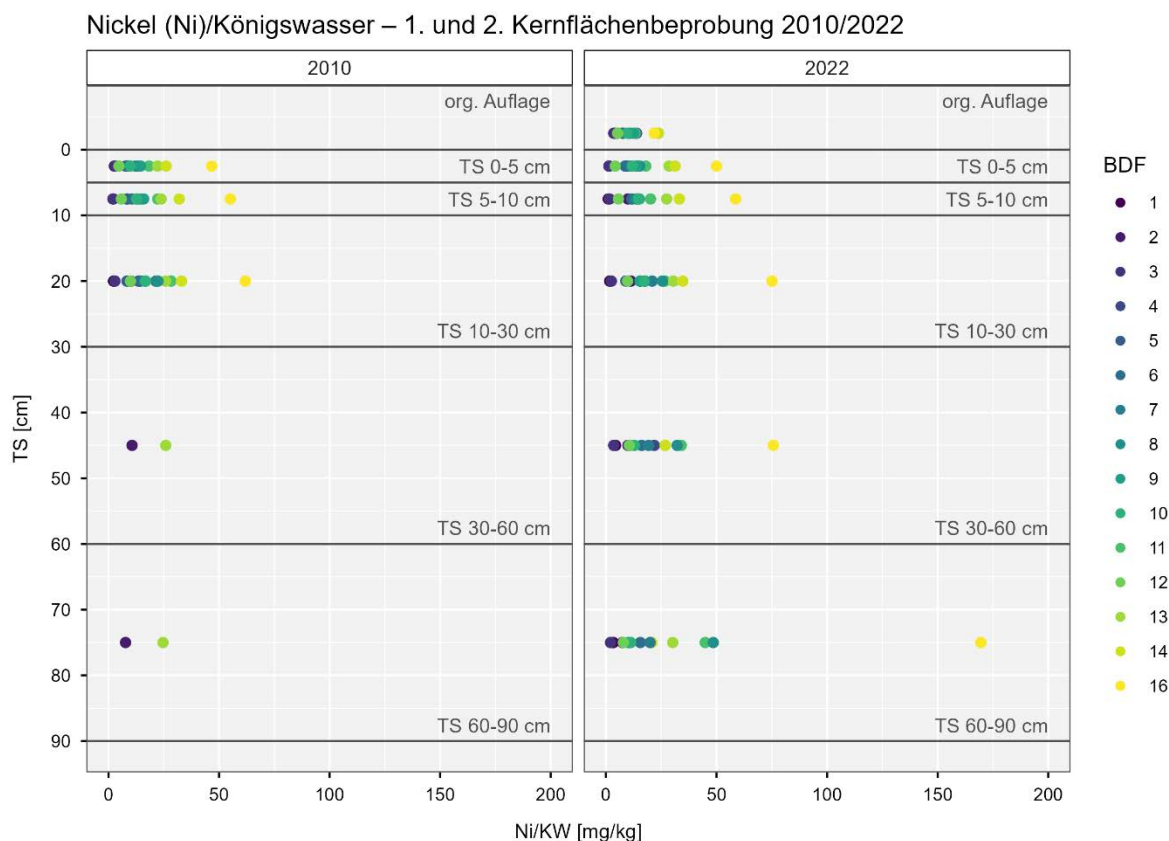


Abb. 33: Tiefenverteilung der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Die Nickelgehalte in der organischen Auflage liegen nur für die 2. Kernflächenbeprobung 2022 vor (Abb. A26).

Der Vergleich beider Kernflächenbeprobungen 2010 und 2022 zeigt Nickelgehalte bis in eine Tiefe bis 30 cm auf ähnlichem Niveau (Abb. 34, Anhang Abb. A27 und Abb. A28). Im Rahmen beider Beprobungen ist ebenso kein deutlicher Unterschied zwischen Laub- und Nadelbaumstandorten festzustellen, was eher auf geogenes Nickel hindeutet (MKUEM 2022).

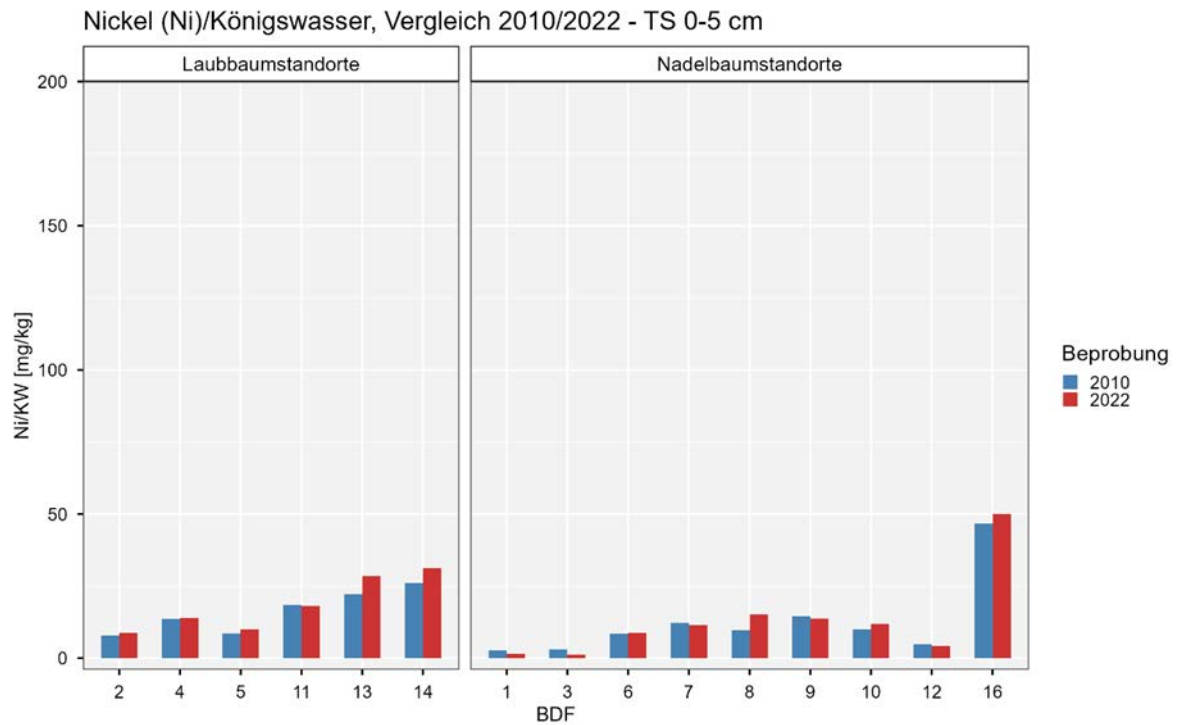


Abb. 34: Vergleich der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.7 Quecksilber

Quecksilber (Hg) geht starke Bindungen mit der organischen Substanz in der organischen Auflage ein und zeigt Mobilisierbarkeit erst bei sehr niedrigen pH-Werten ($\text{pH} < 4$) (LABO 2024).

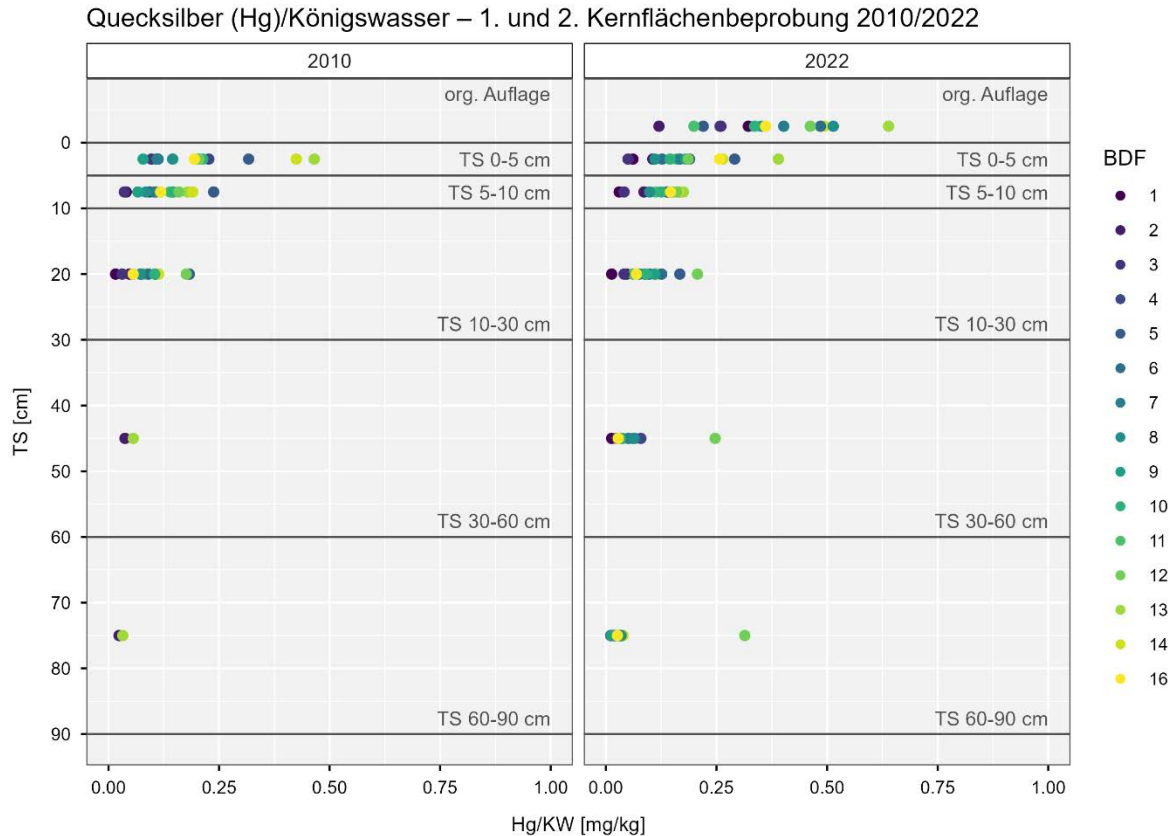


Abb. 35: Tiefenverteilung der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Abb. 35 stellt die Tiefenverteilung von Quecksilber für beide Kernflächenbeprobungen dar. Die höchsten Quecksilbergehalte finden sich in der organischen Auflage. Die Quecksilbergehalte in der organischen Auflage liegen nur für die 2. Kernflächenbeprobung 2022 vor (Abb. A31). Diese sind unauffällig.

Im mineralischen Oberboden zeigen Laubbaumstandorte Quecksilbergehalte auf ähnlichem, wenn auch geringfügig höherem Niveau als Nadelbaumstandorte (Abb. 36). Dieser ohnehin schon geringe Unterschied gleicht sich mit zunehmender Tiefe aus. Im Vergleich beider Kernflächenbeprobungen kann im mineralischen Oberboden an Laubbaumstandorten im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung eine Abnahme der Quecksilbergehalte von 16 % im Median in der Tiefenstufe 0-5 cm festgestellt werden. An Nadelbaumstandorte fallen die Konzentrationsänderungen variabel aus (Anhang, Abb. A32 und Abb. A33).

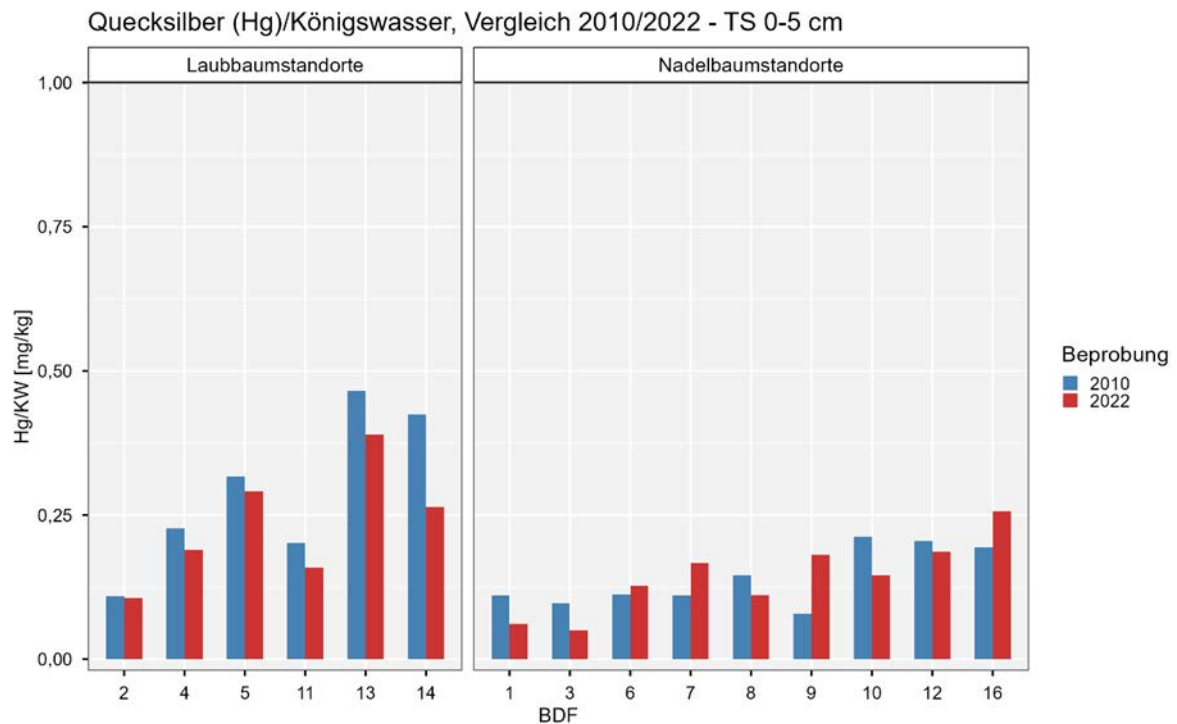


Abb. 36: Vergleich der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.6.8 Zink

Zink ist ein wichtiges Spurenelement und wirkt erst bei hohen Konzentrationen toxisch. Es bindet sich an organische Substanz, ist jedoch bei niedrigen pH-Werten leicht mobilisierbar.

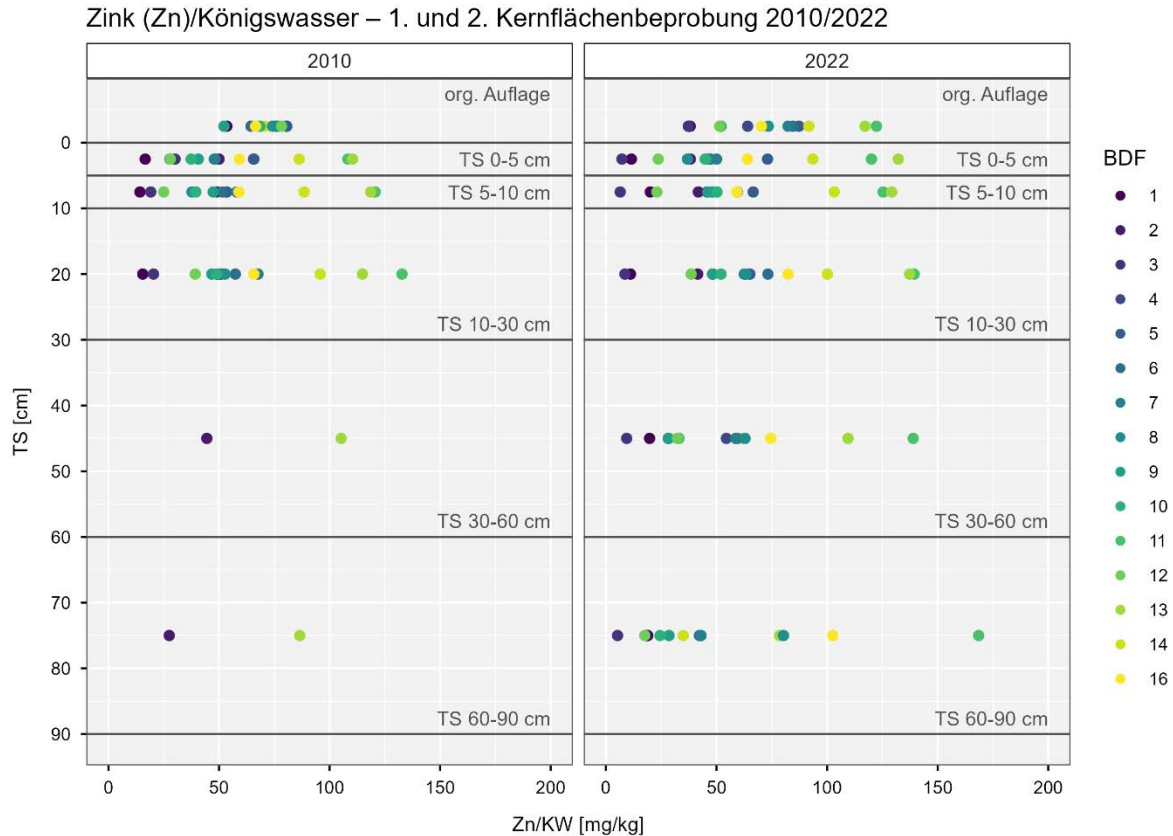


Abb. 37: Tiefenverteilung der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

Abb. 37 stellt die Tiefenverteilung der Zinkgehalte beider Beprobungen dar. Zink zeigt eine starke Variabilität innerhalb der gemessenen Gehalte. Ein Teil der BDF zeigt die höchsten Zinkgehalte in der organischen Auflage, andere zeigen eine Zunahme in der Tiefe.

In der organischen Auflage lassen sich hinsichtlich der Zinkgehalte keine nennenswerten Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbaumstandorten feststellen (Abb. 38).

Im Vergleich beider Kernflächenbeprobungen zeigen sich die Zinkgehalte variabel. Im Mineralboden bildet sich dies ebenso ab (Abb. 39, Anhang Abb. A34 und Abb. A35).

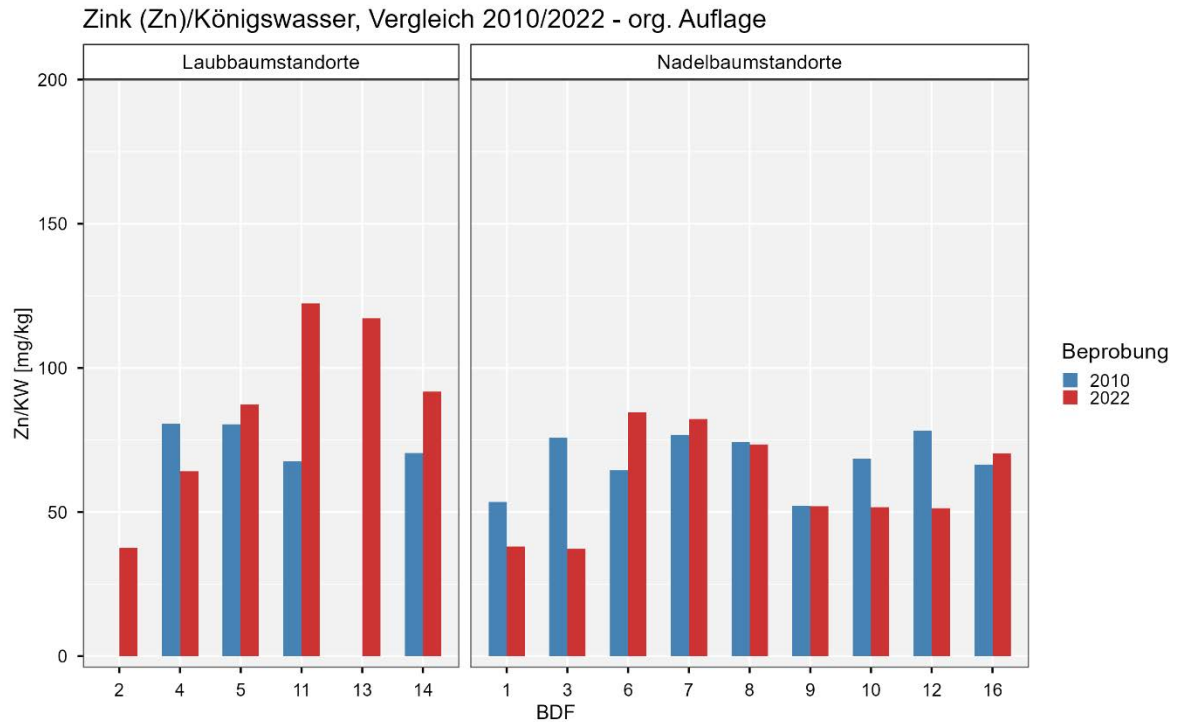


Abb. 38: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

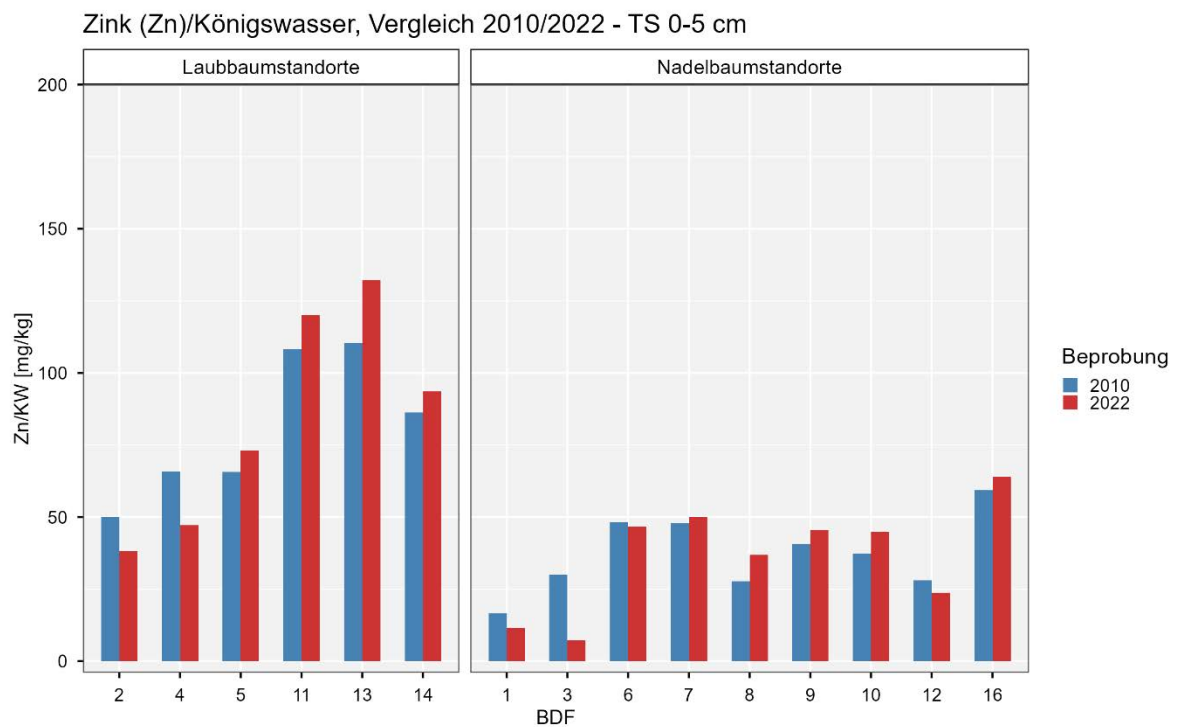


Abb. 39: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.7 ¹³⁷Cäsium

¹³⁷Cäsium (¹³⁷Cs) ist ein künstliches Radionuklid, dass infolge oberirdischer Kernwaffentests und insbesondere durch den Reaktorunfall in Tschernobyl im April 1986 in die Atmosphäre gelangte und kontinental bis global verbreitet wurde. Atmosphärische Einträge in den Boden waren niederschlagsbedingt regional sehr unterschiedlich. Aufgrund einer Halbwertszeit von 30,17 Jahren nimmt die Aktivitätskonzentration von ¹³⁷Cäsium als Funktion der Zeit im Boden ab, ist jedoch nach wie vor radiotoxikologisch relevant.

Die Mobilisierbarkeit ist gering bis mäßig, was die Verlagerung in die Tiefe einschränkt. Unter extrem sauren Bedingungen (pH < 3) steigt die Mobilität an (MKUEM 2022). Ebenso spielt die Zersetzungsrate der Streu eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Tiefenverlagerung von ¹³⁷Cäsium (ZIBOLD et al. 2007).

In den untersuchten BDF zeigen sich die höchsten spezifischen Aktivitäten von ¹³⁷Cäsium in der organischen Auflage. Mit zunehmender Tiefe sinken diese rasch ab (Abb. 40).

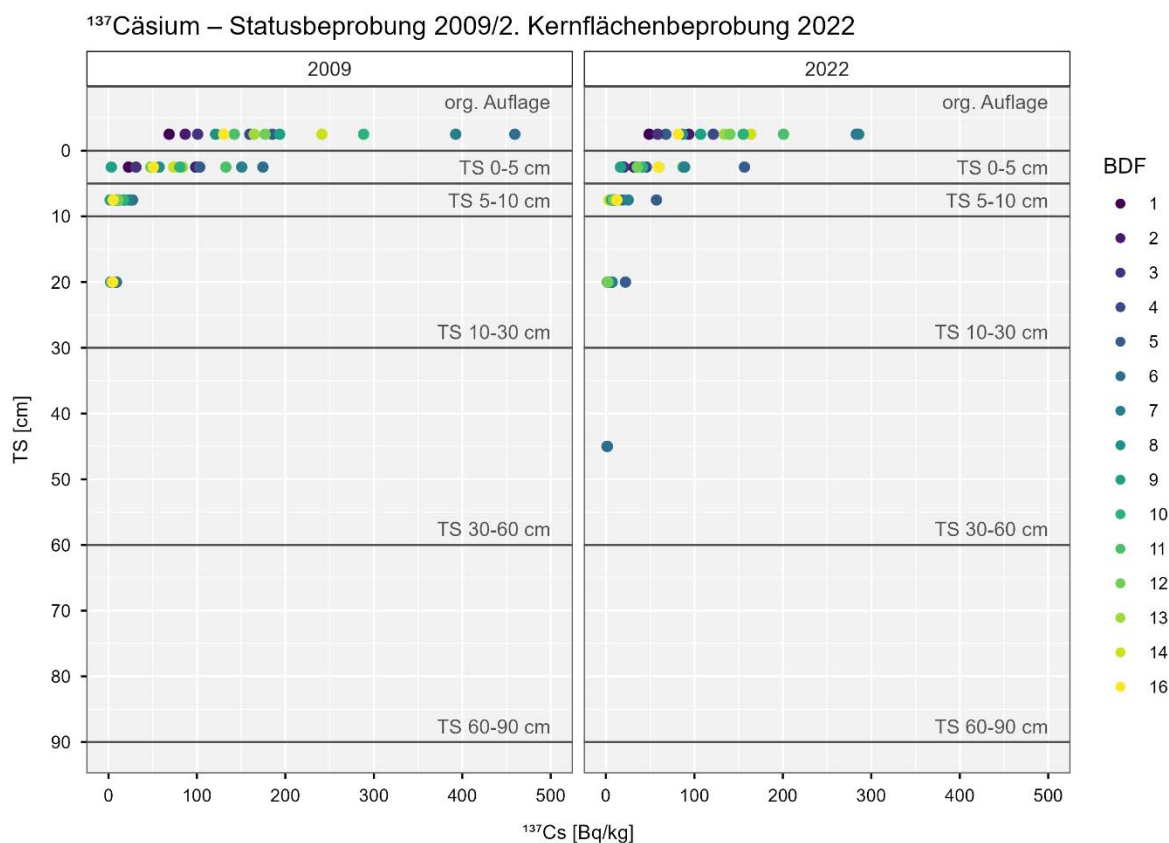


Abb. 40: Tiefenverteilung der spezifischen Aktivitäten von ¹³⁷Cs in Bq/kg aller BDF der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung

Standortabhängig ist die spezifische Aktivität von ¹³⁷Cäsium variabel, da die Menge des initial eingetragenen ¹³⁷Cäsiums in Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl im April 1986 kurzzeitig und kleinräumig stark von Niederschlagsmenge und -verteilung abhängig war

(HOHMANN et al. 2005). Besonders an BDF 6 und 7 lassen sich in 2009 spezifische Aktivitäten von annähernd 400 Bq/kg und höher nachweisen, während BDF 1 und 2 spezifische Aktivitäten unter 100 Bq/kg zeigen. Die Verteilung in die Tiefe bildet dies ebenso ab.

Unter Ausschluss des natürlichen Zerfalls gemäß Kap. 2.5.3 zeigt die 2. Kernflächenbeprobung 2022 im Vergleich zur Statusbeprobung 2009 eine Abnahme der spezifischen Aktivitäten von $^{137}\text{Cäsium}$ in der organischen Auflage und in den untersuchten Tiefenstufen bis 10 cm (Abb. 41, Anhang Abb. A36 und Abb. A37).

Diese Abnahme im Mineralboden ist jedoch deutlich geringer als in der organischen Auflage und gleicht sich in der Tiefenstufe 5-10 cm aus. Einige Standorte zeichnen sich durch eine Zunahme der spezifischen Aktivität von $^{137}\text{Cäsium}$ im Mineralboden aus. Vor allem der Laubbaumstandort BDF 5 fällt in diesem Zusammenhang auf. Dies deutet darauf hin, dass eine langsame und geringfügige Verlagerung in die Tiefe stattgefunden hat. Auch die im Allgemeinen sehr niedrigen pH-Werte unterstützen dies. Im Fall der BDF lässt sich keine Aussage zur Tiefenverlagerung im Zusammenhang mit Baumbestand und Streufall treffen.

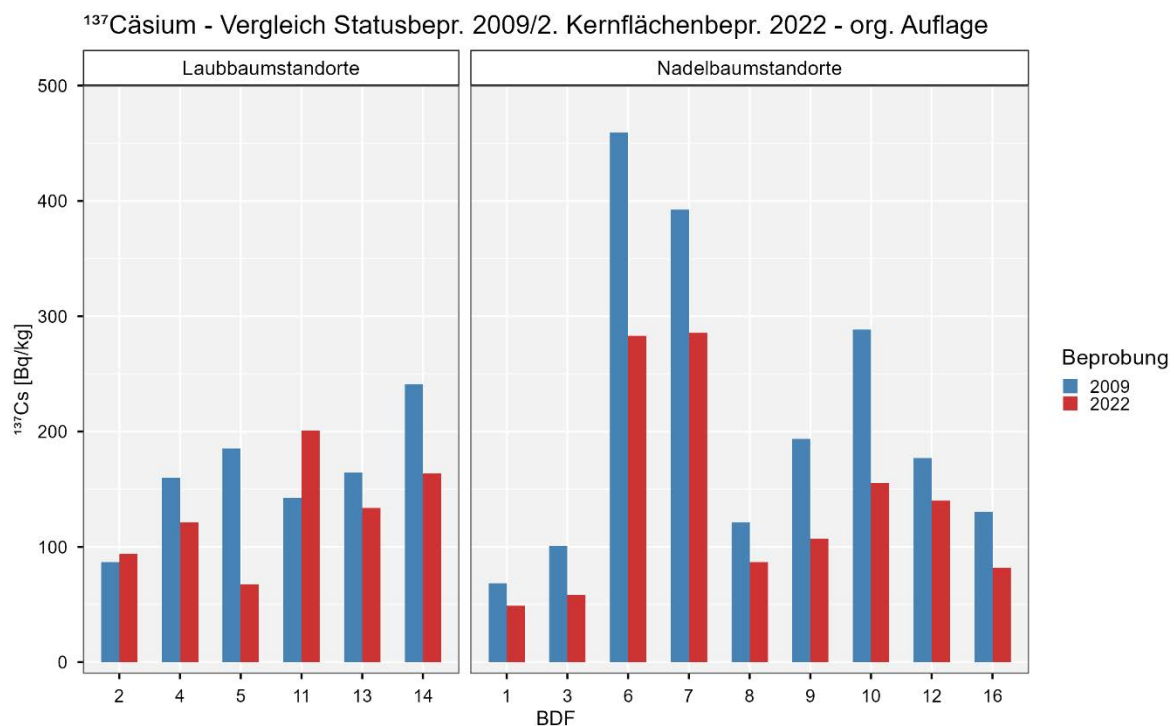


Abb. 41: Vergleich der spezifischen Aktivitäten von $^{137}\text{Cäsium}$ in Bq/kg in der organischen Auflage der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung 2022

3.8 Organische Schadstoffe

3.8.1 PFAS

Die Stoffgruppe der PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) umfasst nach letzten Schätzungen mehr als 10.000 verschiedene Einzelsubstanzen. Vertretend für die Stoffgruppe wurden im Rahmen des aktuellen Projektes 13 Verbindungen untersucht, für die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) bzw. gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) vorliegen und die nach DIN-Normen analysierbar sind (Tab. 15). Die untersuchten PFAS-Verbindungen finden sich ebenso im Leitfaden zur PFAS-Bewertung des Bundes (BMUKN, 2022).

Tab. 15: Die gemessenen 13 PFAS-Einzelsubstanzen, gruppiert nach Kettenlänge

	PFAS-Einzelsubstanz	Abkürzung	Summenformel	perfluorierte Kettenlänge
1	Perfluorbutansäure	PFBA	C ₄ HO ₂ F ₇	kurzkettig
2	Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	C ₄ HO ₃ F ₉ S	kurzkettig
3	Perfluorpentansäure	PFPeA	C ₅ HO ₂ F ₉	kurzkettig
4	Perfluorhexansäure	PFHxA	C ₆ HO ₂ F ₁₁	kurzkettig
5	Perfluorheptansäure	PFHpA	C ₇ HO ₂ F ₁₃	kurzkettig
6	Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	C ₆ HO ₃ F ₁₃ S	langkettig
7	Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	C ₇ HO ₃ F ₁₅ S	langkettig
8	Perfluoroctansäure	PFOA	C ₈ HO ₂ F ₁₅	langkettig
9	Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	C ₈ HO ₃ F ₁₇ S	langkettig
10	Perfluornonansäure	PFNA	C ₉ HO ₂ F ₁₇	langkettig
11	Perfluordecansäure	PFDA	C ₁₀ HO ₂ F ₁₉	langkettig
12	Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	langkettig, Vorläuferverbindung
13	6:2-Fluortelomersulfonsäure	6:2 FTSA (H ₄ PFOS)	C ₈ H ₅ O ₃ F ₁₃ S	langkettig, Vorläuferverbindung

Die Mobilität und das Sorptionsverhalten der oben genannten PFAS sind maßgeblich von der Kettenlänge abhängig. Kurzkettige PFAS zeigen eine höhere Wasserlöslichkeit und können somit durch Grund- und Niederschlagswasser mobilisiert und ausgewaschen werden. Sie werden weniger stark im Boden gebunden. Langkettige PFAS neigen zu geringerer Wasserlöslichkeit, zeichnen sich jedoch durch eine stärkere Bindung unter anderem an organischer Substanz aus.

PFAS konnten im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 in allen BDF nachgewiesen werden.

PFAS in der Feststoffanalytik

In der Feststoffanalytik wurden vor allem vergleichsweise hohe Gehalte der Einzelverbindungen PFOS, sowie PFBA und PFHxA festgestellt.

Zudem ist ein Zusammenhang zwischen standortspezifischem Streufall und den PFAS-Gehalten in der organischen Auflage sichtbar. Die Feststoffanalyse, als Maß für im Bodenmaterial gebundene PFAS, zeigt ungeachtet einzelfallbezogener Standortbedingungen höhere PFAS-Gehalte an Nadelbaumstandorten als an Laubbaumstandorten (Abb. 42). Dies kann zum einen auf mögliche Auskämmeffekte zurückgeführt werden. Zum anderen spielen die Zersetzungsraten der organischen Auflage, die resultierende Humusart sowie mögliche Tiefenverlagerung eine Rolle.

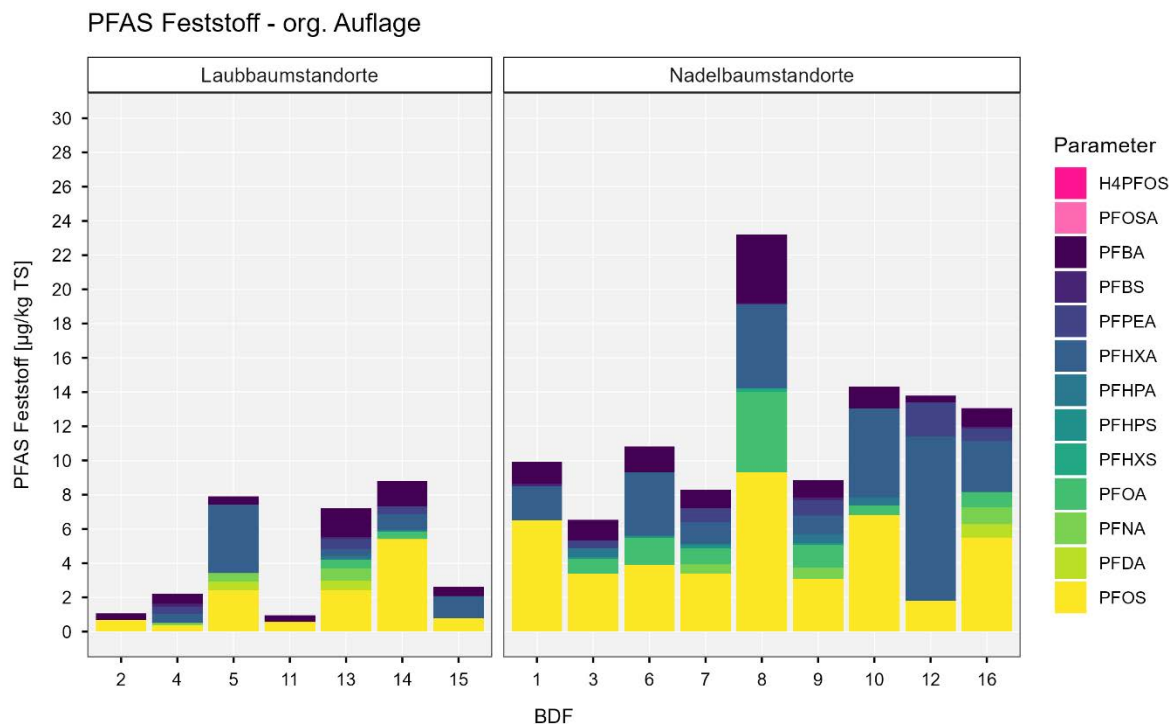


Abb. 42: PFAS Feststoff in µg/kg in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022

Der PFAS-Gesamtgehalt im mineralischen Oberboden an Nadelbaumstandorten liegt auf vergleichbarem bis niedrigerem Niveau als an Laubbaumstandorten (Abb. 43 und Abb. 44), was auf das stärkere Bindungs- und Rückhaltevermögen der organischen Auflage an Nadelbaumstandorten hindeutet.

Besonders deutlich zeigt sich dies bei BDF 8, die trotz der höchsten gemessenen PFAS-Gehalte in der organischen Auflage nur verhältnismäßig geringe Gehalte im mineralischen Oberboden aufweist. Im Gegensatz dazu weisen BDF unter Laubbaumbestand trotz niedrigerer PFAS-Gehalte in der organischen Auflage Gehalte im mineralischen Oberboden auf, die zum Teil über dem Niveau der Nadelbaumstandorte liegen. An Laubbaumstandorten findet somit eine stärkere Verlagerung in den mineralischen Oberboden statt, was auch auf die zügigere Zersetzung von Laubstreu zurückgeführt werden kann.

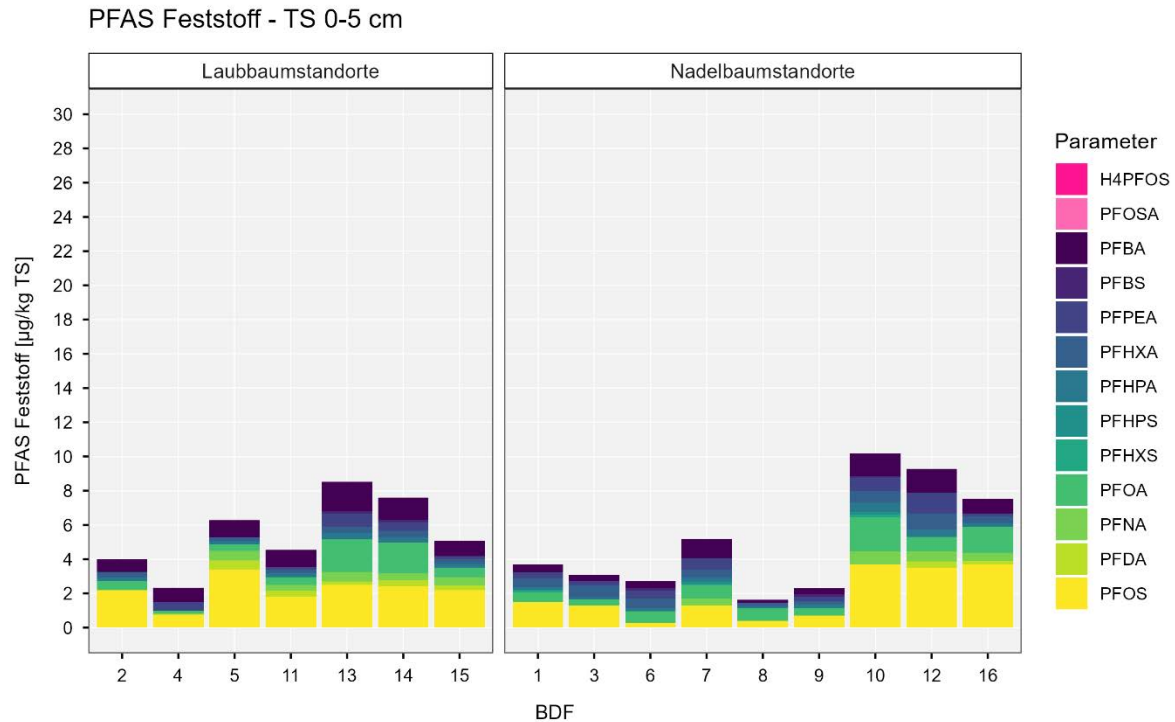


Abb. 43: PFAS Feststoff in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

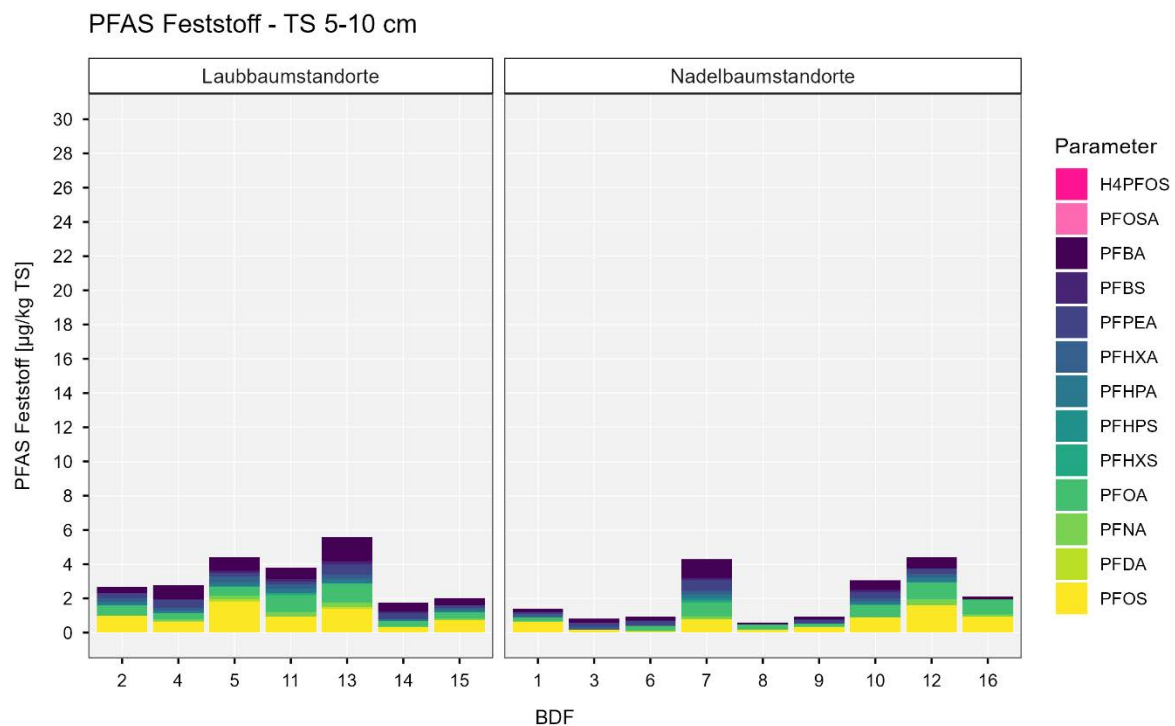


Abb. 44: PFAS Feststoff in µg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

Die Gehalte ausschließlich kurzkettiger bzw. ausschließlich langkettiger PFAS (Tab. 15) sind nach Tiefenstufen im Anhang (Abb. A38, Abb. A39, Abb. A40, Abb. A41, Abb. A42 und Abb. A43) noch einmal getrennt dargestellt.

PFAS in der Eluatanalytik

Die Analyse des Eluats dient der Erfassung des mobilisierbaren Anteils der PFAS aus den entnommenen Bodenmischproben. Kurzkettige Verbindungen werden bevorzugt mobilisiert, während langkettige Verbindungen verstärkt Bindungen unter anderem mit organischem Material in der organischen Auflage eingehen.

Abb. 45 zeigt die Gehalte der durch Elution mobilisierbaren PFAS in der organischen Auflage. Dieser Anteil steht im Zusammenhang mit dem PFAS-Gesamtgehalt und kann daher nur im Hinblick auf PFAS im Feststoff ausgewertet werden. Zum einen steigt bei höherem PFAS-Gesamtgehalt die Menge potentiell mobilisierbarer PFAS, ebenso sind jedoch auch die Mischungsverhältnisse der PFAS-Verbindungen im Gesamtgehalt und Eluat von Bedeutung.

Laubbaumstandorte zeigen in der organischen Auflage vor allem kurzkettige PFAS. Die Nadelbaumstandorte zeigen zudem langkettige PFAS. Langkettige PFAS sind jedoch an Nadelbaumstandorten in höheren Anteilen am Gesamtgehalt vorhanden. In der organischen Auflage der BDF 13 konnte ebenso die Vorläuferverbindung 6:2 FTSA (H_4PFOS) nachgewiesen werden.

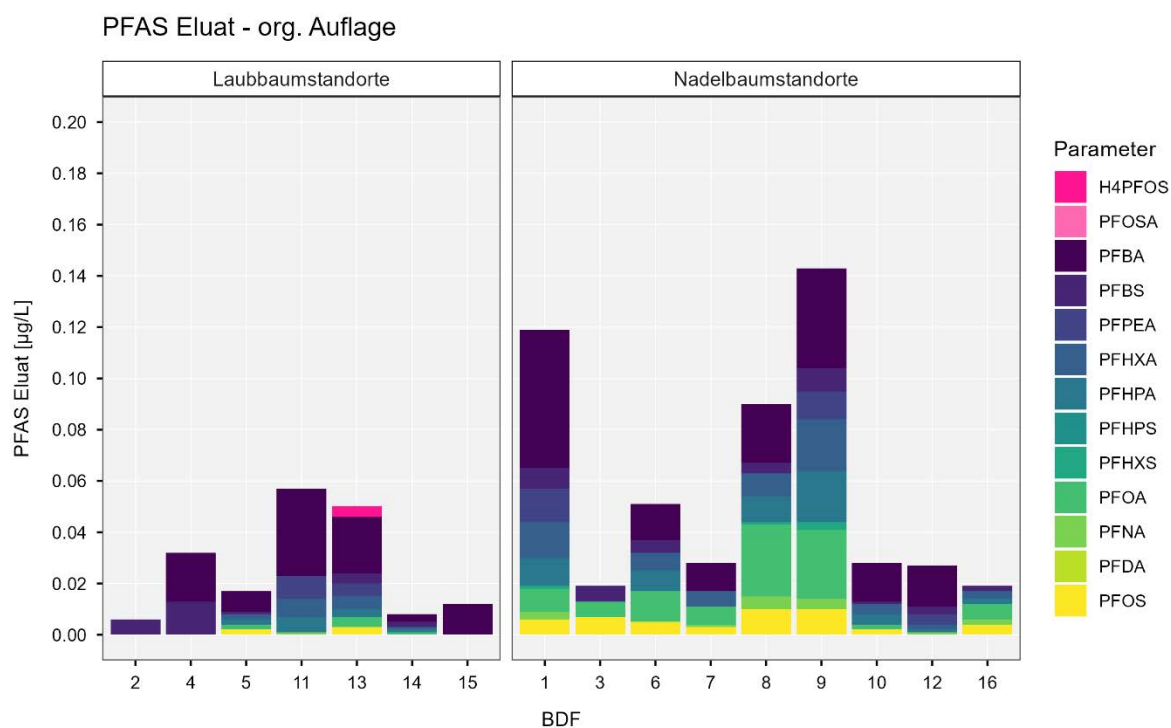


Abb. 45: PFAS Eluat in µg/l in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022

3.8.2 PFAS – Vergleich der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen

Dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz liegen Daten der Bundesländer Baden-Württemberg, Hessen und Nordrhein-Westfalen vor. Aufgrund der Unterschiede in Probennahme, Probenaufbereitung und Analytik können jedoch nur eine Auswahl von Daten aus dem Land Hessen für einen Vergleich herangezogen werden.

Im Rahmen der Bodendauerbeobachtung bestimmt das Bundesland Hessen seit dem Jahr 2022 PFAS-Gehalte in Böden. Zehn dieser hessischen Bodendauerbeobachtungsflächen befinden sich im Wald und werden im Folgenden vergleichend ausgewertet.

Tab. 16: Gegenüberstellung des Probenahmeschemas und der Methoden der PFAS-Bestimmung der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen

	Rheinland-Pfalz	Hessen
Kernfläche	☐ 50 x 50 m	☐ 30 x 30 m
Probennahmeschema	☐ Flächenmischproben aus 24 Einzelproben in 4 Reihen von jeweils 6 Punkten	☐ Flächenmischproben aus 18 Einzelproben über die Flächendiagonale
Probennahme	☐ Tiefenstufenbezogene Probennahme ☐ <u>org. Auflage</u> : Mischprobe aller Auflagenhorizonte ☐ <u>Mineralboden</u> : nach Tiefenstufen: 0-5 cm, 5-10 cm	☐ Horizontbezogene Probennahme ☐ <u>org. Auflage</u> : separate Beprobung von L, Of, Oh, Of/Oh ☐ <u>Mineralboden</u> : nach Horizont (Ah, Bv etc.) bis 30 cm Tiefe
Analytik Feststoff	☐ Messung nach DIN 38414-14 ☐ 13 Einzelsubstanzen ☐ BG: 0,1 mg/kg, teilweise Anhebung aufgrund von Matrixstörungen	☐ Messung nach DIN 38414-14 ☐ 23 Einzelsubstanzen ☐ BG: 0,1 mg/kg
Analytik Eluat	☐ Elution: <u>org. Auflage</u> und Mineralboden 10:1 nach DIN 12457-4 ☐ Messung nach DIN 38407-42 ☐ 13 Einzelsubstanzen ☐ BG: 0,001 mg/l, teilweise Anhebung aufgrund von Matrixstörungen	☐ Elution: <u>org. Auflage 10:1</u> nach DIN 12457-4, <u>Mineralboden 2:1</u> nach DIN 19529 ☐ Messung nach DIN 38407-42 ☐ 23 Einzelsubstanzen ☐ BG: 0,001 mg/l

Da sich auch die Länderprogramme von Rheinland-Pfalz und Hessen hinsichtlich Probennahme, Methoden und der beauftragten Labore unterscheiden, kann nur ein Teil der Ergebnisse direkt verglichen werden (Tab. 16).

In Hessen wurden die Horizonte der organischen Auflage separat beprobt, in Rheinland-Pfalz wurde bereits bei Probennahme eine Mischprobe erstellt. Um die Vergleichbarkeit der länderspezifischen Messwerte zu gewährleisten, wurden für Hessen entsprechend gewichtete Mittelwerte aus L, Of und Oh berechnet.

In Hessen wurde der Mineralboden nach Horizonten und nicht, wie in Rheinland-Pfalz, nach definierten Tiefenstufen beprobt. Aus diesem Grund wurden nur der Ah-Horizont verglichen, wenn dessen Mächtigkeit mit der Tiefenstufe 0-5 cm übereinstimmt. In Hessen war das bei sieben der zehn Wald-BDF der Fall. Es handelt sich um Laubbaumstandorte.

Abb. 46 zeigt die PFAS-Gehalte der organischen Auflage der ausgewählten hessischen Laubbaumstandorte sowie der rheinland-pfälzischen Laub- und Nadelbaumstandorte. Der

Unterschied zwischen Laub- und Nadelbaumstandorten wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert, sodass im Folgenden nur auf den Vergleich der Laubbaumstandorte beider Bundesländer eingegangen wird.

Die Gesamtgehalte liegen auf ähnlichem Niveau. PFOS ist in allen hier gezeigten BDF deutlich vertreten, gefolgt von PFBA und PFOA. Hervorzuheben ist, dass der Anteil kurzkettiger PFAS in den organischen Auflagen der rheinland-pfälzischen BDF höher ist als bei den hessischen BDF. Dies zeigt sich vor allem bei der Einzelverbindung PFHxA. Ob dies auf einen Effekt der unterschiedlichen Beprobung und Analytik zurückzuführen ist, oder ob es sich um einen tatsächlichen Befund handelt, kann aufgrund des kleinen Probenumfangs an dieser Stelle nicht beschrieben werden.

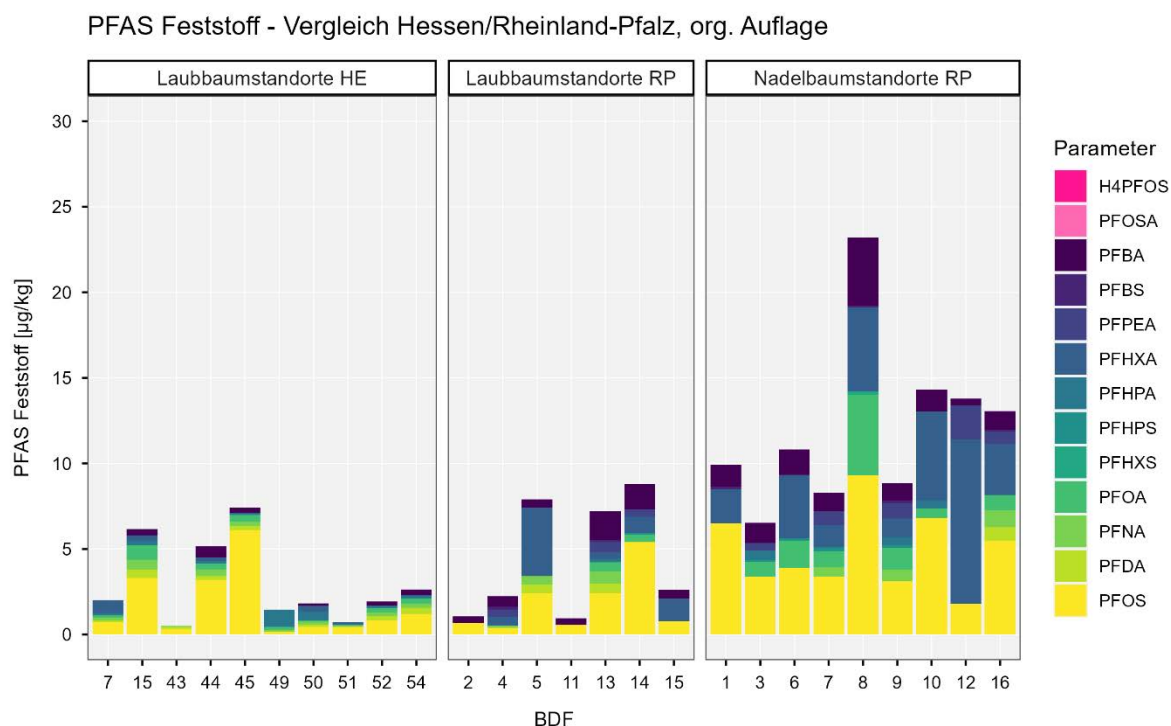


Abb. 46: PFAS Feststoff in µg/kg in der organischen Auflage von Laubbaumstandorten in Hessen und Laub- und Nadelbaumstandorten in Rheinland-Pfalz

In Abb. 47 werden die PFAS-Feststoffgehalte im mineralischen Oberboden der vergleichbaren BDF der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen anhand ihrer Standorte dargestellt.

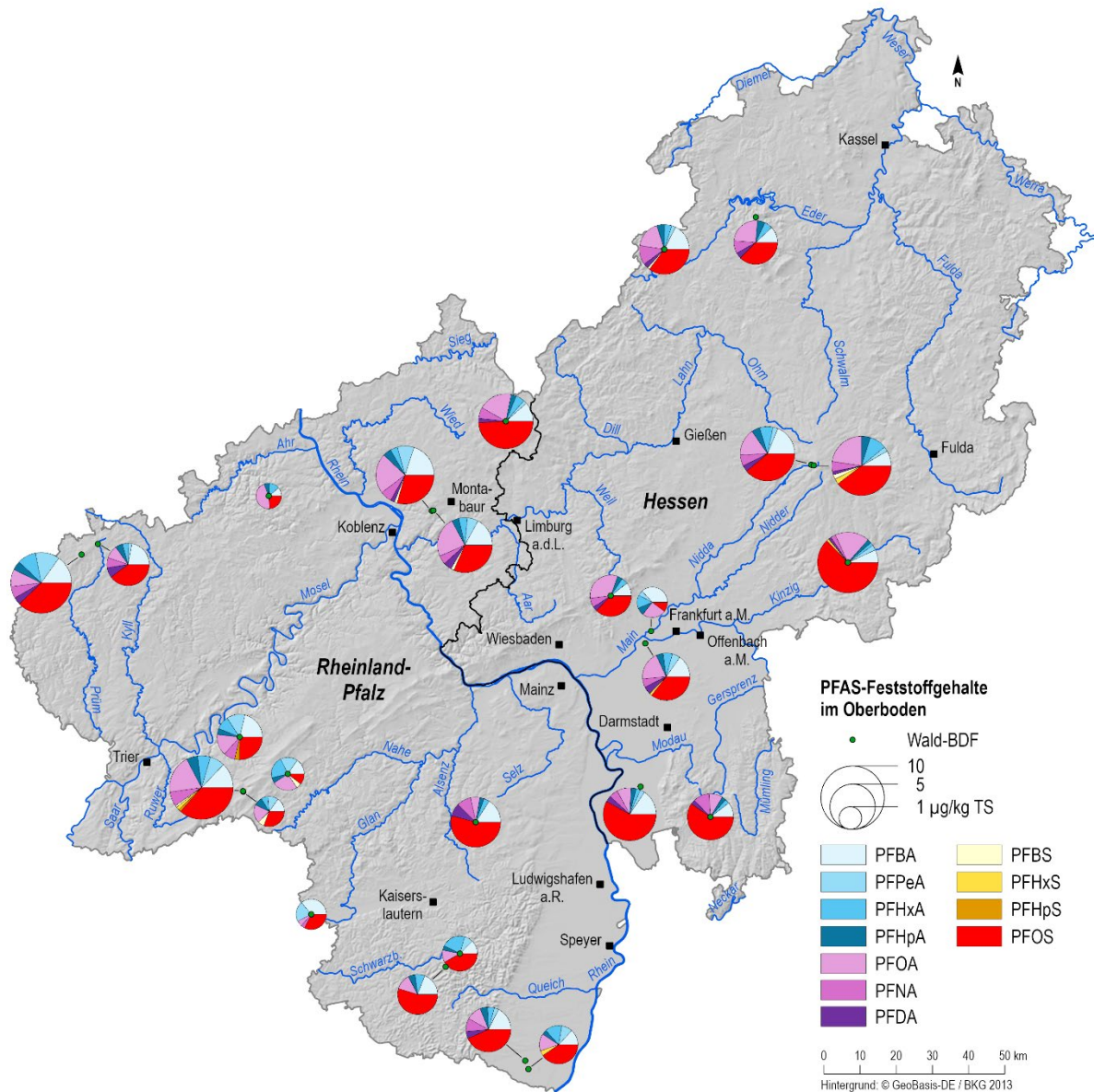


Abb. 47: PFAS-Feststoffgehalte im mineralischen Oberboden der vergleichbaren BDF der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Hessen (© HLNUG, HELLER ET AL. 2025)

In der Tiefenstufe 0-5 cm zeigt sich in der Summe der PFAS-Einzelsubstanzen, sowie für die Einzelsubstanzen selbst eine ähnliche Verteilung in beiden Bundesländern. In den hessischen BDF wurden jedoch vermehrt die Vorläufer H₄PFOS und PFOSA im mineralischen Oberboden nachgewiesen (Abb. 48).

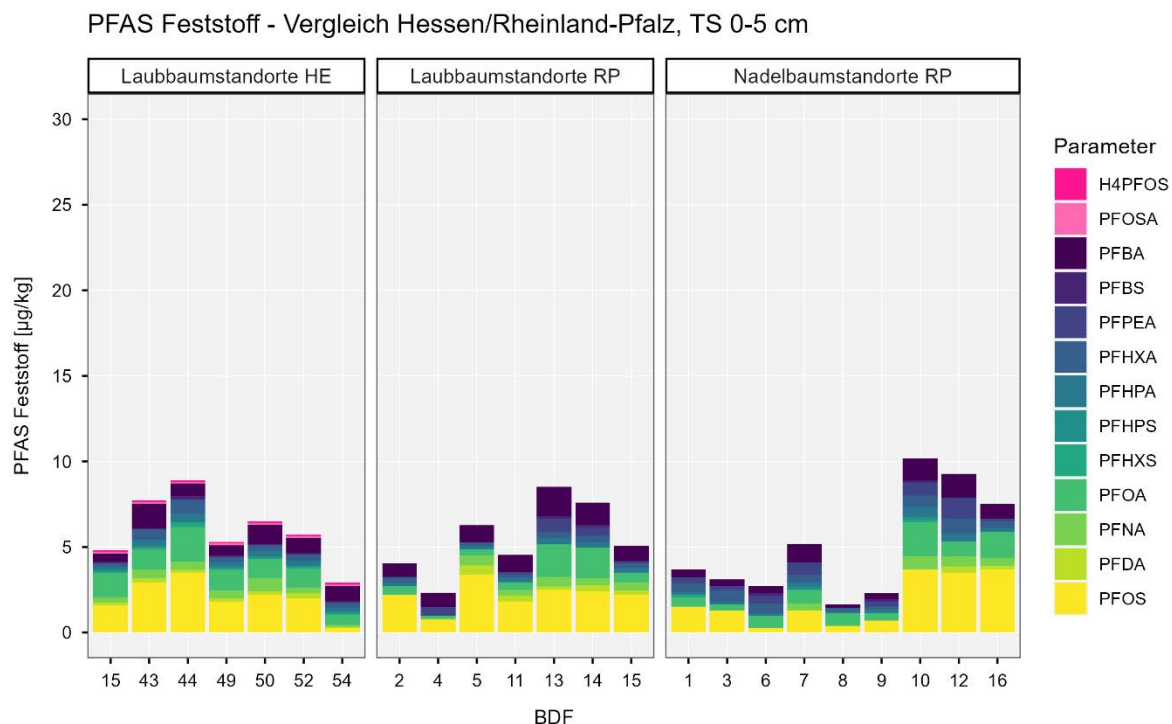


Abb. 48: PFAS Feststoff in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm von Laubbaumstandorten in Hessen und Laub- und Nadelbaumstandorten in Rheinland-Pfalz

Abb. 49 zeigt die PFAS-Konzentrationen im Eluat für die hessischen und rheinland-pfälzischen Standorte in der organischen Auflage. An rheinland-pfälzischen Laubbaumstandorten werden deutlich weniger der langkettigen Vertreter (PFOS, PFOA) gemessen als an den hessischen Laubbaumstandorten. Auch die Vorläufersubstanz H₄PFOS ist nur in einer rheinland-pfälzischen BDF vertreten.

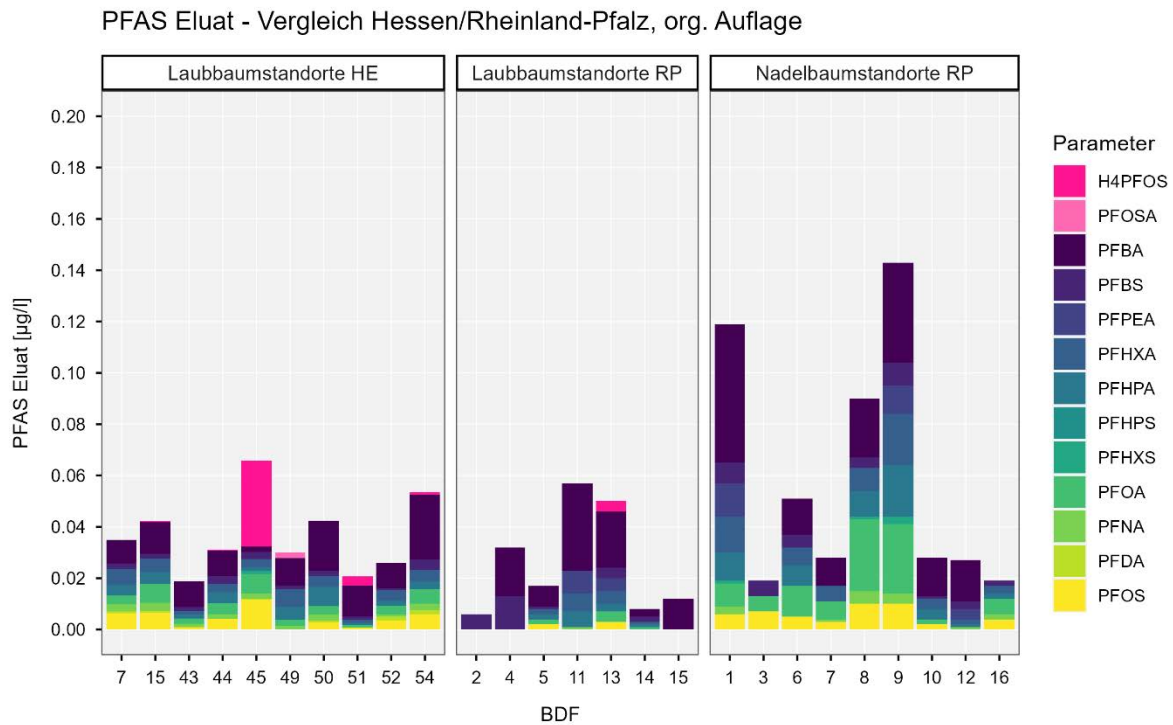


Abb. 49: PFAS Eluat-Konzentrationen in µg/l in der organischen Auflage von Laubbaumstandorten in Hessen und Laub- und Nadelbaumstandorten in Rheinland-Pfalz

Aufgrund unterschiedlicher Wasser/Feststoff-Verhältnisse können die Konzentrationen mobilisierbarer PFAS beider Bundesländer für den Mineralboden nicht unmittelbar verglichen werden. Während die hessischen Proben nach DIN 19529 mit einem Verhältnis von 2:1 eluiert wurden, wurde aufgrund des hohen Humusgehaltes für die Eluatherstellung bei den rheinland-pfälzischen Proben ein Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 nach DIN 12457 gewählt (Anhang, Abb. A46).

3.8.3 Dioxine, Furane und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle

Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F, hier als Dioxine und Furane bezeichnet) sind zwei Gruppen chemisch ähnlich aufgebauter chlorierter organischer Verbindungen, die als unerwünschte Nebenprodukte bei einer Vielzahl von industriellen Prozessen und Verbrennungsvorgängen entstehen können. Als persistente organische Schadstoffe werden sie in der Umwelt kaum abgebaut. Sie binden sich stark an die organische Substanz und sind entsprechend schwer mobilisierbar. Die folgende Tab. 17 beschreibt die PCDD/F und dl-PCB mit Toxizitätsäquivalent gemäß Bewertung WHO 2005.

Tab. 17: PCDD/F und dl-PCB mit Toxizitätsäquivalent gemäß Bewertung WHO 2005

Dioxine	TEF WHO 2005	dl-PCB	TEF WHO 2005
2,3,7,8-TCDD	1	PCB-77	0,0001
1,2,3,7,8-PeCDD	1	PCB-81	0,0003
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1	PCB-105	0,1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	PCB-114	0,03
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	PCB-118	0,00003
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	PCB-123	0,00003
OCDD	0,0003	PCB-126	0,00003
Furane	TEF WHO 2005	PCB-156	0,00003
2,3,7,8-TCDF	0,1	PCB-157	0,00003
1,2,3,7,8-PeCDF	0,03	PCB-167	0,00003
2,3,4,7,8-PeCDF	0,3	PCB-169	0,00003
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1	PCB-189	0,00003
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1		
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1		
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1		
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01		
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01		
OCDF	0,0003		

Erläuterung: TEF = Toxizitätsäquivalent

Dioxine, Furane und dl-PCB sind in praktisch allen BDF nachweisbar und können als ubiquitär verteilt betrachtet werden.

Die höchsten Toxizitätsäquivalente gemäß der Bewertung der WHO 2005 konnten in der organischen Auflage und im mineralischen Oberboden der Tiefenstufe 0-5 cm nachgewiesen werden. In der Tiefenstufe 5-10 cm sind weitaus geringere PCDD/F-Toxizitätsäquivalente zu finden (Abb. 50 und Abb. 51).

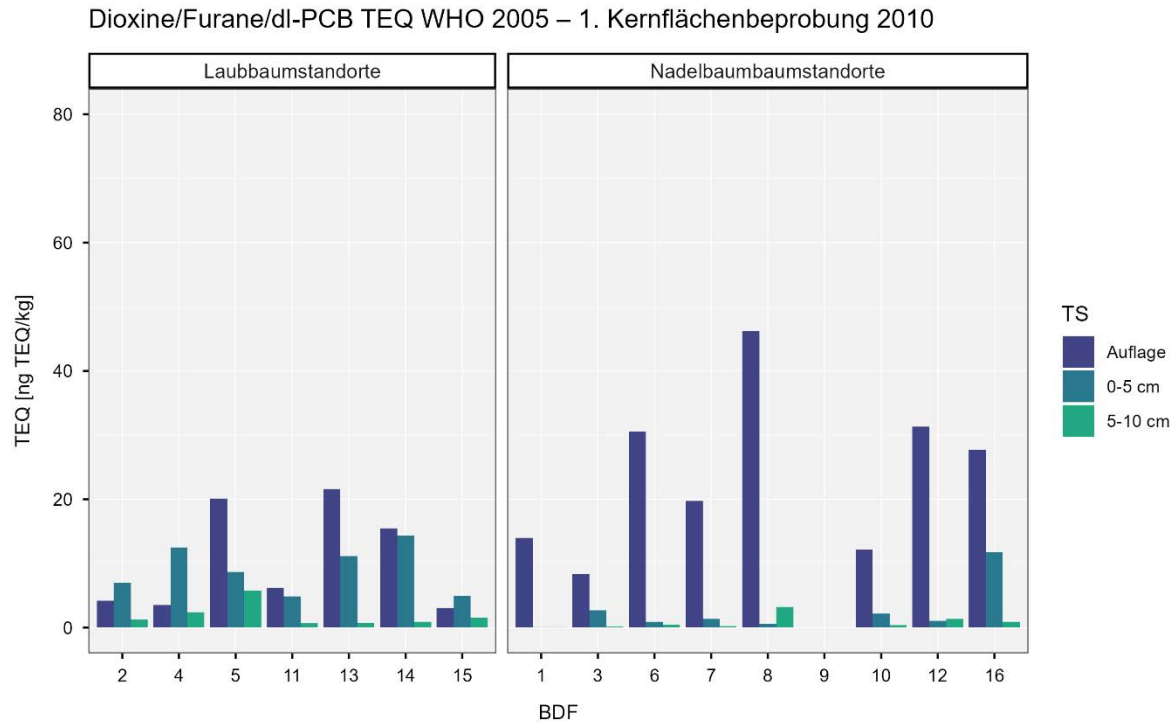


Abb. 50: Toxizitätsäquivalente von Dioxinen, Furanen und dl-PCB gemäß Bewertung der WHO 2005 nach Tiefenstufen bis 10 cm, 1. Kernflächenbeprobung 2010

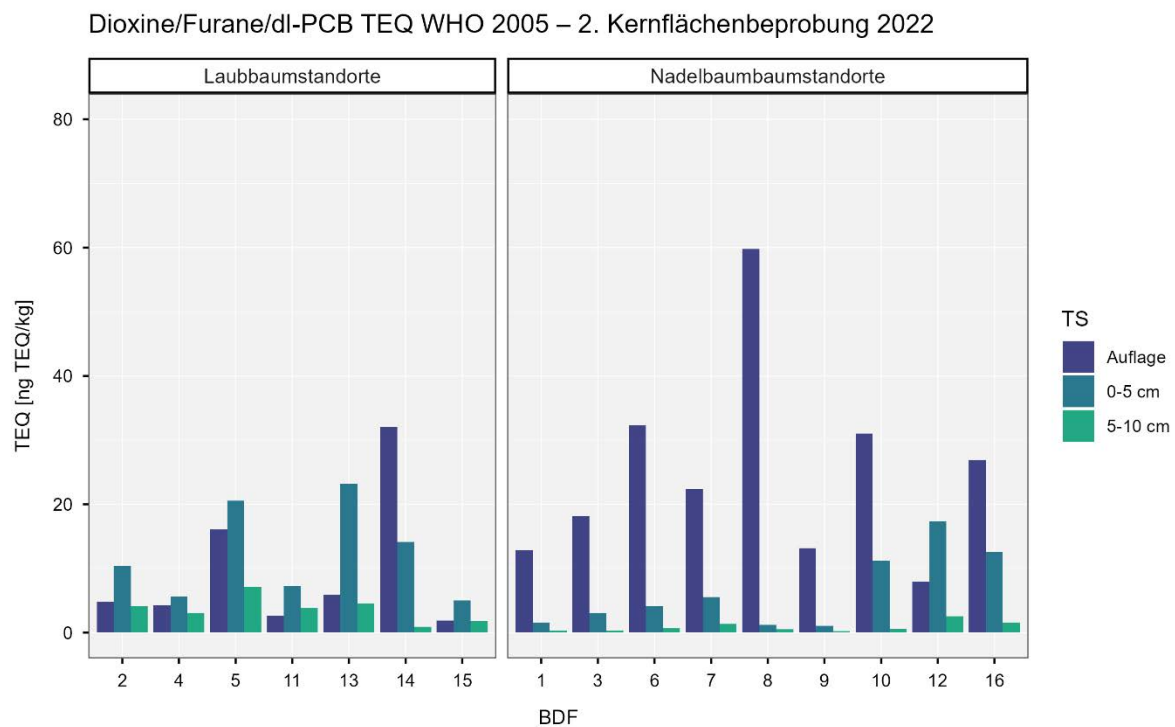


Abb. 51: Toxizitätsäquivalente von Dioxinen, Furanen und dl-PCB gemäß Bewertung der WHO 2005 nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

In den Abbildungen Abb. 52, Abb. 53 und Anhang, Abb. A46 wird ein Unterschied im Verhalten von Dioxinen, Furanen und dl-PCB zwischen Laub- und Nadelbaumstandorten deutlich.

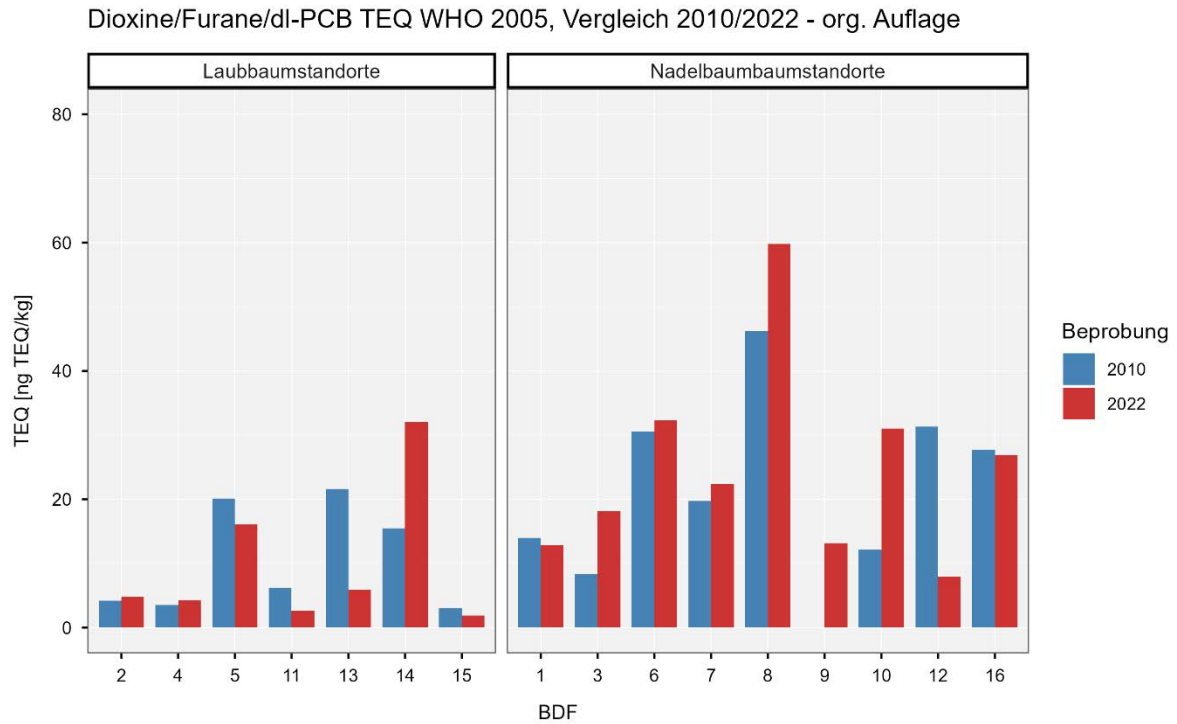


Abb. 52: Vergleich der Toxizitätsäquivalente gemäß Bewertung der WHO 2005 in ng TEQ/kg in der organischen Auflage der 1. Und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

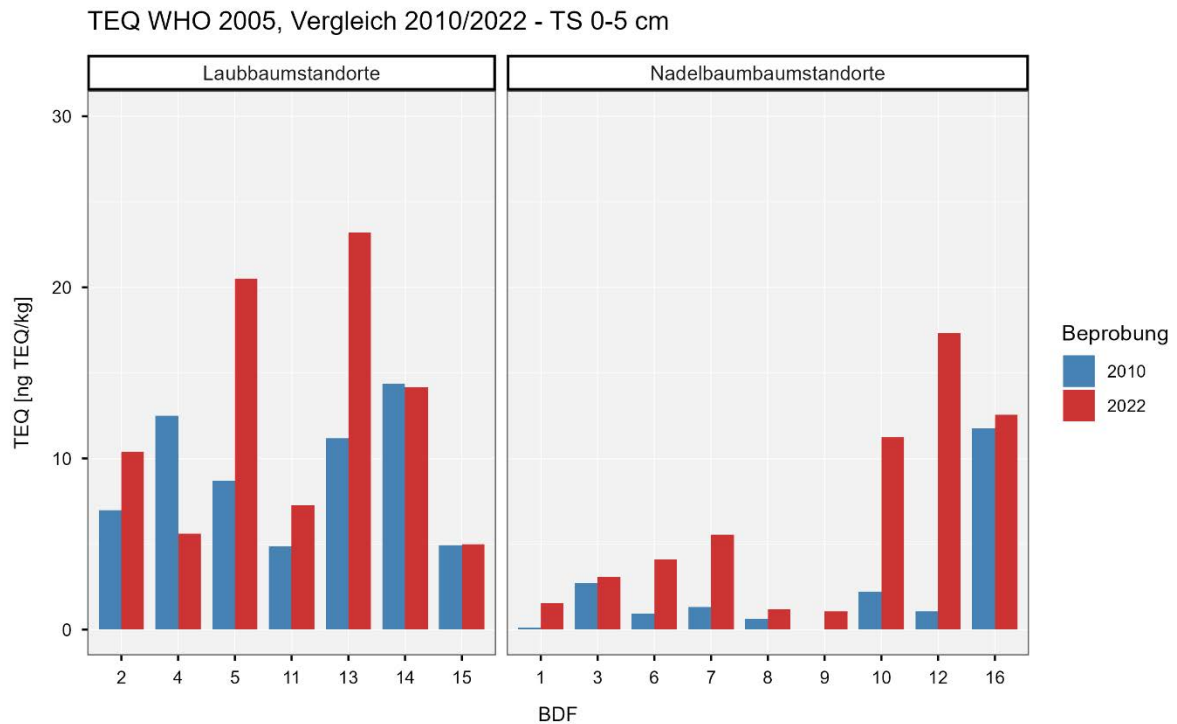


Abb. 53: Vergleich der Toxizitätsäquivalente gemäß Bewertung der WHO 2005 in ng TEQ/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

3.8.4 Polychlorierte Biphenyle

Polychlorierte Biphenyle (PCB) sind langlebige organische Schadstoffe, die sich durch atmosphärischen Eintrag anthropogener Herkunft in Böden akkumulieren. Seit 1989 ist die Herstellung und das Inverkehrbringen von PCB in Deutschland verboten. Das EU- und weltweite Verbot folgte im Jahr 2004.

Stellvertretend für die große Gruppe der PCB werden folgende, sechs repräsentative Einzelsubstanzen untersucht und deren Gehalt zur Berechnung des Summenparameters PCB₆ addiert (Tab. 18).

Tab. 18: PCB₆ Einzelverbindungen

PCB ₆	Verbindung
PCB 28	2,4,4'-Trichlorbiphenyl
PCB 52	2,2',5,5'-Tetrachlorbiphenyl
PCB 101	2,2',4,5,5'-Pentachlorbiphenyl
PCB 138	2,2',3,4,4',5'-Hexachlorbiphenyl
PCB 153	2,2',4,4',5,5'-Hexachlorbiphenyl
PCB 180	2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorbiphenyl

Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 sind PCB in der organischen Auflage aller Nadelbaumstandorte und einiger Laubbaumstandorte nachweisbar (Abb. 54). Im Mittel weisen dort Nadelbaumstandorte höhere PCB-Gehalte auf als Laubbaumstandorte.

Im mineralischen Oberboden sind an nahezu allen Laubbaumstandorten PCB nachweisbar, an Nadelbaumstandorten nur bei den BDF 7, 10, 12 und 16. Dies zeigt, dass die weniger mächtige organische Auflage der Laubbaumstandorte PCB weniger stark bindet und somit eine Mobilisierung und Verlagerung in den mineralischen Oberboden möglich ist. Auch die Zersetzungsrate spielt hierbei wieder eine Rolle.

PCB 6 - 2. Kernflächenbeprobung 2022

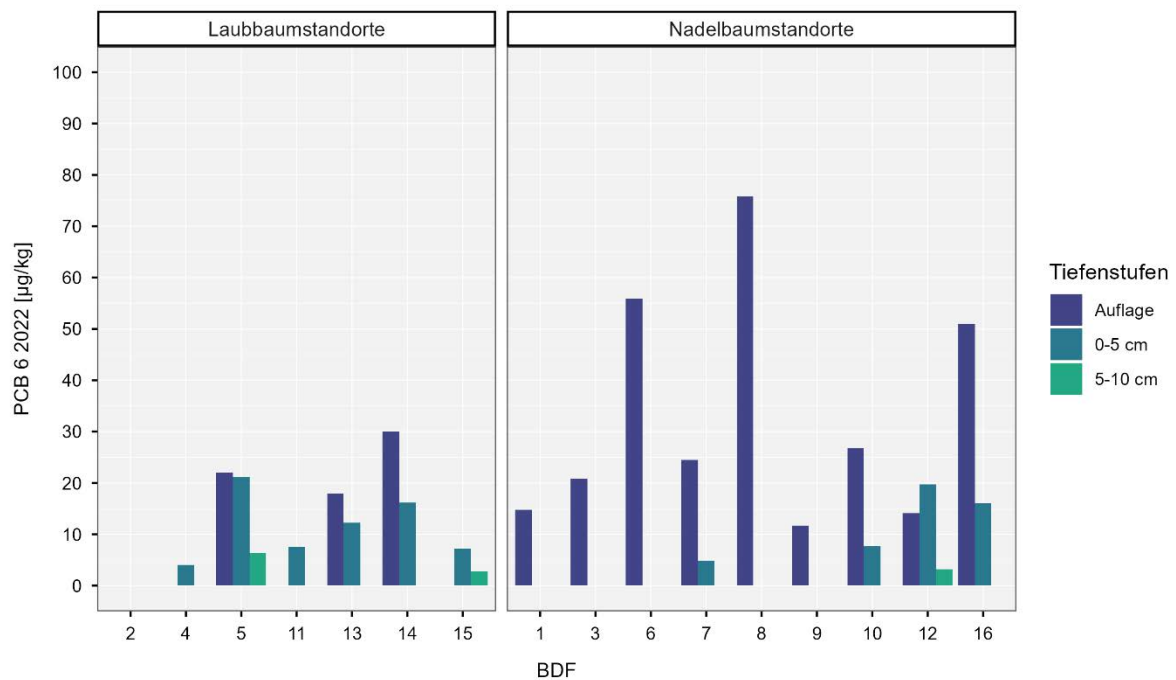


Abb. 54: PCB₆ in µg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

Analog zu Dioxinen, Furanen und dl-PCB waren die Bestimmungsgrenzen für PCB₆ im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 um den Faktor 10 höher als im Jahr 2022. Die gemessenen PCB-Gehalte werden somit nicht für einen Vergleich mit der 2. Kernflächenbeprobung 2022 herangezogen.

3.8.5 Polyzyklische Kohlenwasserstoffe

Der Summenparameter PAK₁₆ enthält 16 polyzyklische Kohlenwasserstoffe (Tab. 19), die von der amerikanischen Umweltbundesbehörde (United States Environmental Protection Agency, kurz US EPA) als prioritäre Umweltschadstoffe eingestuft wurden. Der genannte Summenparameter wird stellvertretend für die umfangreiche Gruppe der PAK untersucht.

Tab. 19: PAK₁₆ Einzelverbindungen

PAK ₁₆
Naphthalin
Acenaphthylen
Acenaphthen
Fluoren
Phenanthren
Anthracen
Fluoranthen
Pyren
Benzo(a)anthracen
Chrysen
Benzo(b)fluoranthen
Benzo(k)fluoranthen
Benzo(a)pyren
Dibenz(ah)anthracen
Benzo(ghi)perylene
Ideno(1,2,3-cd)pyren

Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 wurden die höchsten PAK-Gehalte in der organischen Auflage der Nadelbaumstandorte gemessen. Auch hier zeigt sich eine Tiefenverteilung ähnlich der bereits diskutierten organischen Schadstoffe hinsichtlich Laub- und Nadelbaumstandorten (Abb. 55).

Aufgrund der im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 höheren Bestimmungsgrenzen für polyzyklische Kohlenwasserstoffe wird von einem Vergleich mit der Beprobung 2022 abgesehen.

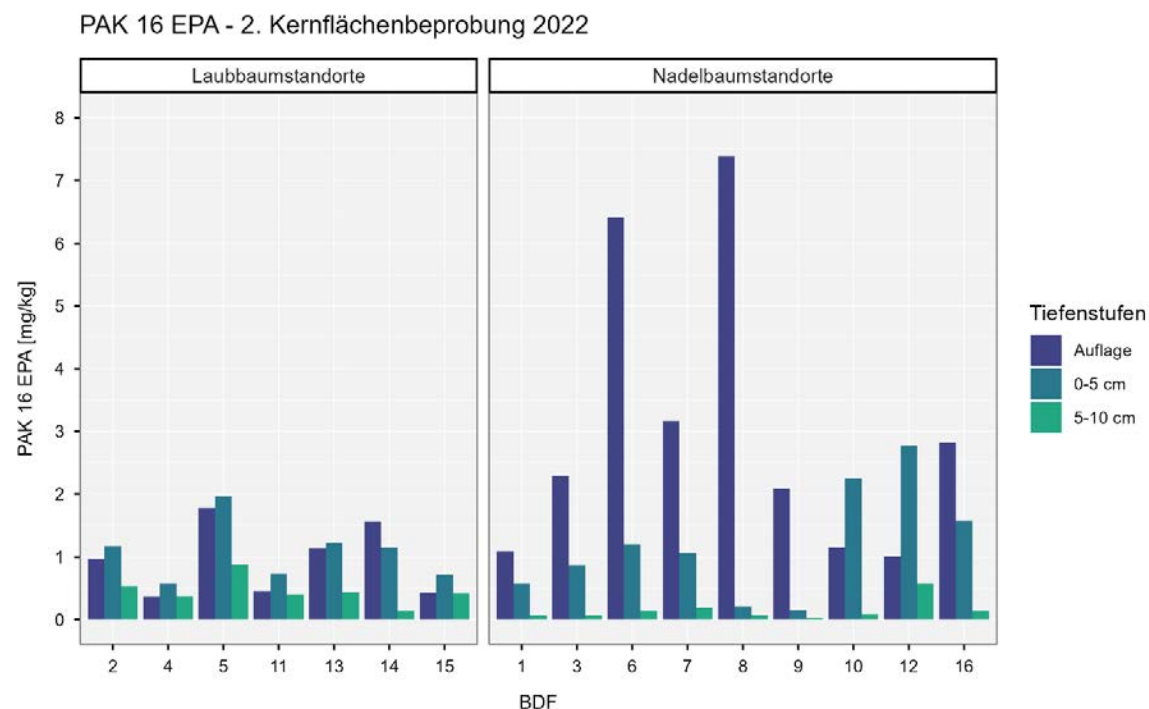


Abb. 55: PAK₁₆ in mg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

3.8.6 Organochlorpestizide und schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe

Organochlorpestizide (OCP) sind schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe, die unter anderem als Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel über Jahrzehnte weltweit Verwendung fanden. Organochlorpestizide sind kaum wasserlöslich, persistent und neigen zu Akkumulation in der organischen Auflage. Ihre Verwendung ist seit 2001 EU-weit verboten.

Tab. 20: Organochlorpestizide und schwerflüchtige Kohlenwasserstoffe

Organochlorpestizide und schwerflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe
Aldrin
o,p'-DDD
p,p'-DDD
o,p'-DDE
p,p'-DDE
o,p'-DDT
p,p'-DDT
Dieldrin
Endrin
Heptachlor
Heptachlorpoxid
Hexachlorbenzol
α-HCH
β-HCH
γ-HCH (Lindan)
δ-HCH
ε-HCH
Methoxychlor
Pentachlorbenzol

Im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 konnten von 14 analysierten Verbindungen (Tab. 20) nur die drei Einzelverbindungen DDD, DDE und DDT in einzelnen BDF in sehr geringen Gehalten nachgewiesen werden.

DDD kommt nur in BDF 7 mit einem Gehalt von 1,2 µg/kg in der organischen Auflage vor.

DDE (Abb. 56) konnte im oberen Mineralboden bis 5 bzw. 10 cm Tiefe einiger Laubbaumstandorte nachgewiesen werden, sowie in der organischen Auflage von BDF 5. Im Nadelwald wird DDE in nur drei BDF, bevorzugt in der organischen Auflage, festgestellt.

DDT (Abb. 57) ist im Rahmen der 2. Kernflächenbeprobung 2022 vor allem in der organischen Auflage an vier Nadelbaumstandorten nachweisbar. Nur zwei Laubbaumstandorte zeigen DDT im mineralischen Oberboden.

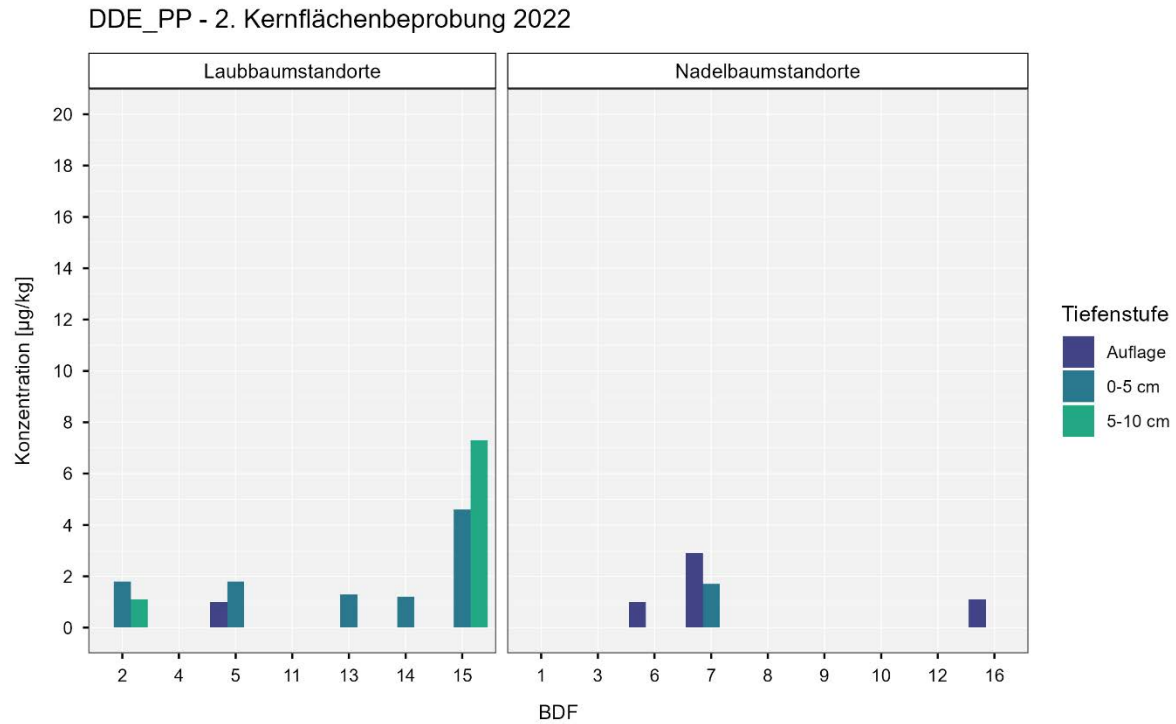


Abb. 56: p,p'-DDE-Gehalte in µg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

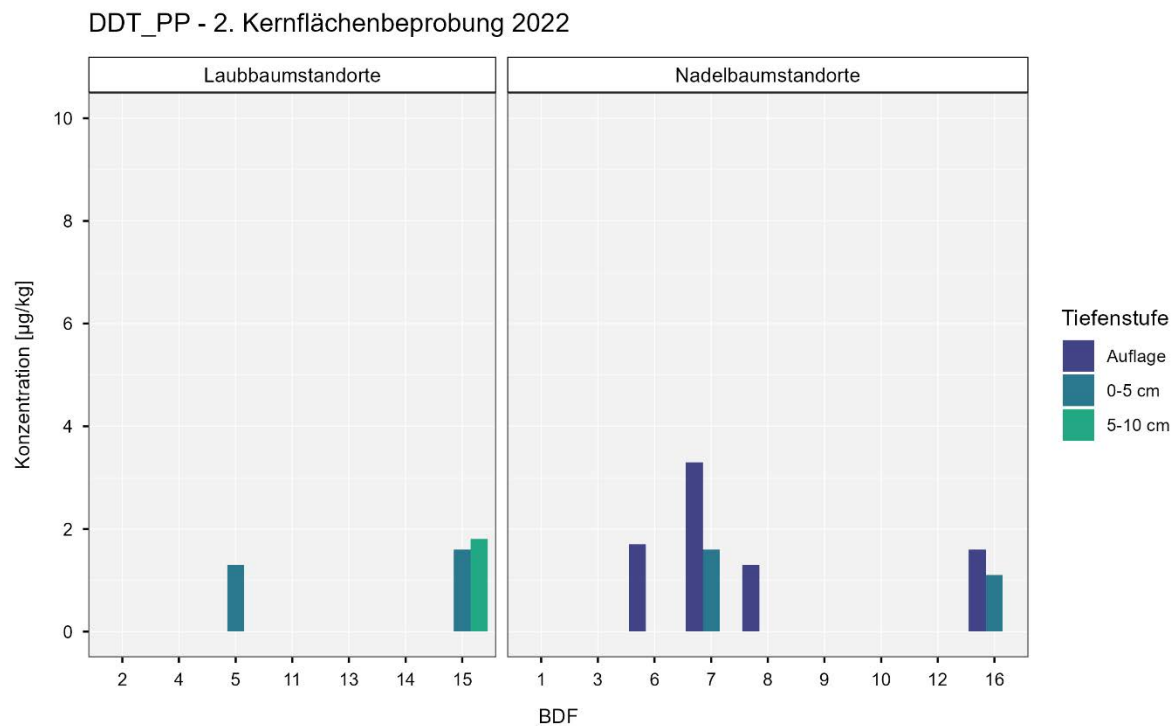


Abb. 57: p,p'-DDT-Gehalte in µg/kg nach Tiefenstufen bis 10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

Im Rahmen der 1. Kernflächenbeprobung 2010 lagen die Bestimmungsgrenzen für OCP um den Faktor 20 und mehr höher als im Jahr 2022 (Kap. 2.3., Tab. 2.4). Somit konnten aufgrund ihrer geringen Gehalte im Jahr 2010 keine OCP nachgewiesen werden.

3.8.7 Pentachlorphenol

Pentachlorphenol (PCP) ist ein langlebiger organischer Schadstoff, der zu starker Bindung mit organischer Substanz neigt. Der Stoff ist seit 1989 in Deutschland und seit 2004 verbindlich weltweit verboten.

Der PCP-Gehalt liegt bei allen BDF im Rahmen beider Kernflächenbeprobungen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Literatur

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, KA5, 5. Aufl., Schweizerbart, Hannover.

BAFU (2007): Gefährdung von Grundwasser durch Schießanlagen: Blei und Antimon, Bericht Nr. 00174.3, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUKN) (Hrsg.) (2022): Leitfaden zur PFAS-Bewertung: Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials.

DEHNER, U., JUNG M., STEINRÜCKEN, U., WIESNER, T. (2012): Statusbeprobung von Bodendauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) (Hrsg.), Mainz.

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF) (Hrsg.) (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II, Trippstadt.

Gutachterausschuss Forstliche Analytik (Hrsg.) (2005): Handbuch Forstliche Analytik, Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BLEH), Bonn.

HELLER C., DRUSBA A., LÜGGER K. (2025): Monitoring von PFAS in der Boden-Dauerbeobachtung: Ergebnisse aus Hessen und Rheinland-Pfalz, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) und Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB), Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft e. V., Poster, Tübingen.

HOHMANN, U., HUCKSCHLAG, D., ZISS, H. & HENTZSCHEL, R. (2005): Investigations of the medium scaled spatial distribution of radiocaesium contamination of wild boar (*Sus scrofa*) in Rhineland-Palatinate, Germany. In: POHLMAYER K. (Editor), Extended Abstracts of the XXVIIth Congress of the International Union of Game Biologists, Hannover, DSV-Verlag Hamburg, 108-110.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (Hrsg.) (2024): Arbeitshilfe zu Sickerwasserprognose, Ständiger Ausschuss Altlasten (ALA), Potsdam.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) (Hrsg.) (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz, Mainz.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) (Hrsg.) (2022): Hintergrundwerte der Böden von Rheinland-Pfalz, Mainz.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) (Hrsg.) (2025): Waldzustandsbericht 2025, Mainz.

Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) (Hrsg.), heute Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) (2018): Bodenzustandsbericht Rheinland-Pfalz, Birkenfeld, Mainz.

VAN DEN BERG, M., BIRNBAUM, S. L., DENISON, M., DE VITO, M., FARLAND, W., FEELEY, M., FIEDLER, H., HAKANSSON, H., HANBERG, A., HAWS, L., ROSE, M., SAFE, S., SCHRENK, D., TOHYAMA, C., TRITSCHER, A., TUOMISTO, J., TYSKLIND, M., WALKER, N., RICHARD E. PETERSON, E.R. (2006): The 2005 World Health Organization reevaluation of human and Mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds, *Toxological Science*, Vol. 93 (2), 223-241.

ZIBOLD, G., KONOPLEVA, I., KLEMT, E., KONOPLEV, A., (2007): Migration und Bioverfügbarkeit von Radiocäsium in Böden Süddeutschlands. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Hochschule Ravensburg-Weingarten.

ZOTH, R. & BLOCK, J. (1993): Untersuchung des Standes und der Entwicklung der Bodenversauerung und des Nährstoffgehaltes in Waldgebieten anhand von Bodendauerbeobachtungsflächen. Schlussbericht zum EG-Forschungsvorhaben Nr. 90 60 DL.012.0. Bereich Feldversuche zur Verbesserung der Kenntnisse über die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Degradation von Waldböden, Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Trippstadt, unveröffentlicht.

Anhang

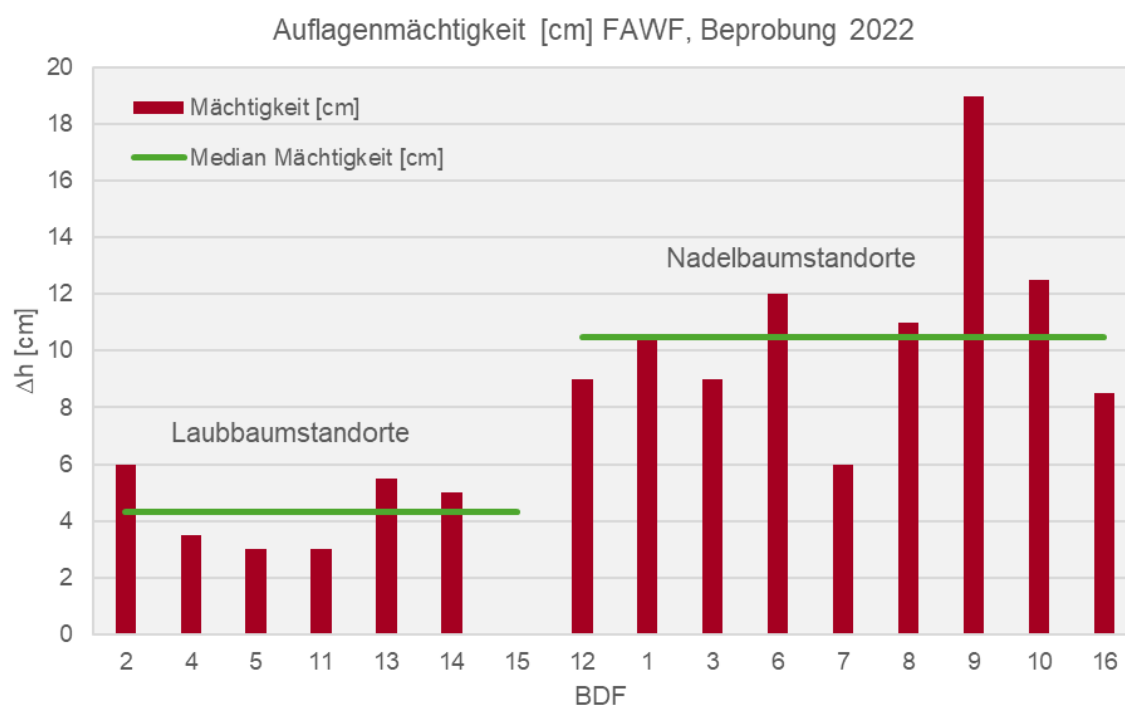


Abb. A1: Vergleich der Auflagenmächtigkeiten von Laub- und Nadelbaumstandorten

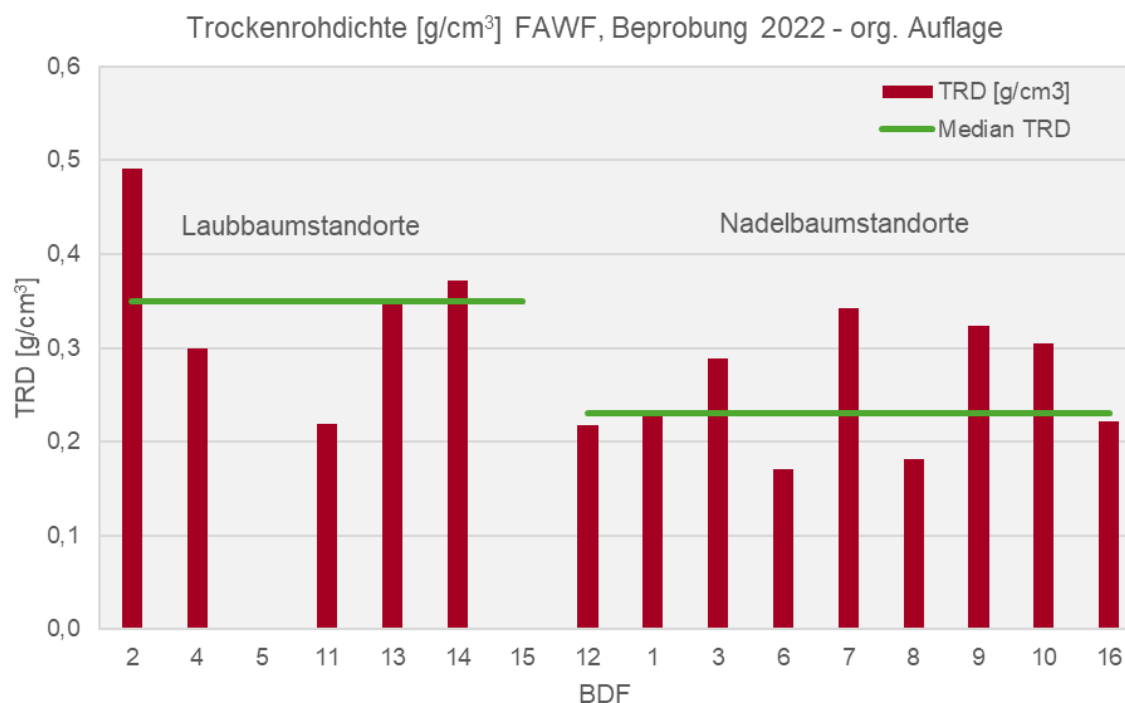


Abb. A2: Vergleich der Trockenrohdichte von Laub- und Nadelbaumstandorten

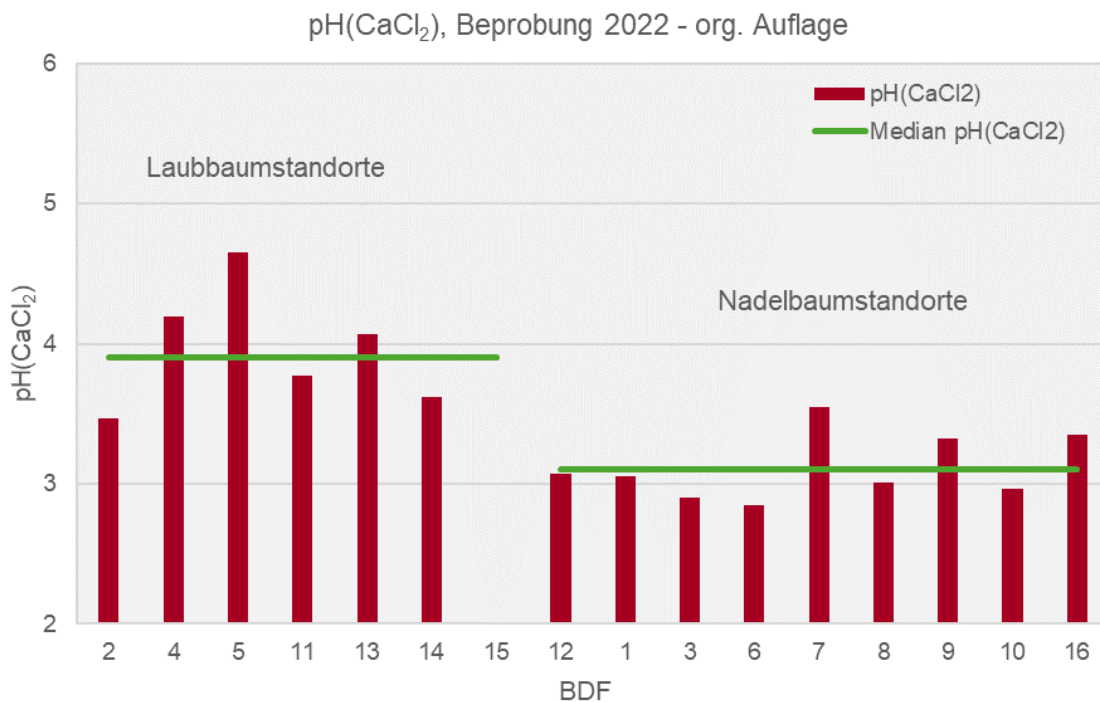


Abb. A3: Vergleich des pH-Werts (CaCl₂) von Laub- und Nadelbaumstandorten

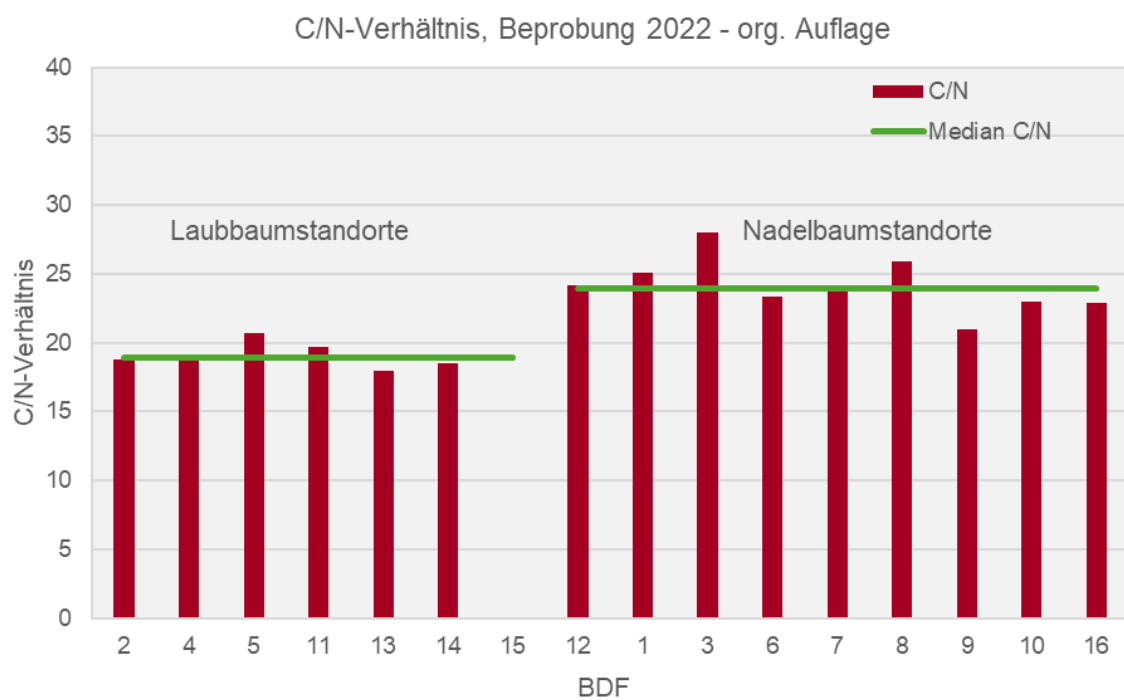


Abb. A4: Vergleich des C/N-Verhältnisses von Laub- und Nadelbaumstandorten

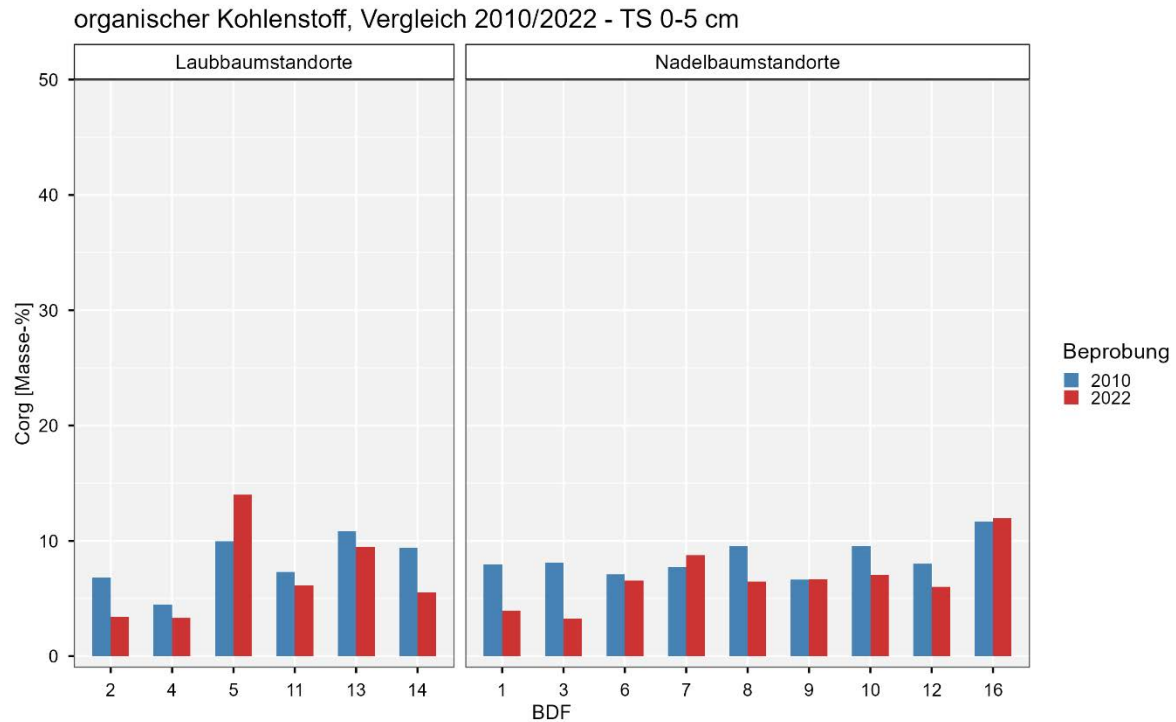


Abb. A5: Vergleich der Kohlenstoffgehalte in Masse-% in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

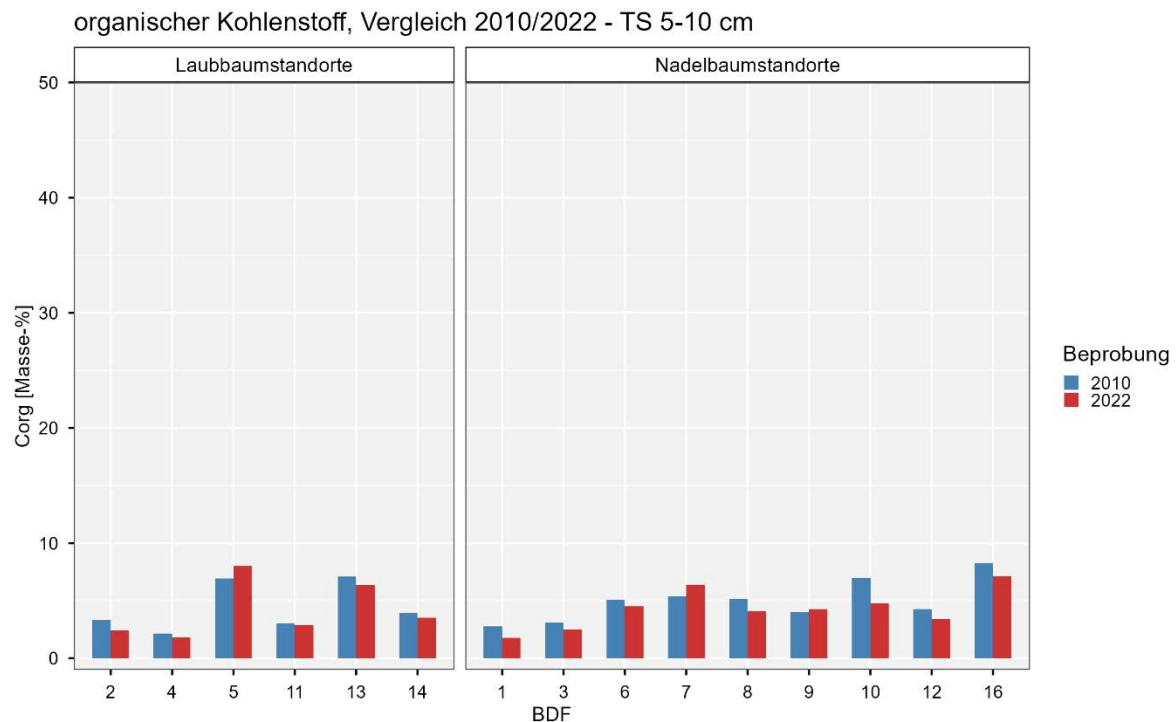


Abb. A6: Vergleich der Massenanteile C_{org} in Masse-% in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022, gruppiert nach Baumbestand

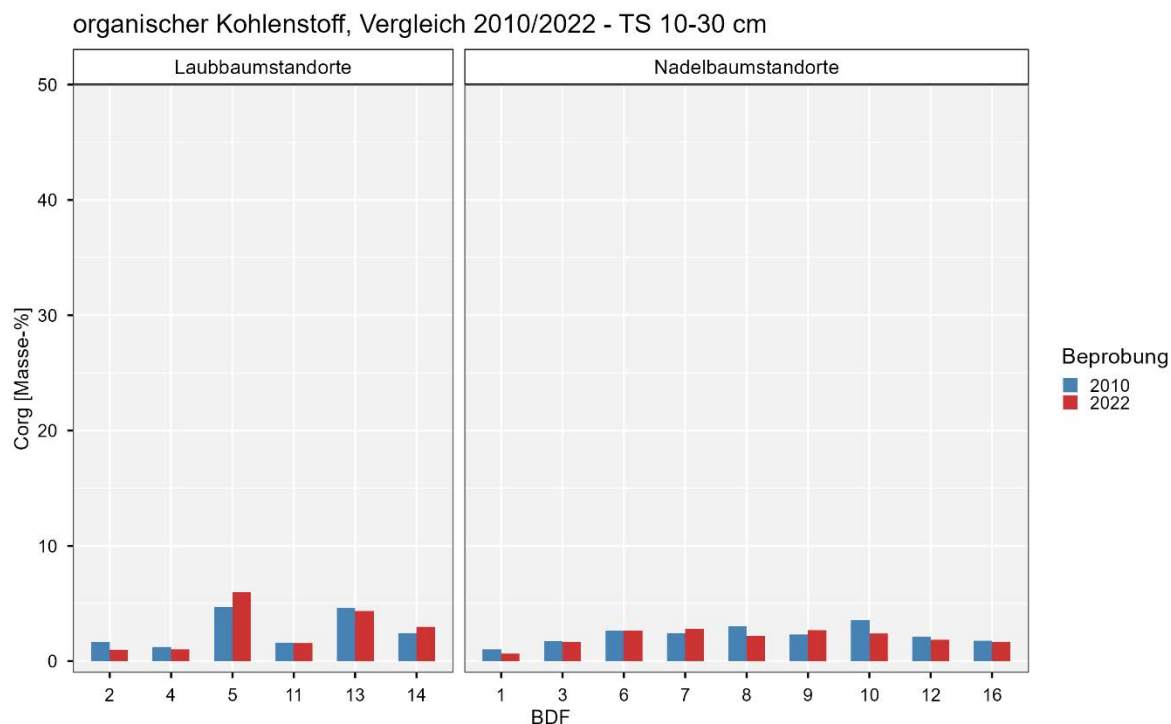


Abb. A7: Vergleich der Kohlenstoffgehalte in Masse-% in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

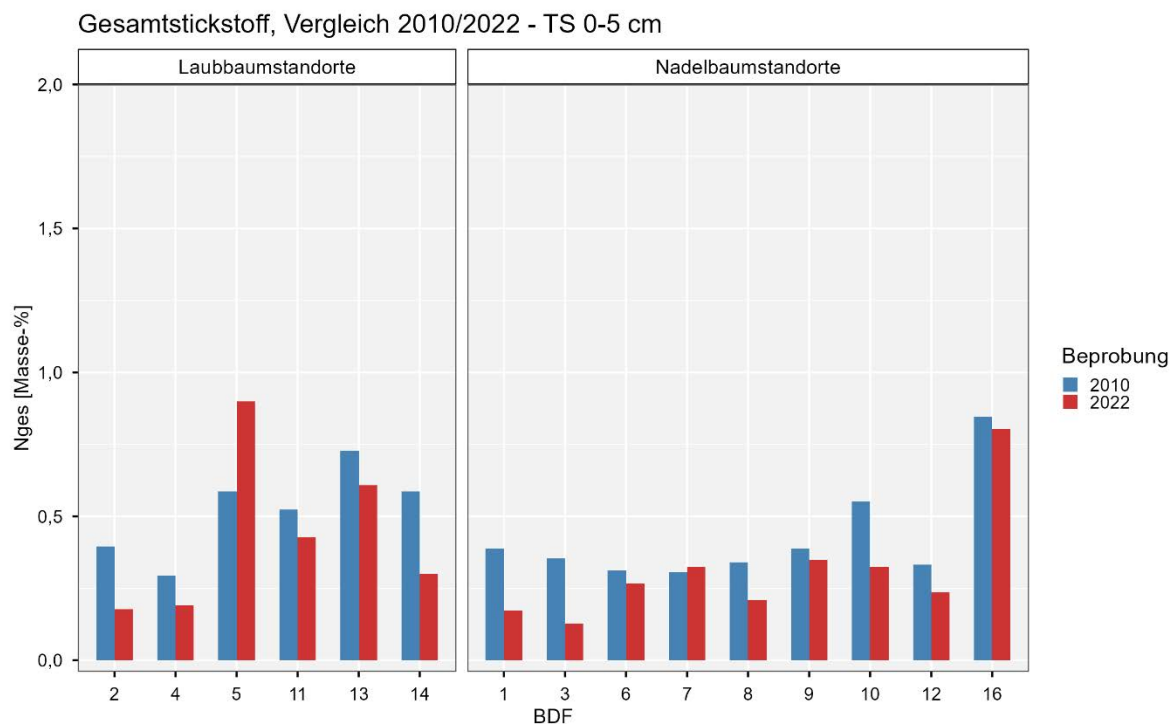


Abb. A8: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

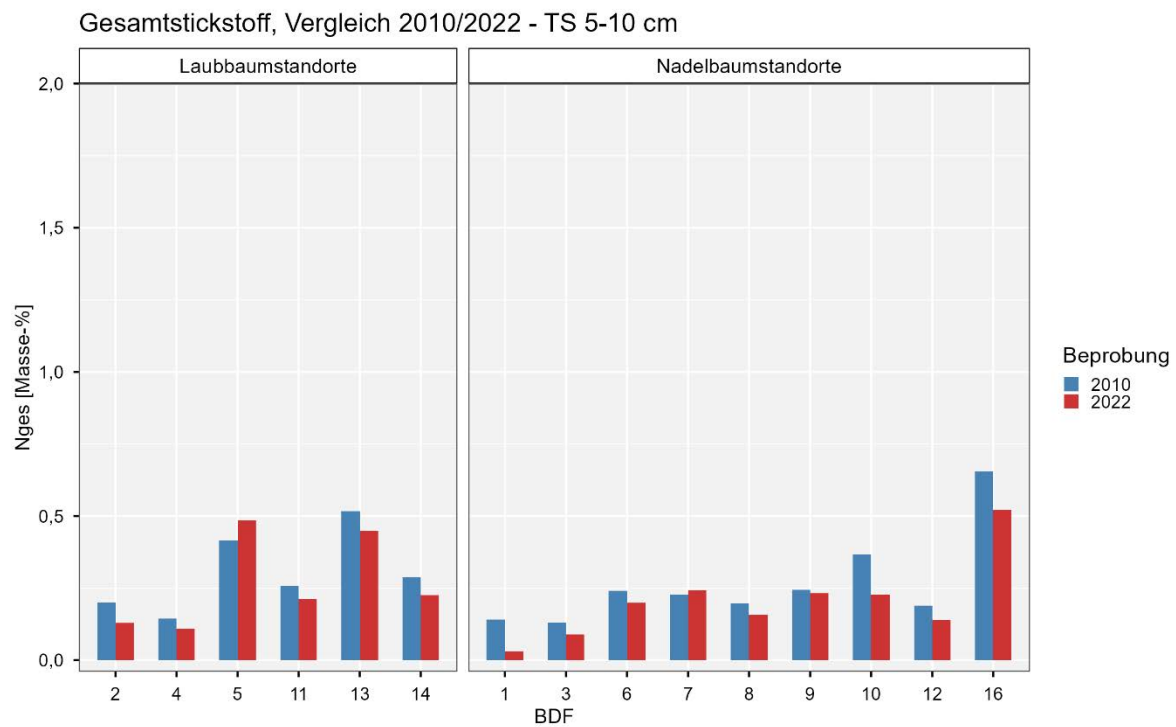


Abb. A9: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

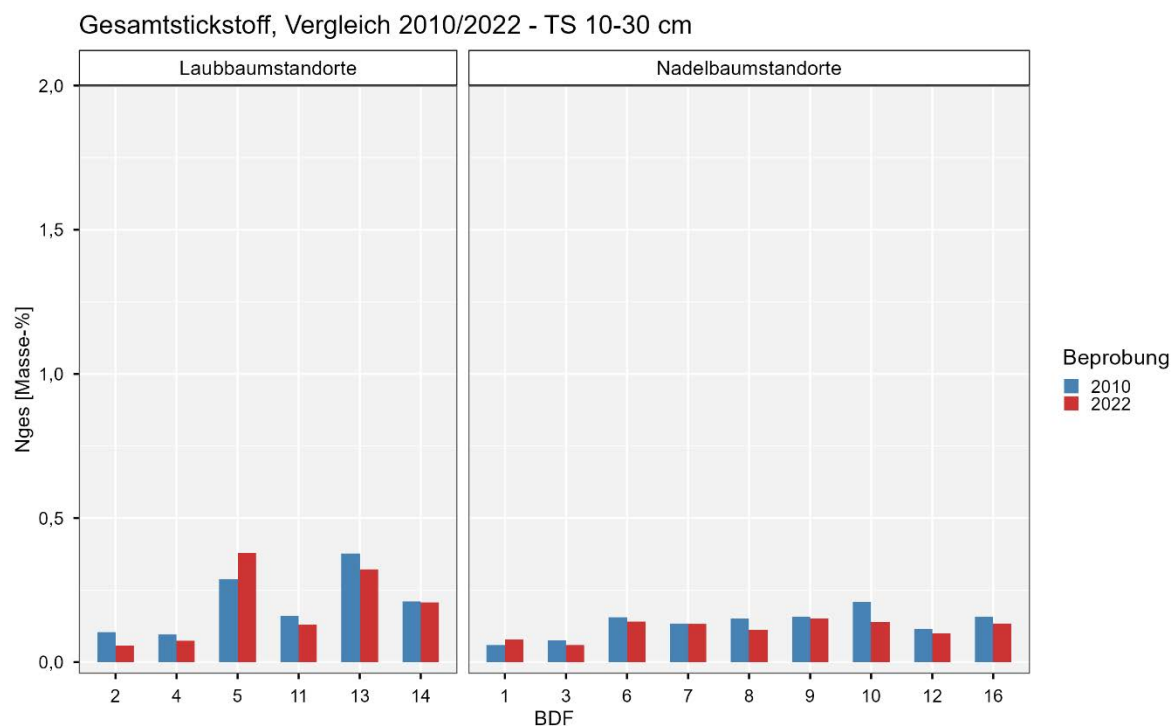


Abb. A10: Vergleich der Massenanteile N_{ges} in Masse-% in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

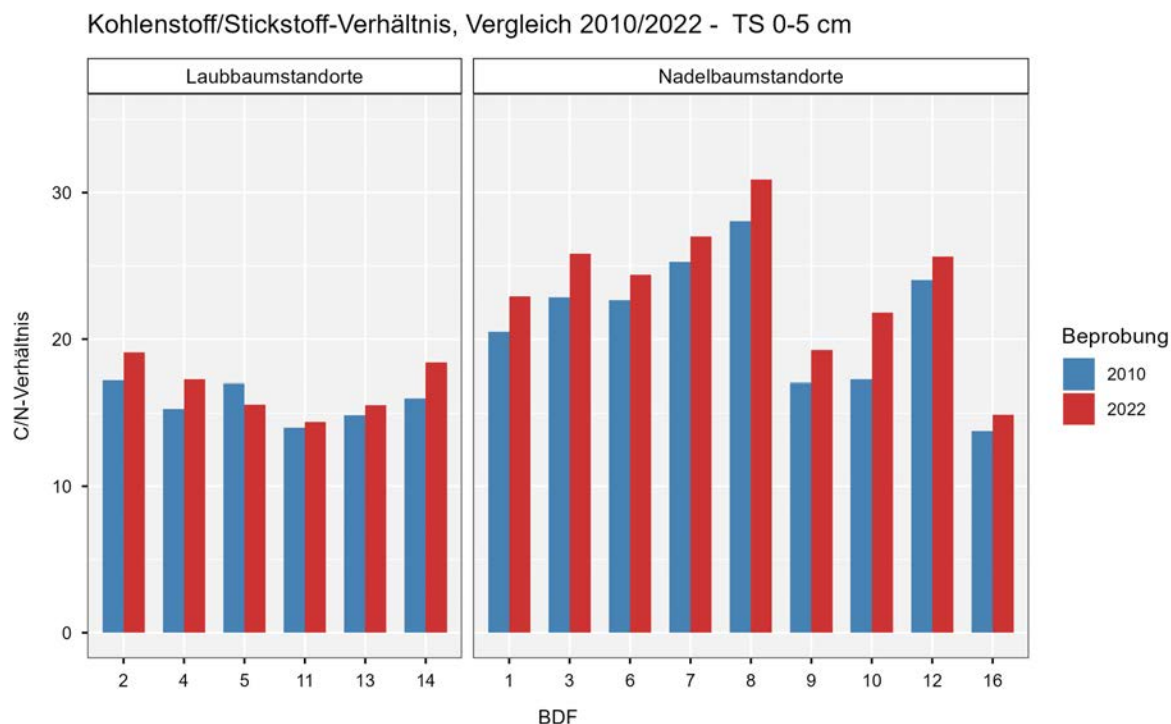


Abb. A11: Vergleich der C/N-Verhältnisse in der Tiefenstufe 0-5 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

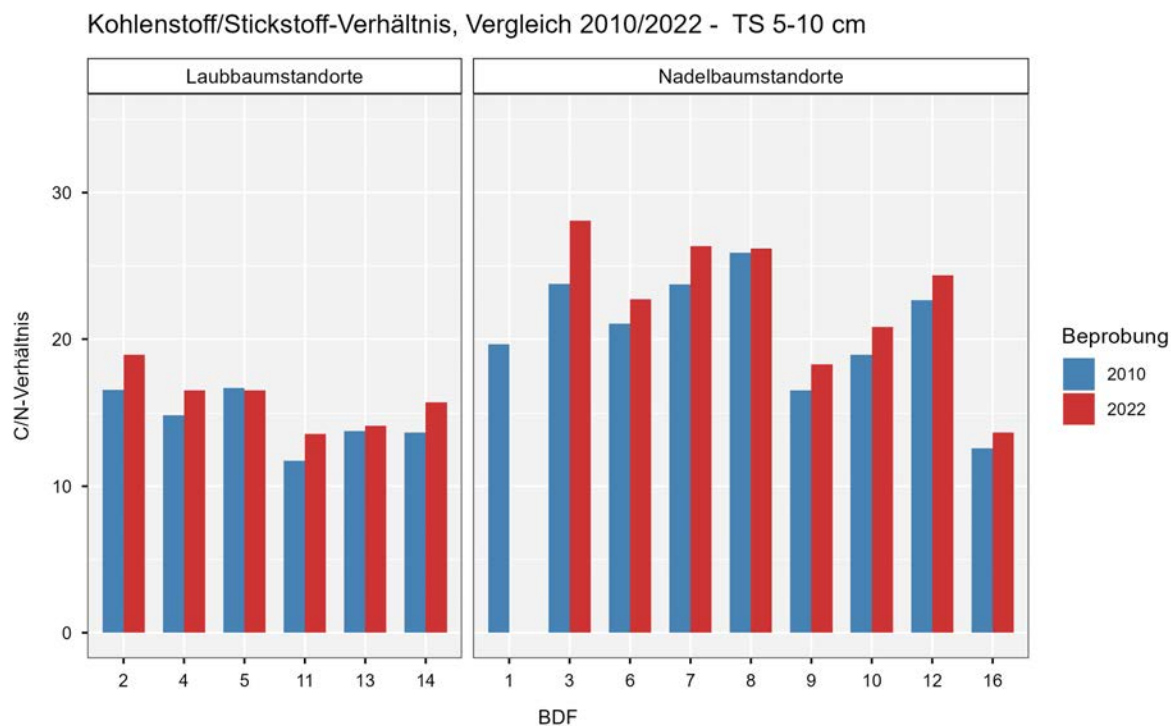


Abb. A12: Vergleich der C/N-Verhältnisse in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

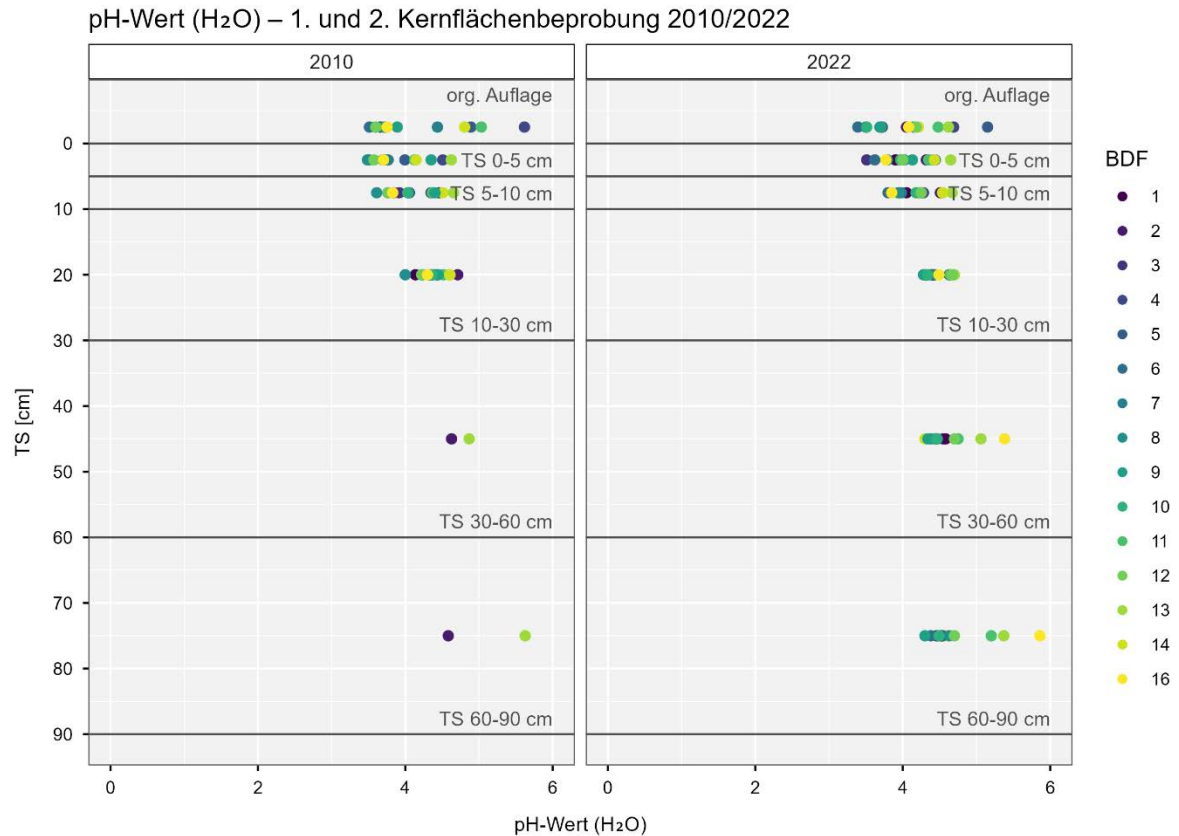


Abb. A13: Tiefenverteilung der pH-Werte (H₂O) aller BDF der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

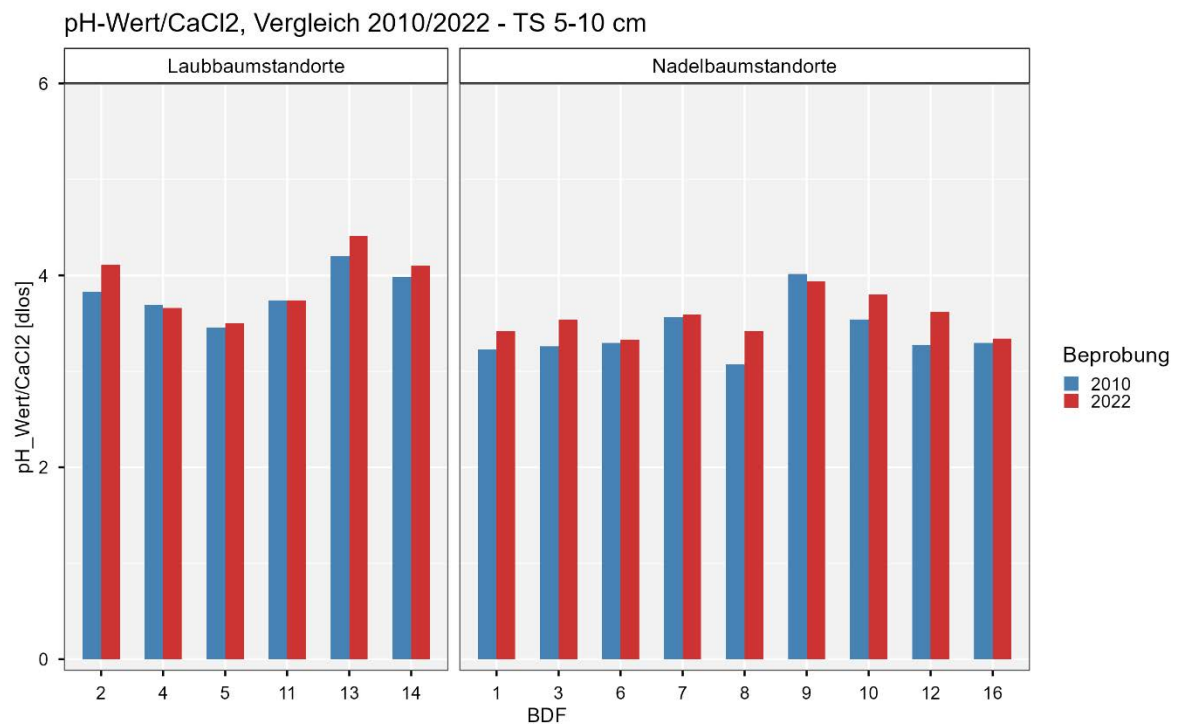


Abb. A14: Vergleich der pH-Werte (CaCl₂) in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

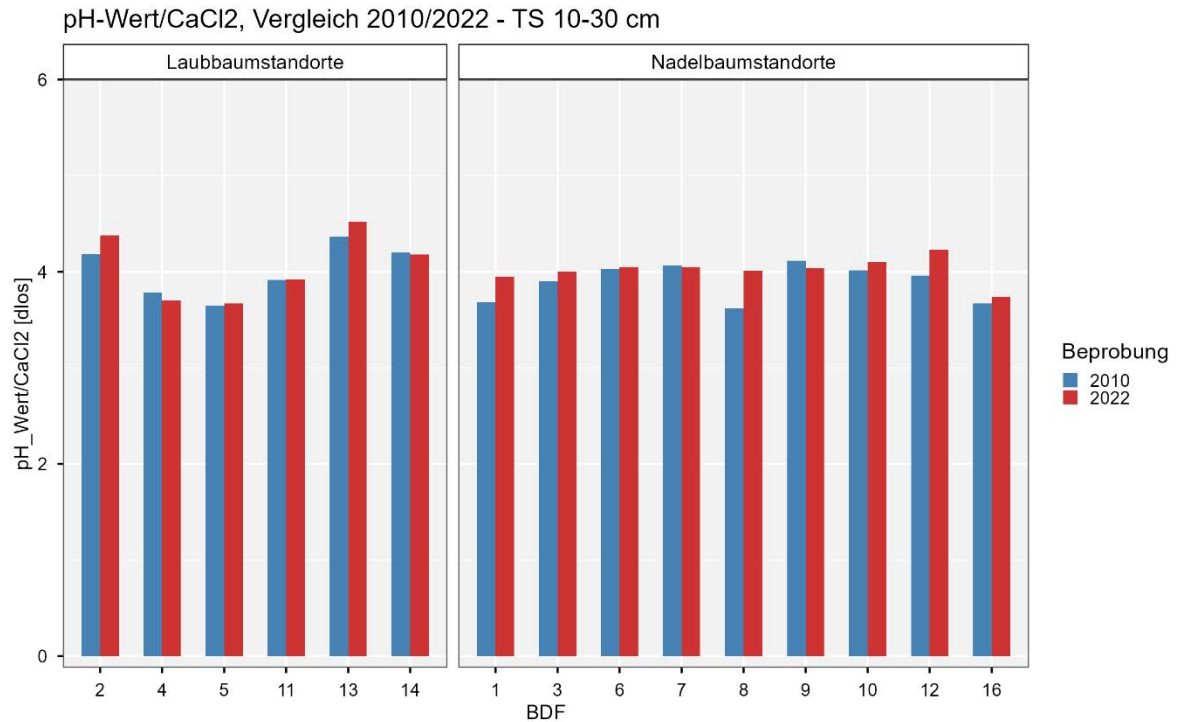


Abb. A15: Vergleich der pH-Werte (CaCl₂) in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1 und 2. Kernflächenbeprobung 2010/2022

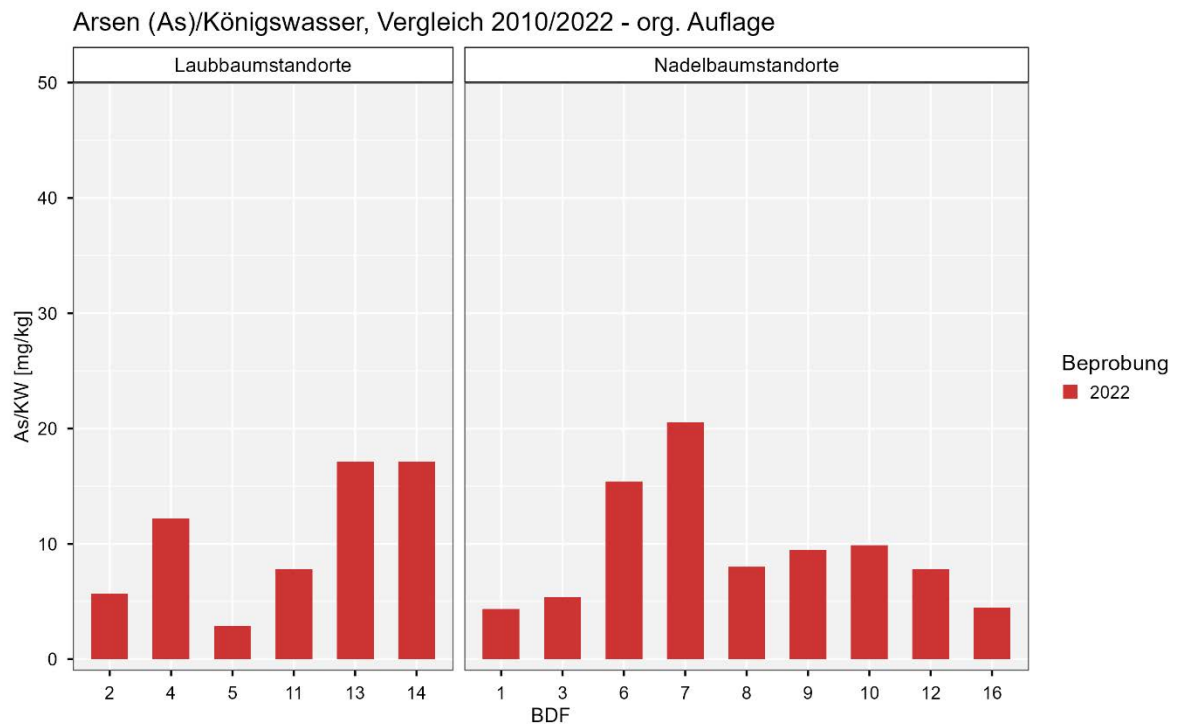


Abb. A16: Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022

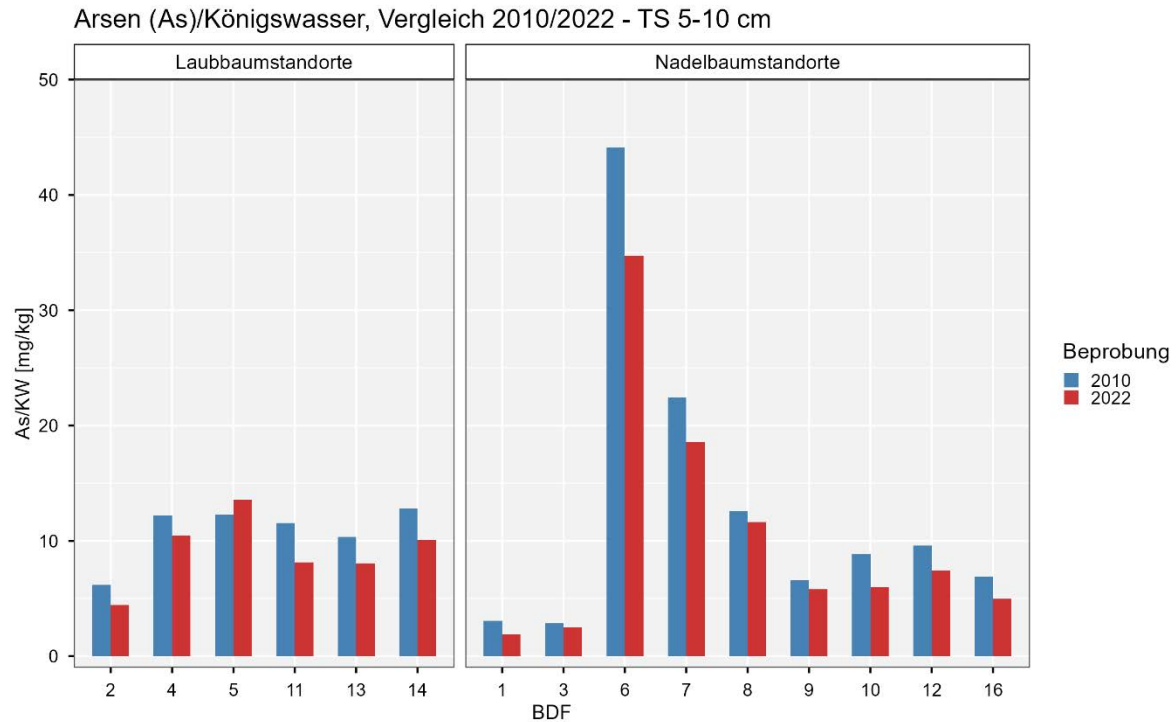


Abb. A17: Vergleich der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

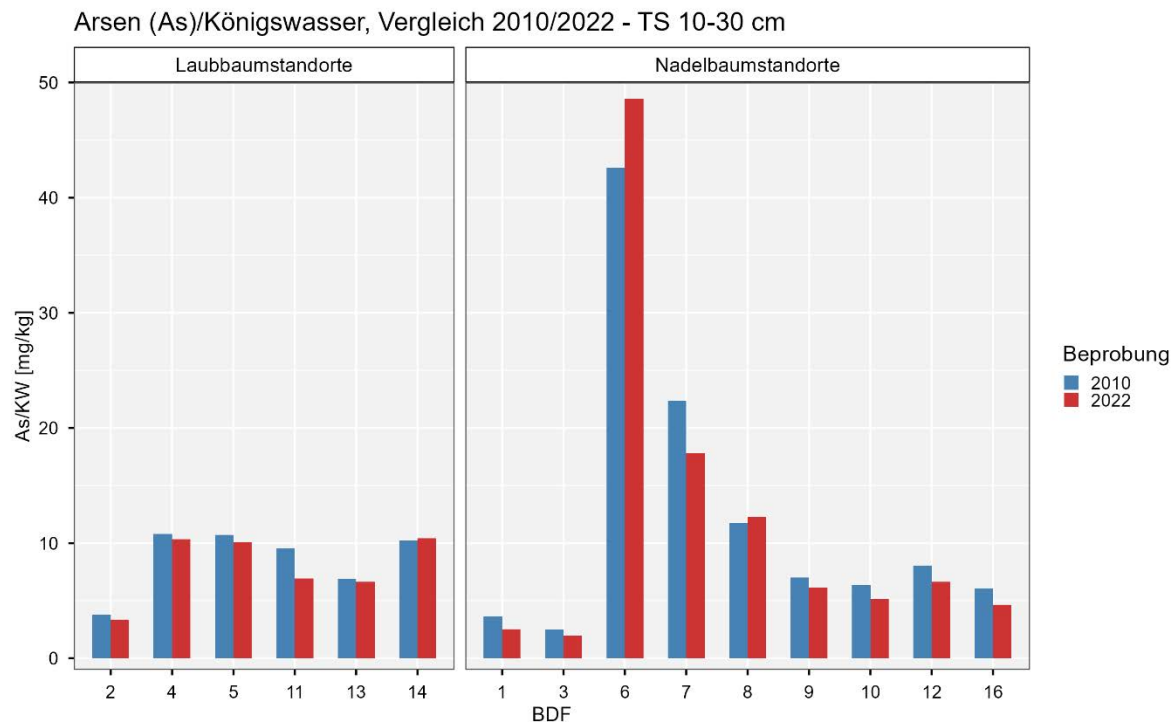


Abb. A18: Vergleich der Arsengehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

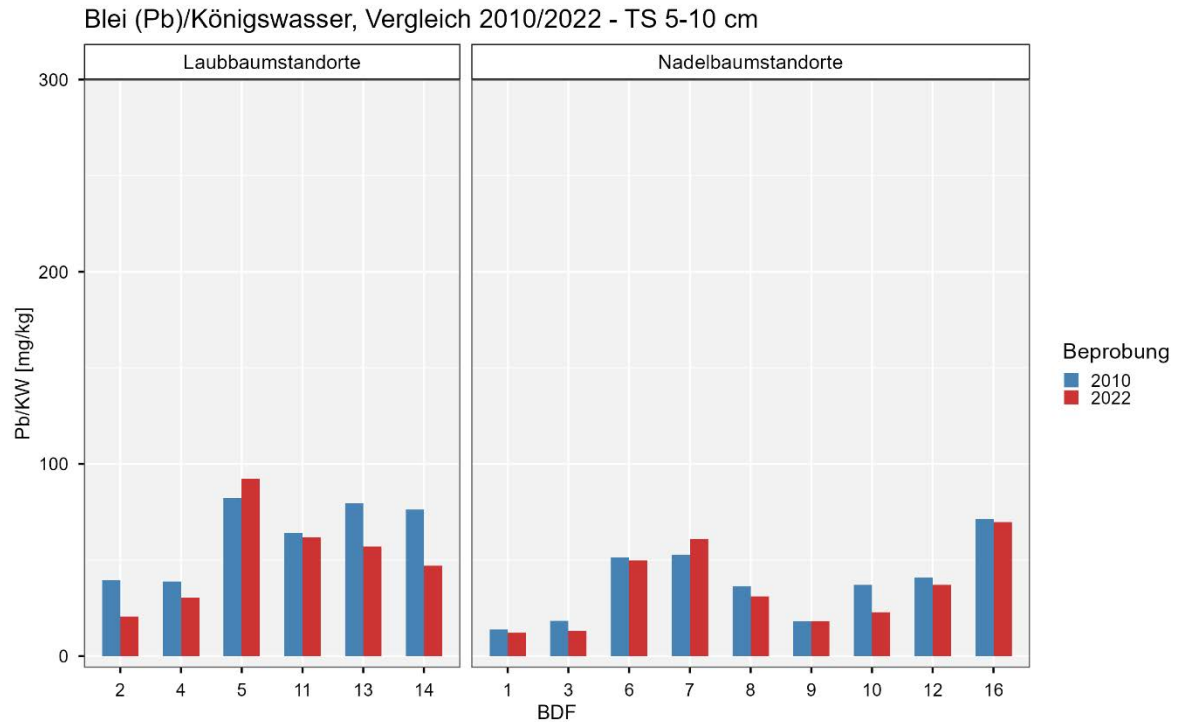


Abb. A19: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

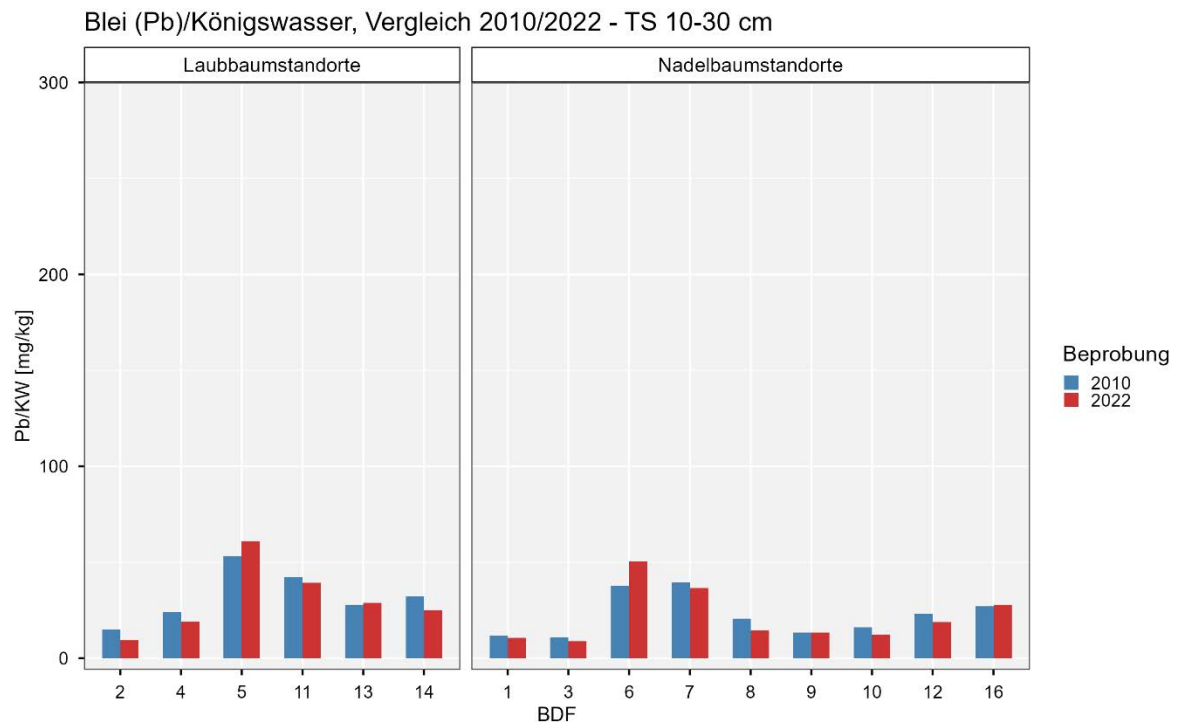


Abb. A20: Vergleich der Bleigehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

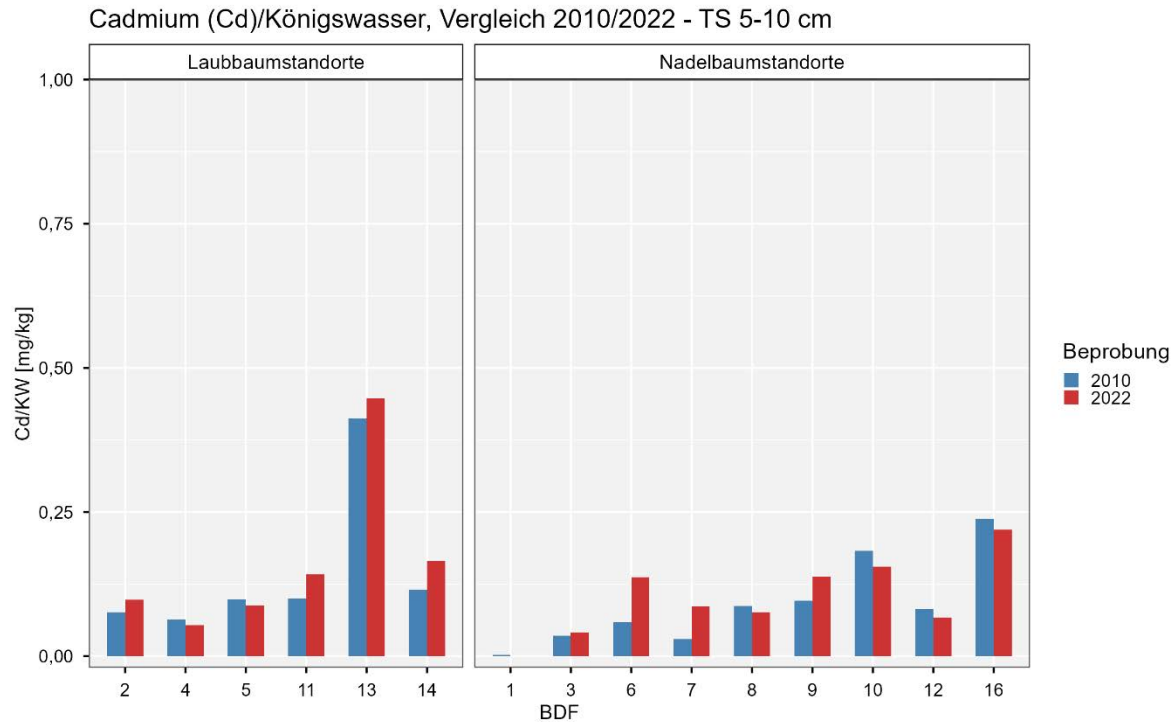


Abb. A21: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

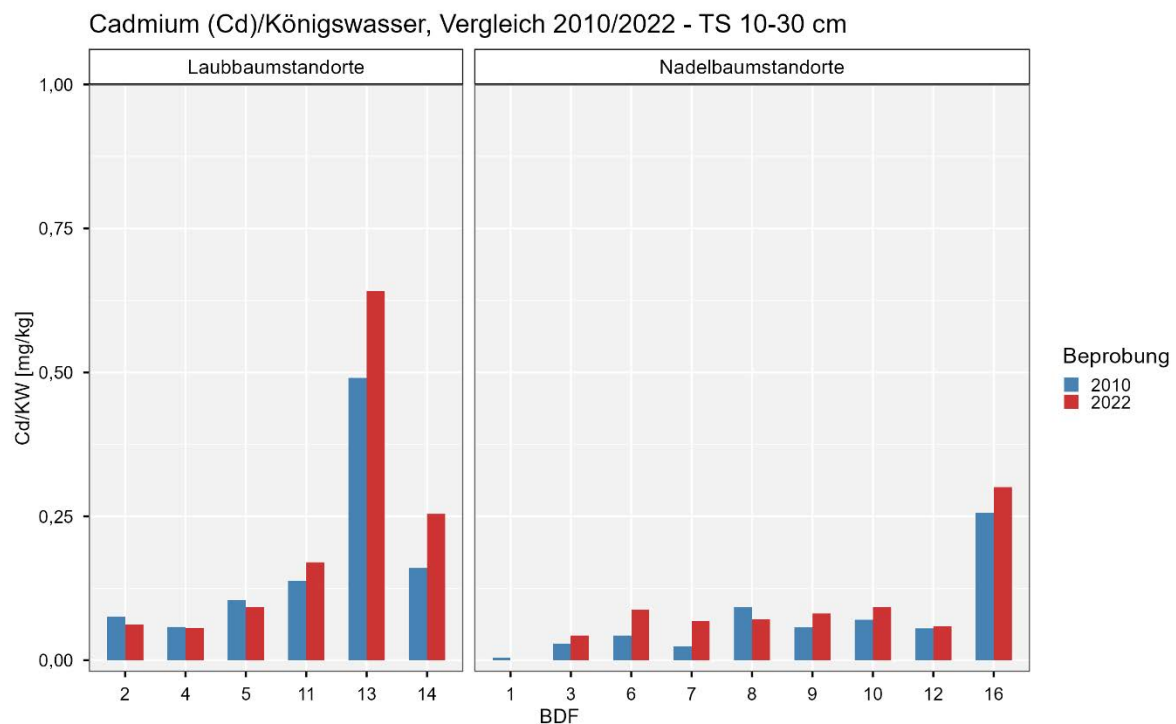


Abb. A22: Vergleich der Cadmiumgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

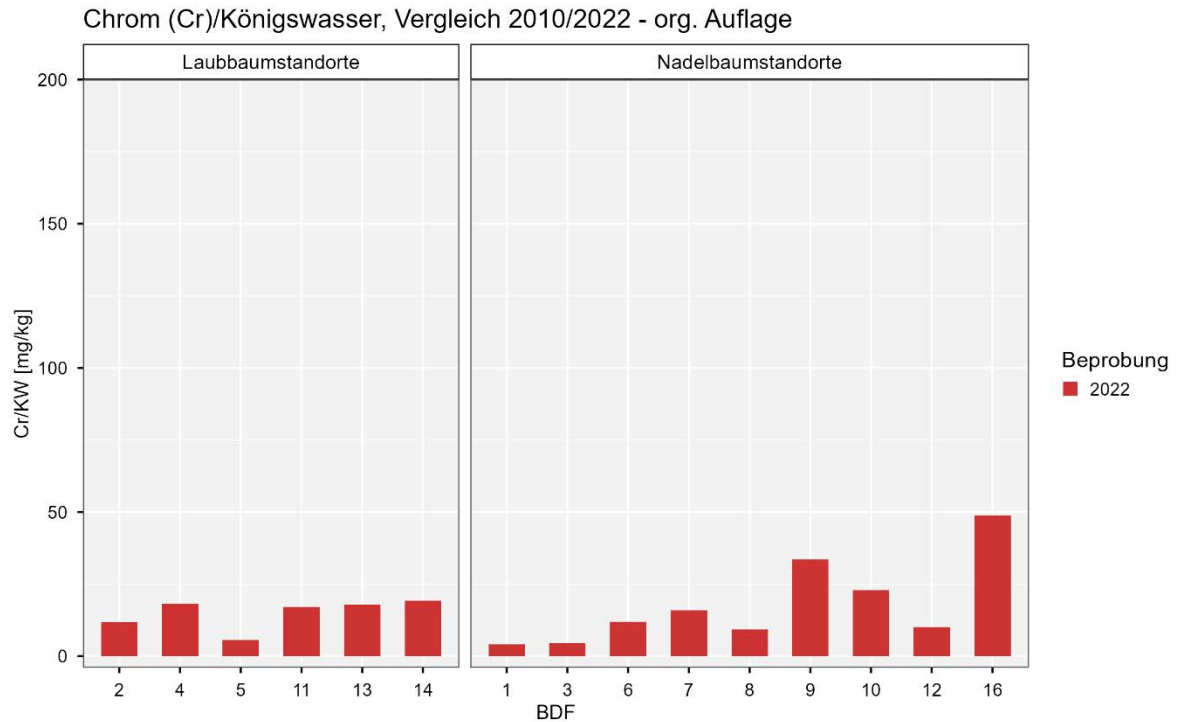


Abb. A23: Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022

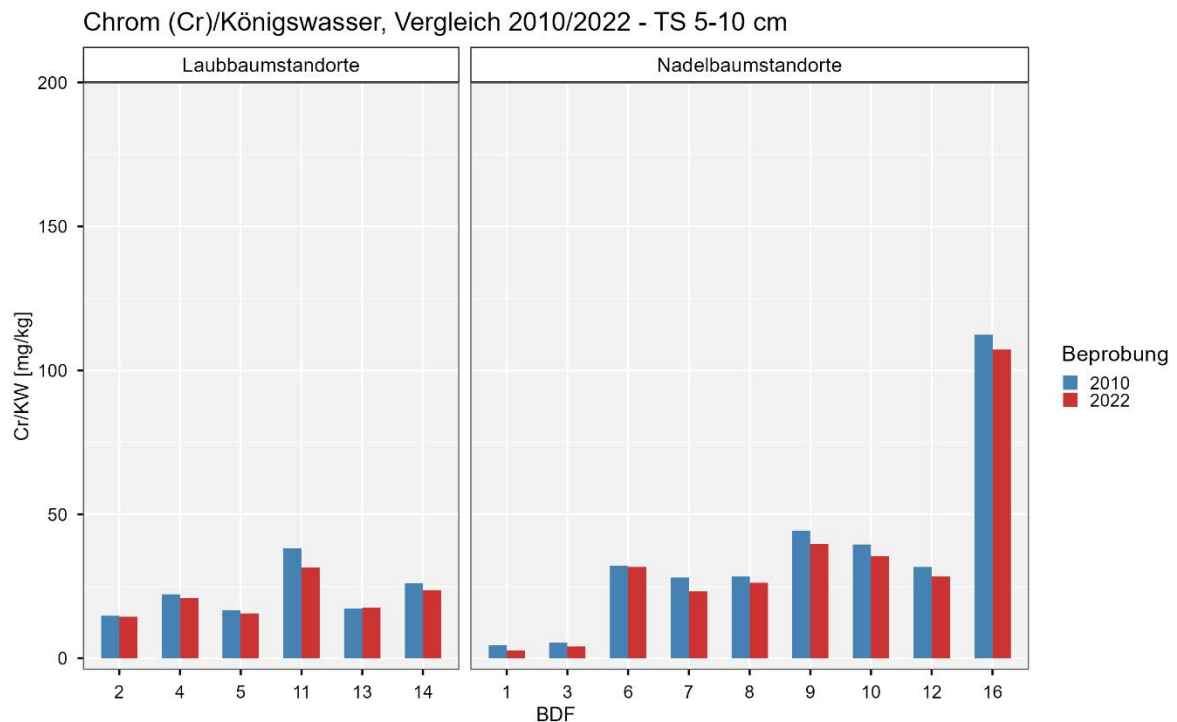


Abb. A24: Vergleich der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

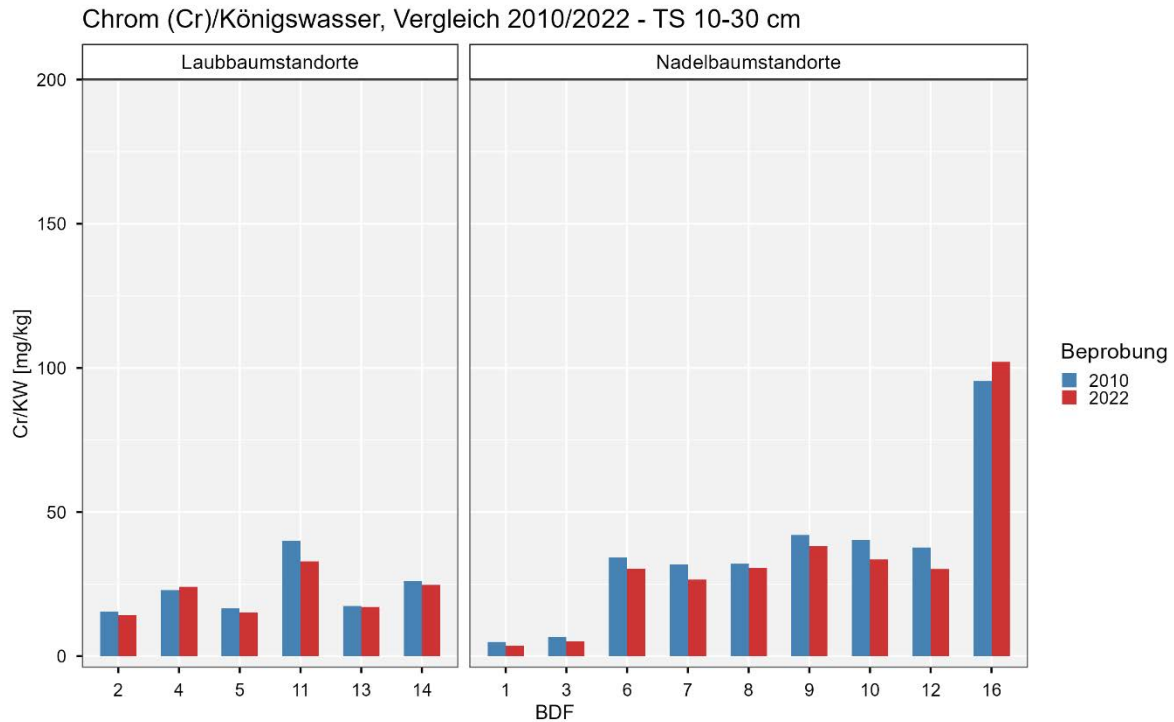


Abb. A25: Vergleich der Chromgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

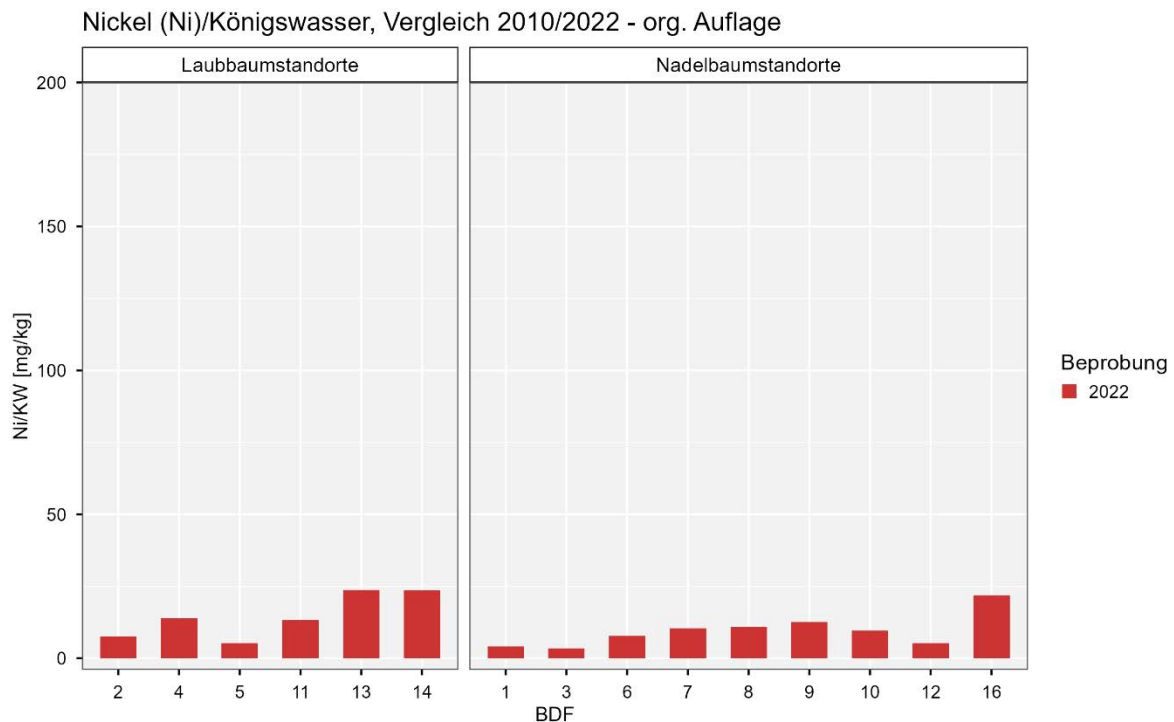


Abb. A26: Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022

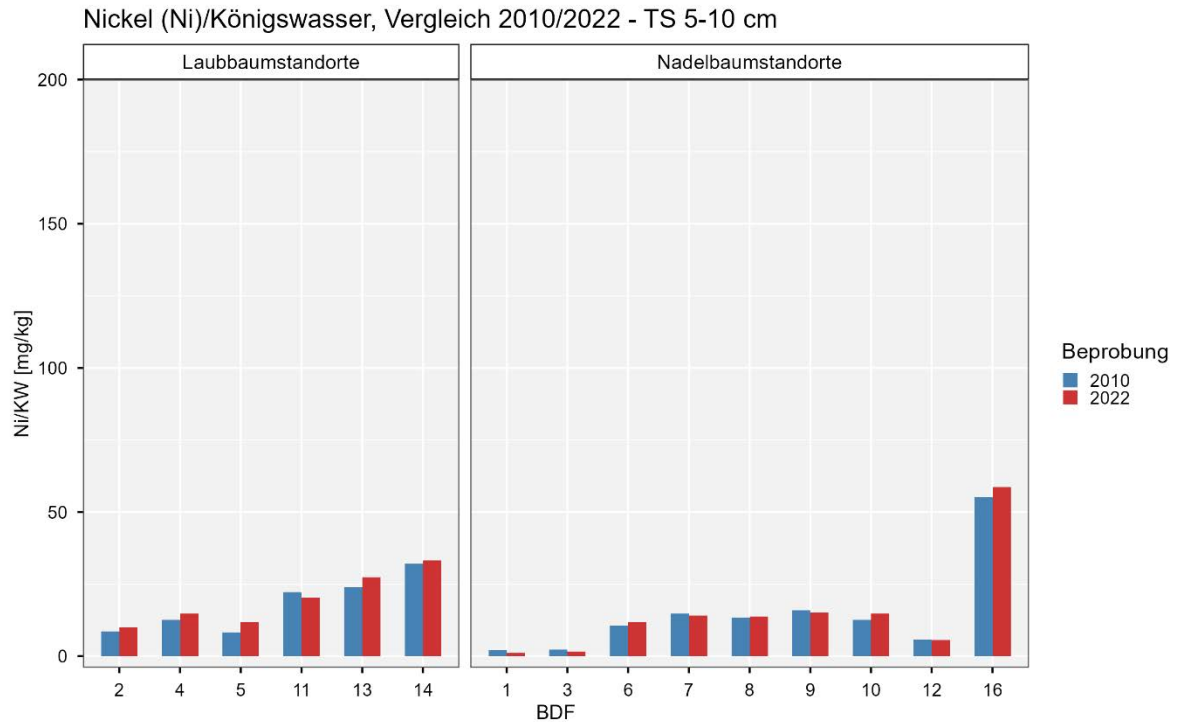


Abb. A27: Vergleich der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

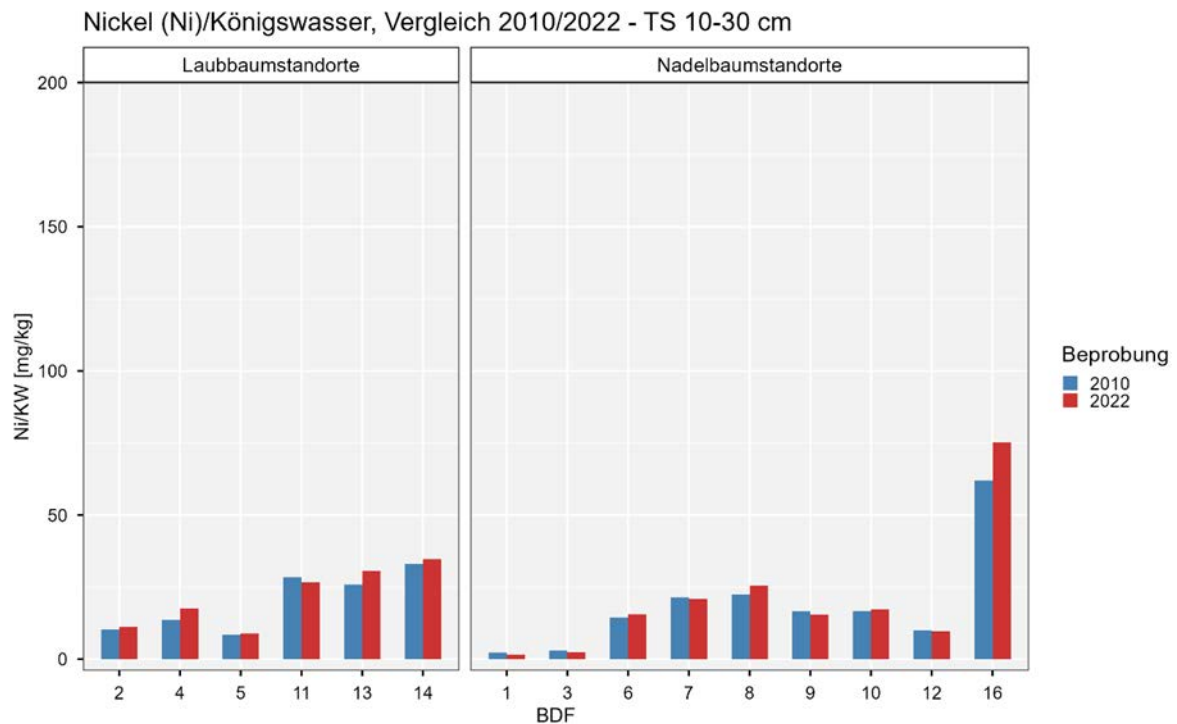


Abb. A28: Vergleich der Nickelgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

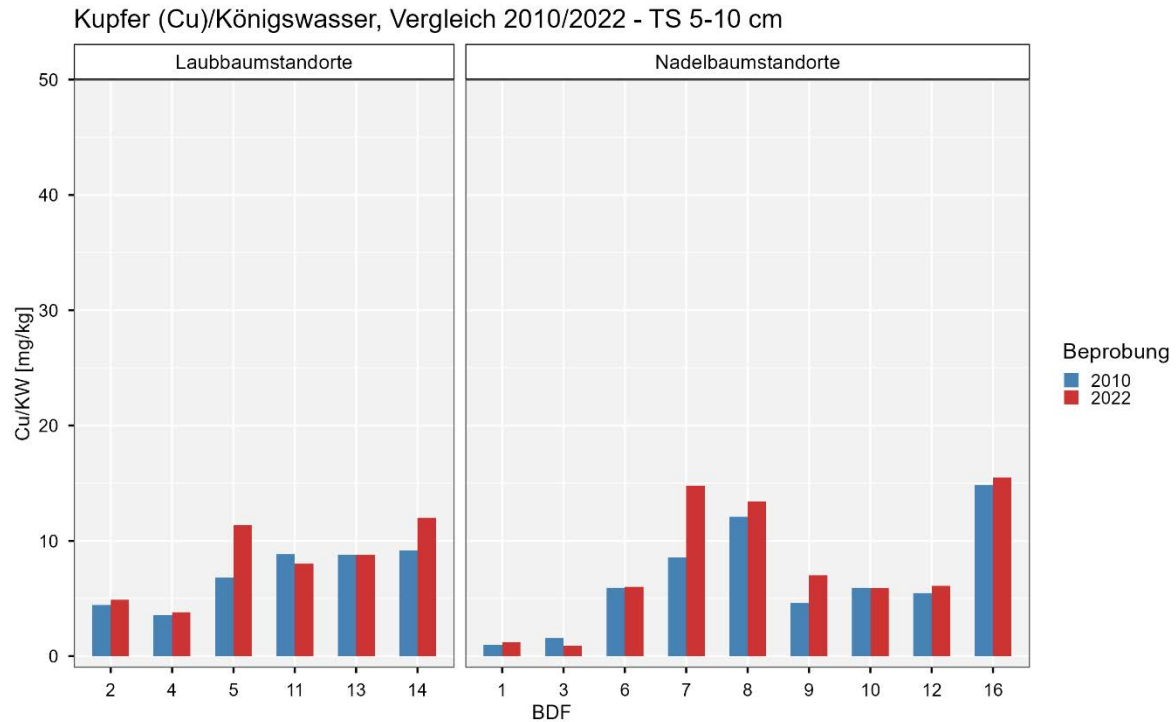


Abb. A29: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

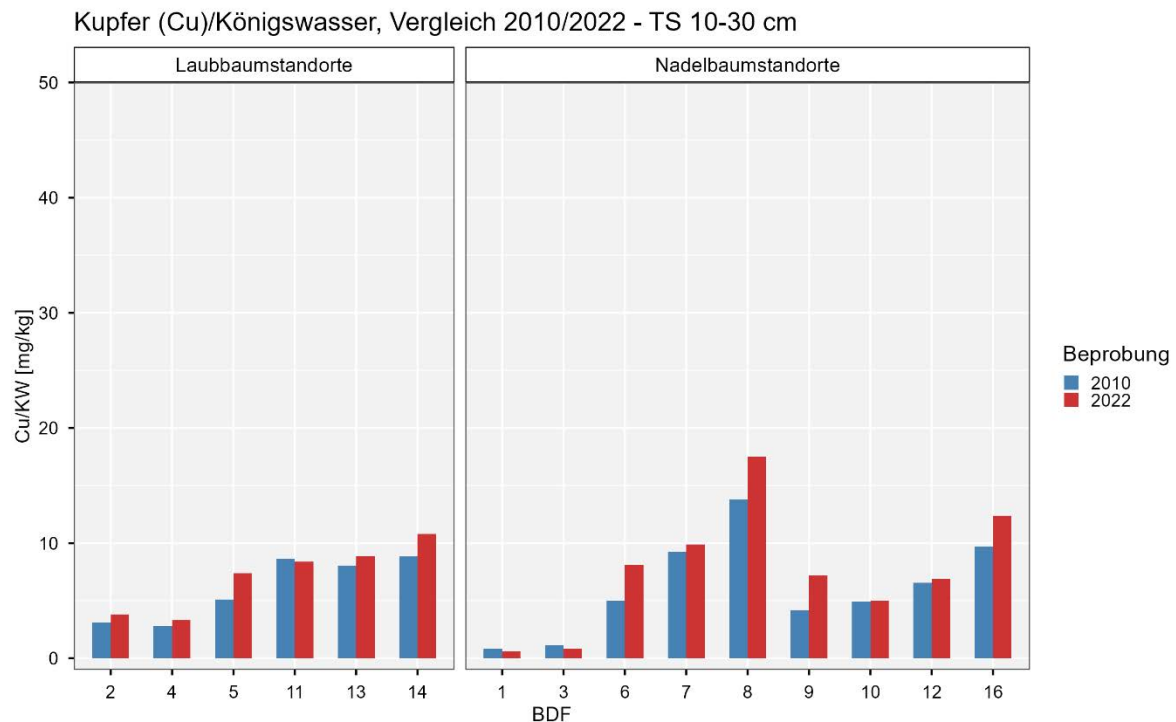


Abb. A30: Vergleich der Kupfergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

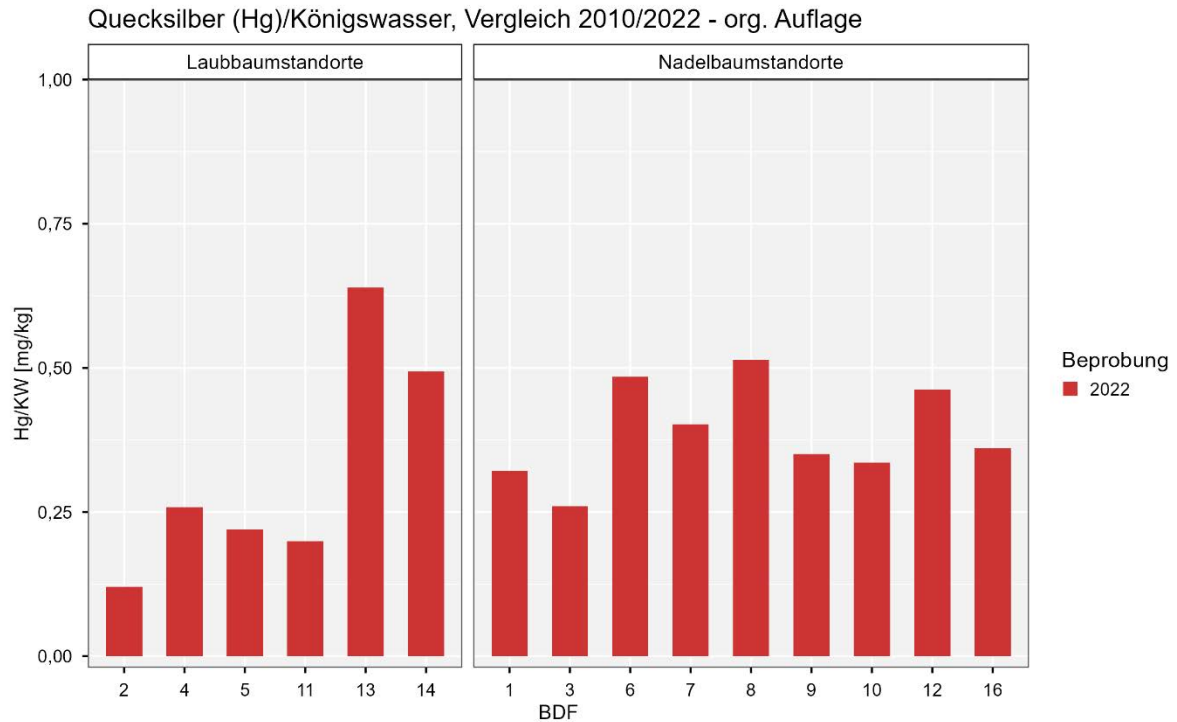


Abb. A31: Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der organischen Auflage der 2. Kernflächenbeprobung 2022

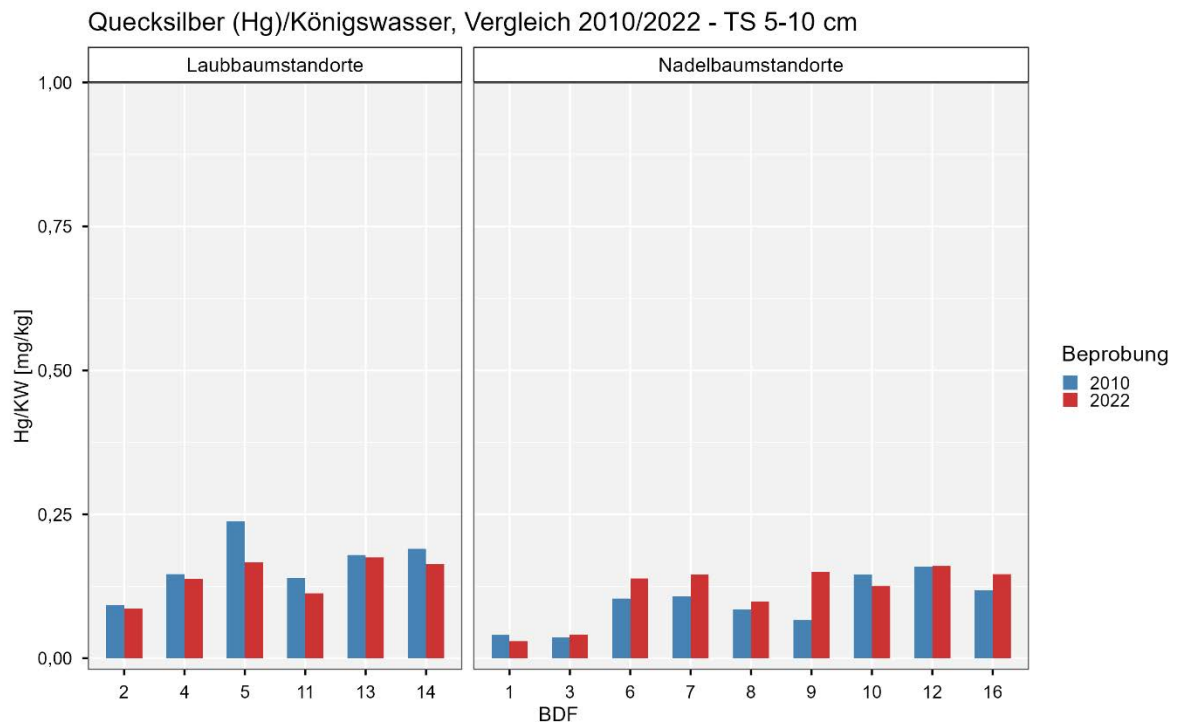


Abb. A32: Vergleich der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

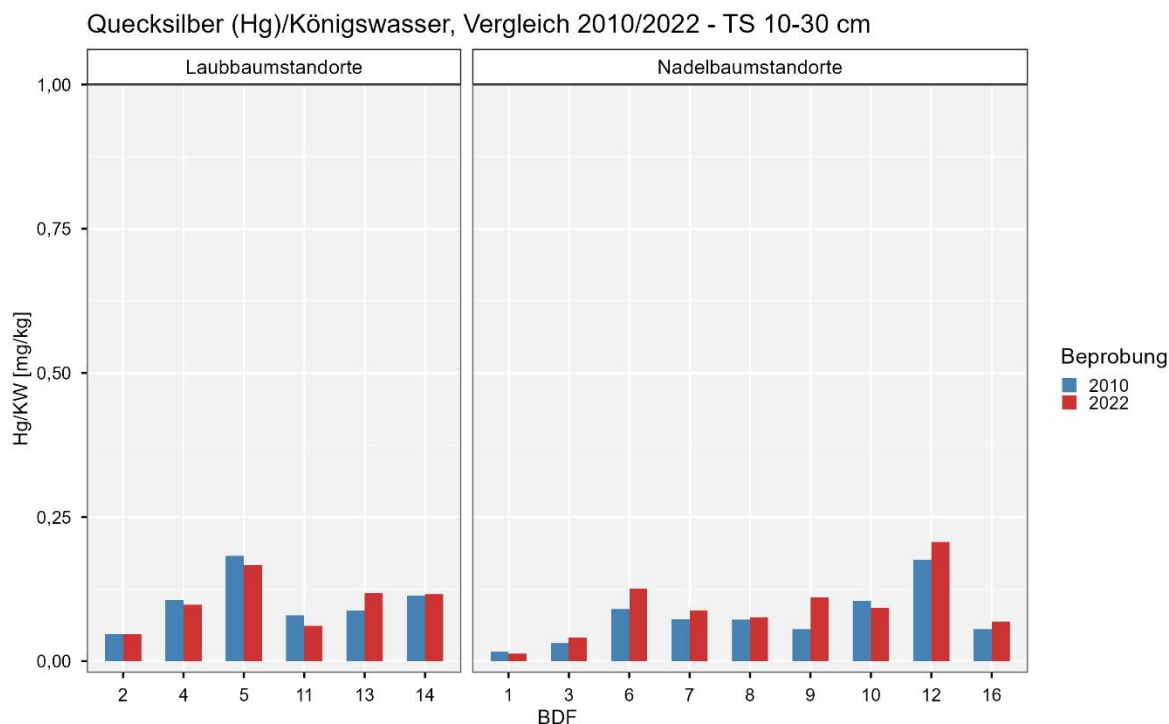


Abb. A33: Vergleich der Quecksilbergehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

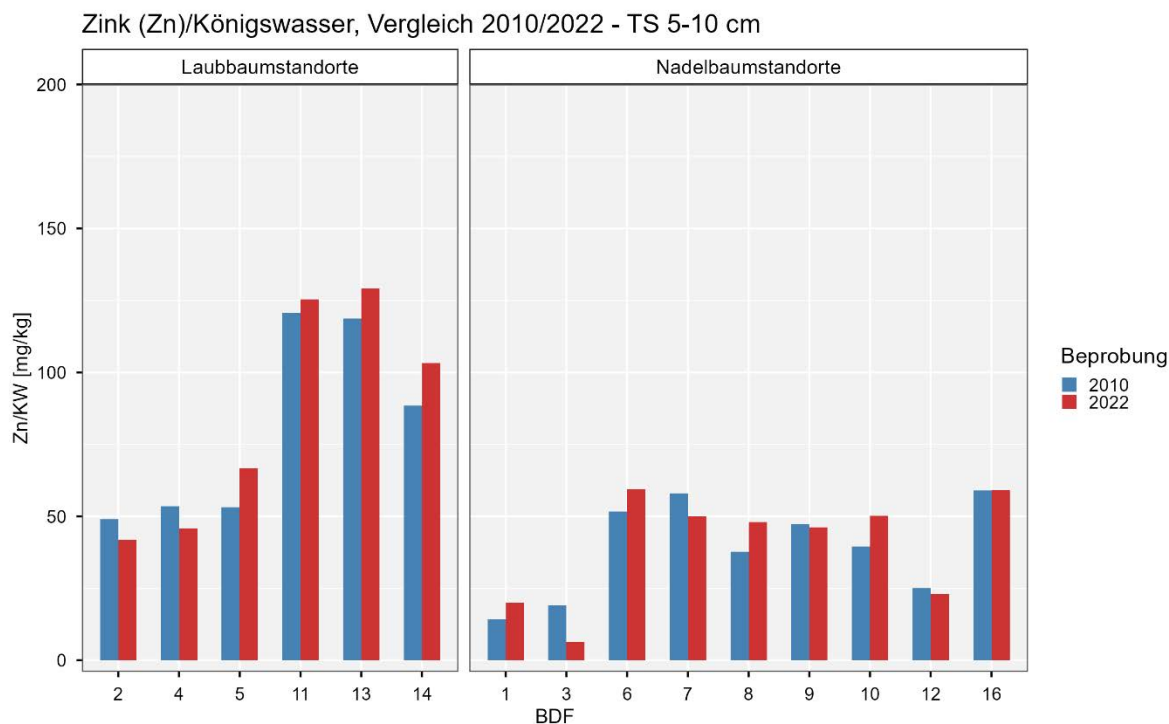


Abb. A34: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

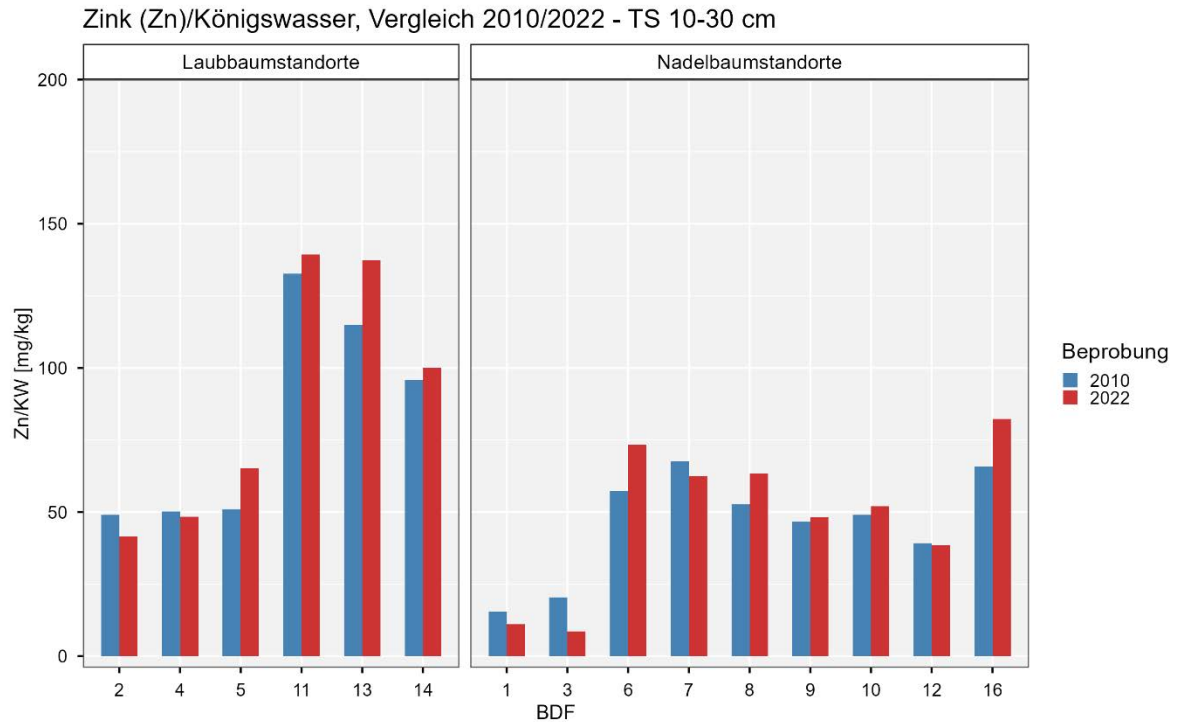


Abb. A35: Vergleich der Zinkgehalte (Königswasser-Extraktion) in mg/kg in der Tiefenstufe 10-30 cm der 1. und 2. Kernflächenbeprobung 2010 und 2022

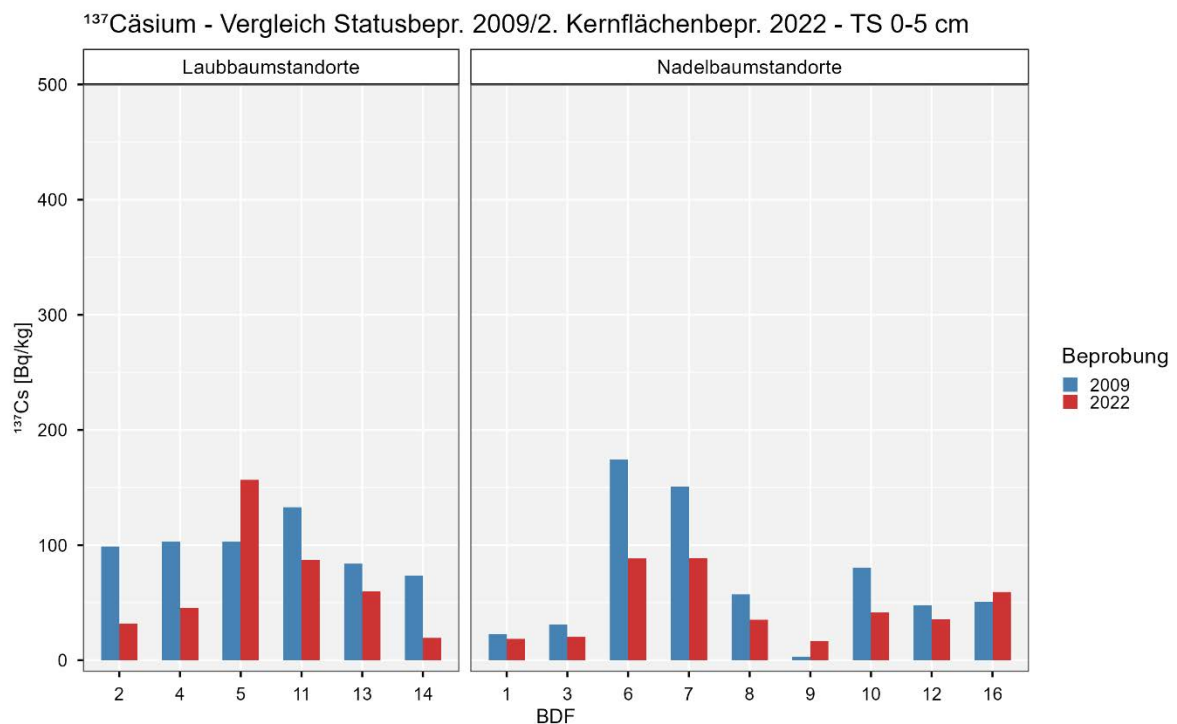


Abb. A36: Vergleich der spezifischen Aktivität von ¹³⁷Cäsium in Bq/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung 2022

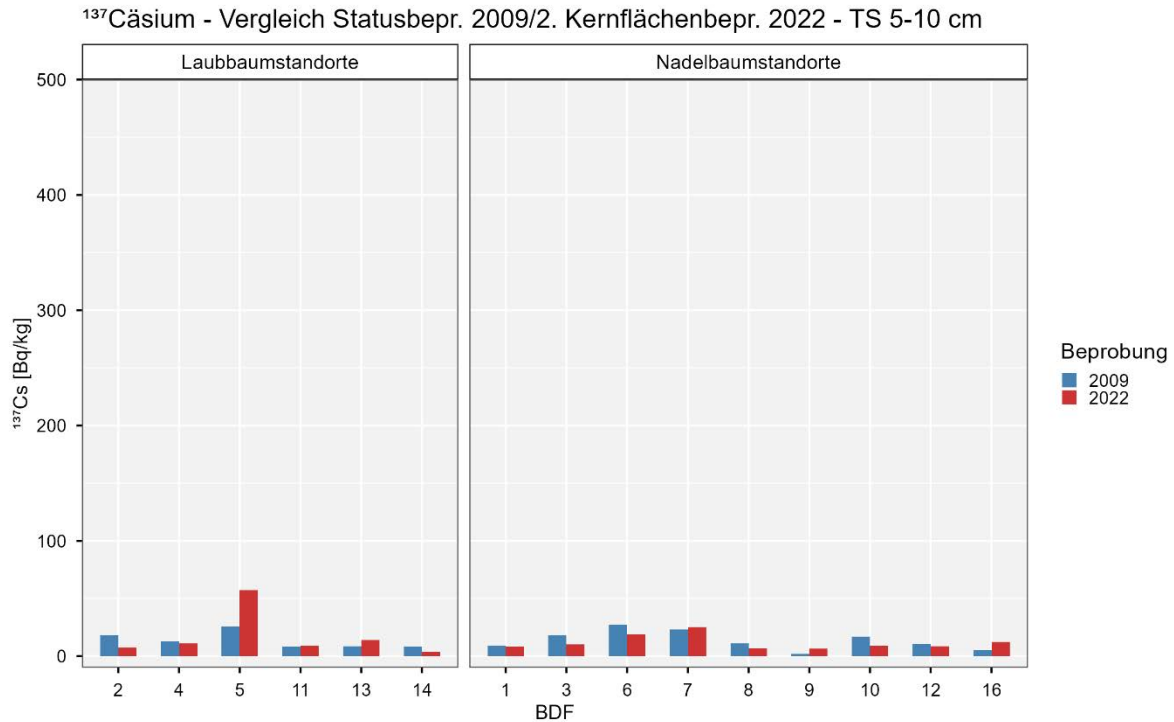


Abb. A37: Vergleich der spezifischen Aktivität von ¹³⁷Cäsium in Bq/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der Statusbeprobung 2009 und der 2. Kernflächenbeprobung 2022

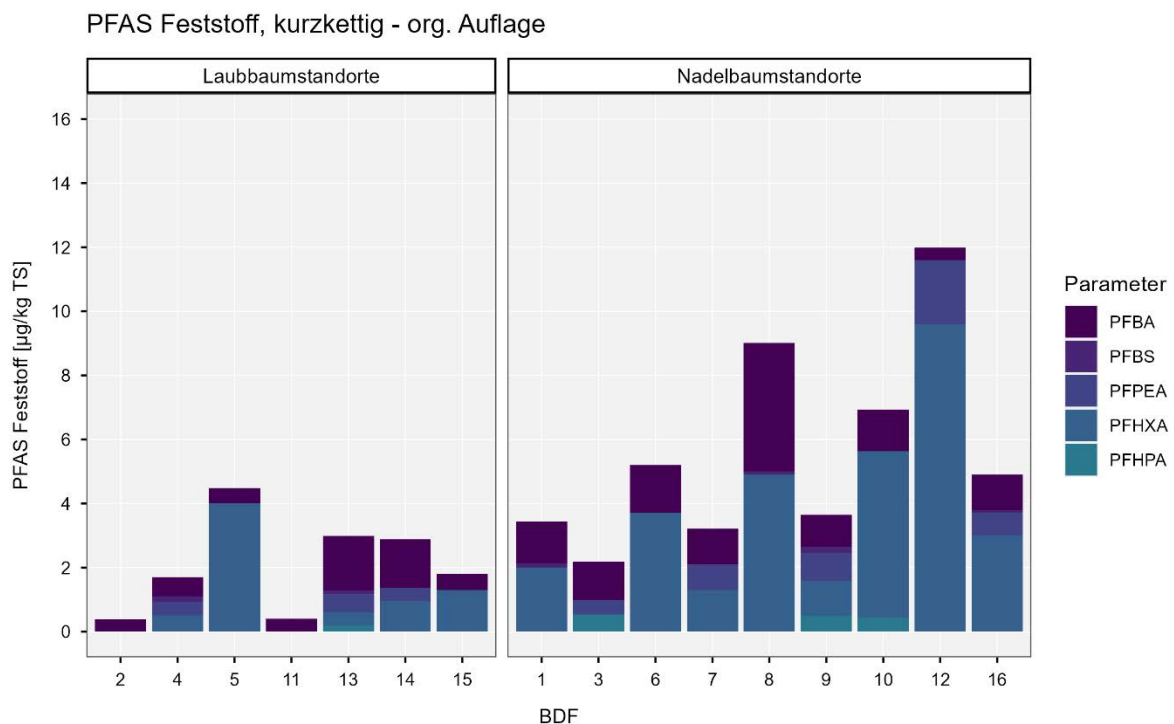


Abb. A38: PFAS Feststoff kurzkettiger PFAS in µg/kg in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022

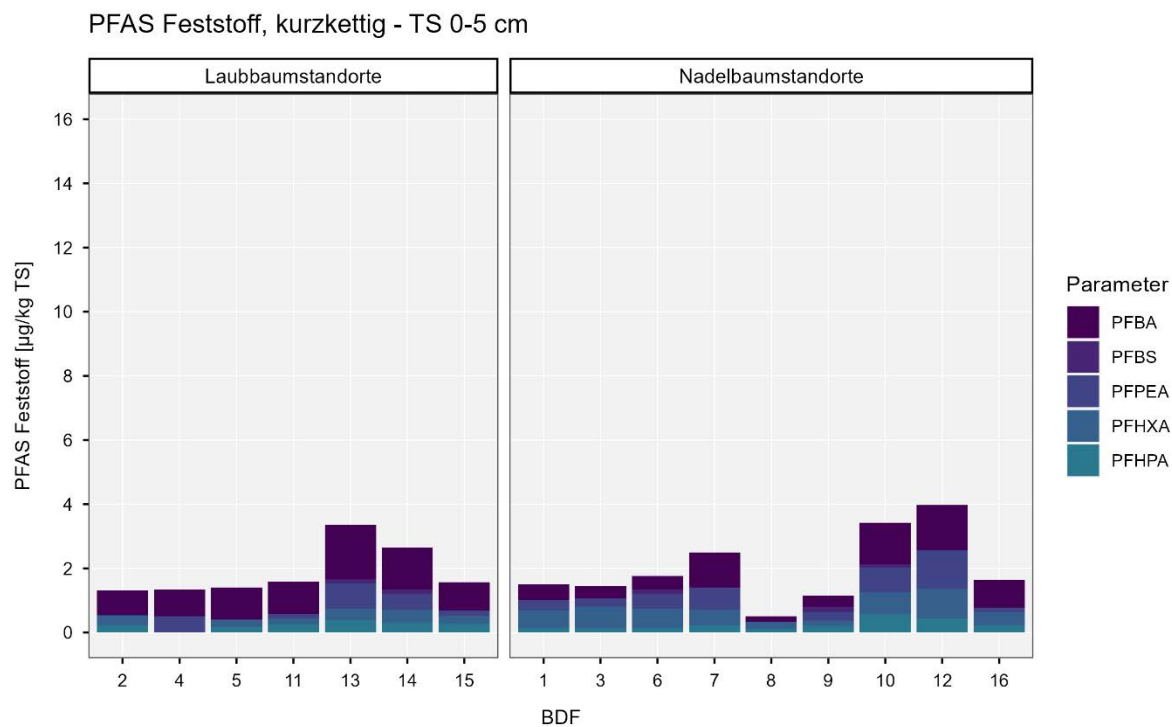


Abb. A39: PFAS Feststoff, kurzketiger PFAS in $\mu\text{g/kg}$ in der Tiefenstufe 0-5 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

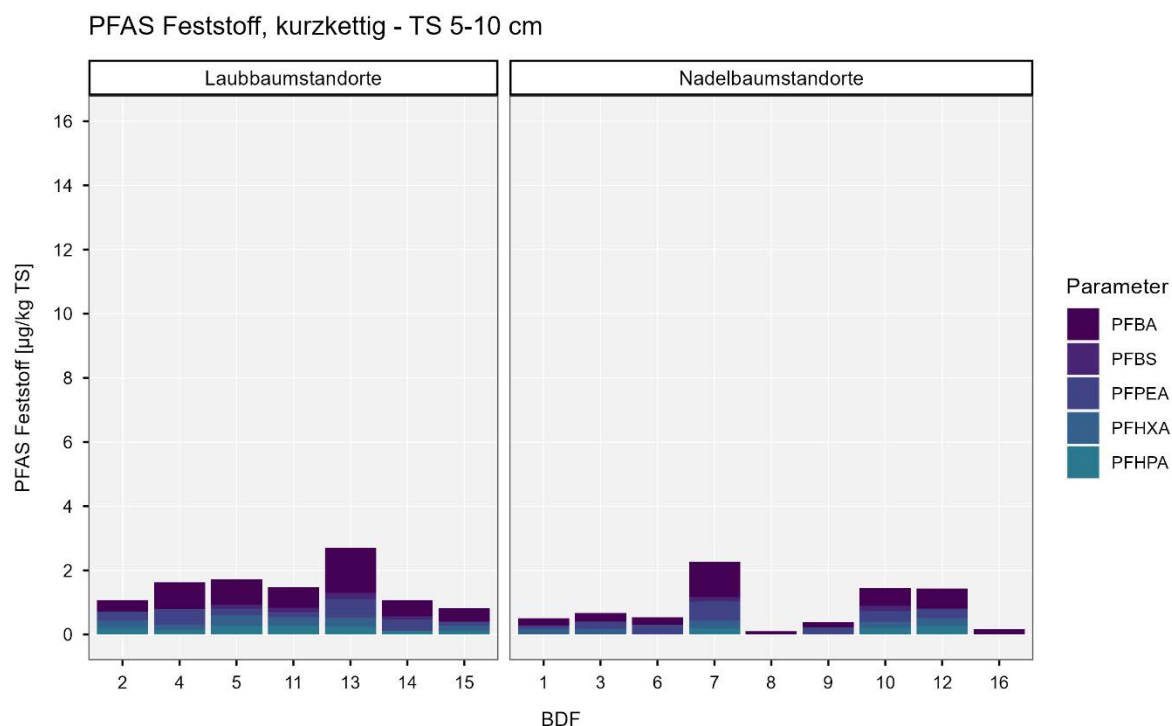


Abb. A40: PFAS Feststoff, kurzketiger PFAS in $\mu\text{g/kg}$ in der Tiefenstufe 5-10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

PFAS Feststoff, langkettig - org. Auflage

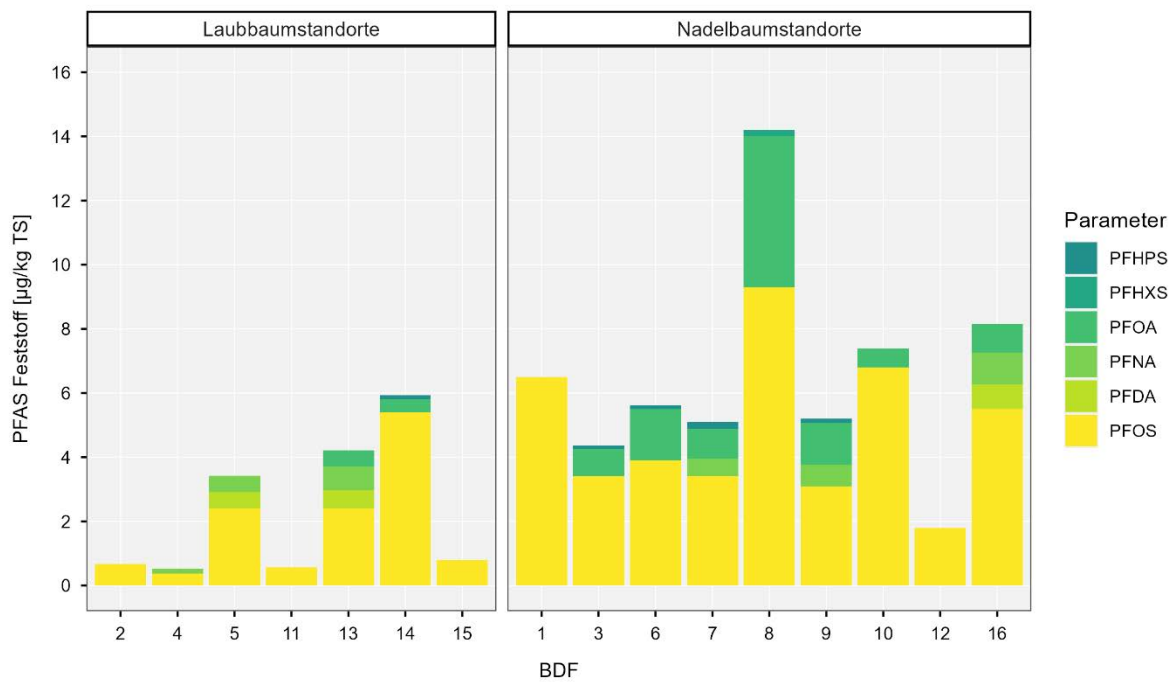


Abb. A41: PFAS Feststoff, langkettiger PFAS in µg/kg in der organischen Auflage, 2. Kernflächenbeprobung 2022

PFAS Feststoff, langkettig - TS 0-5 cm

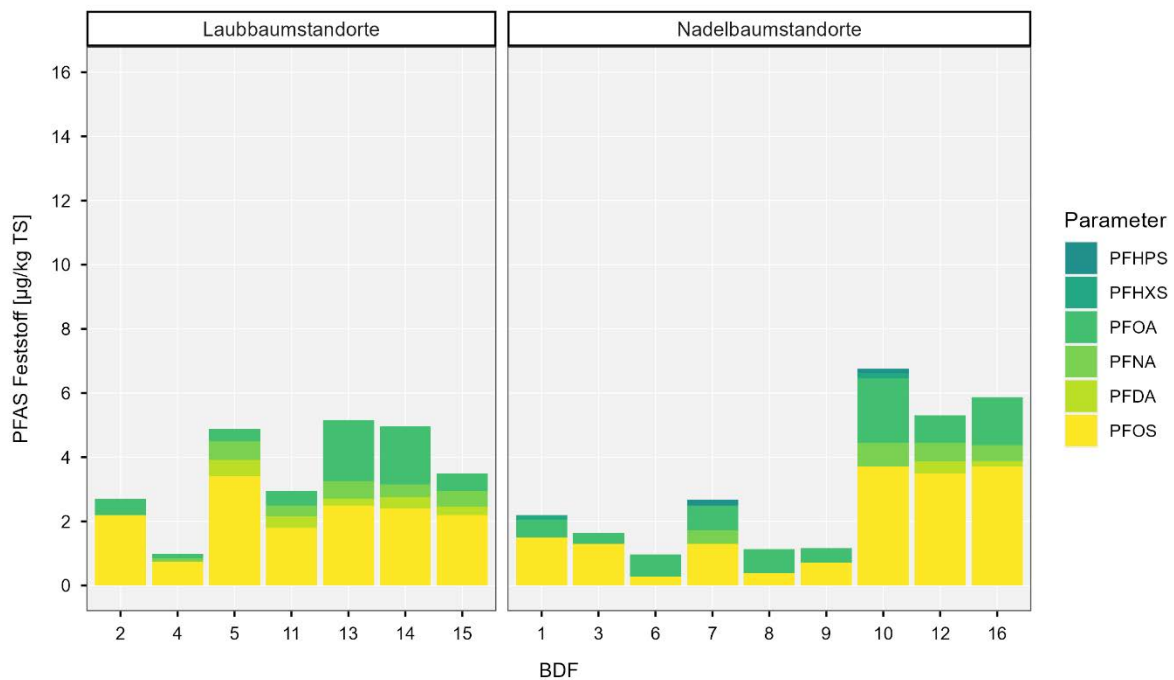


Abb. A42: PFAS Feststoff, langkettiger PFAS in µg/kg in der Tiefenstufe 0-5 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

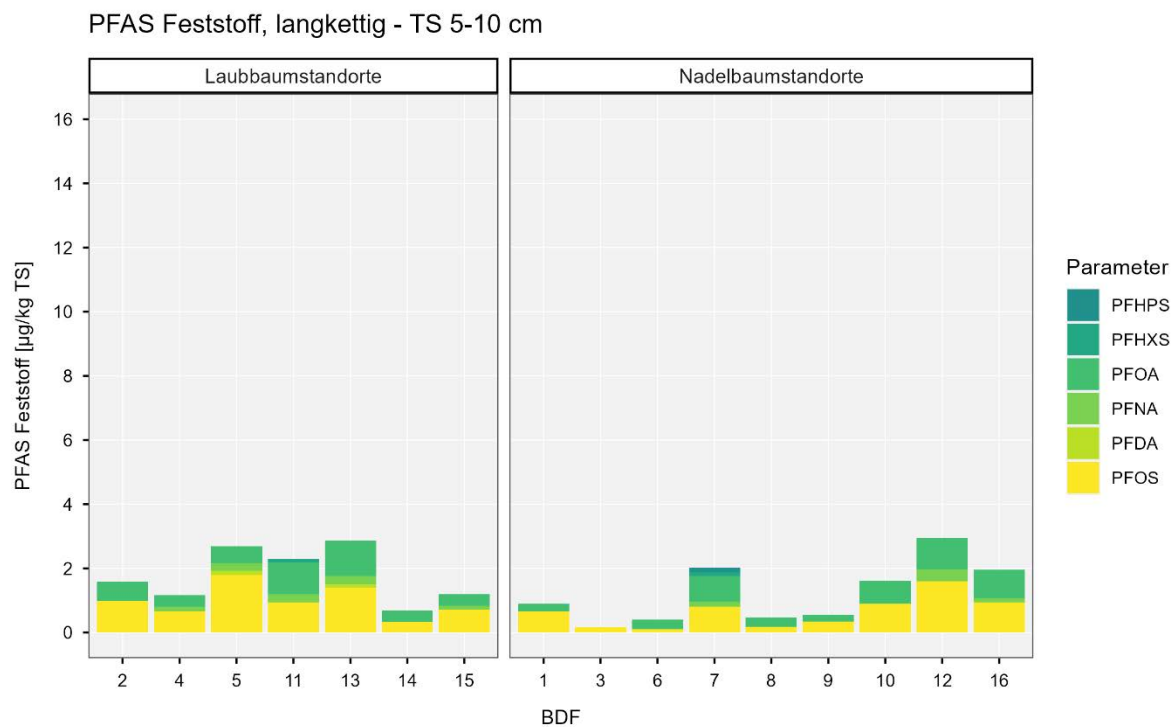


Abb. A43: PFAS Feststoff, langkettiger PFAS in µg/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm, 2. Kernflächenbeprobung 2022

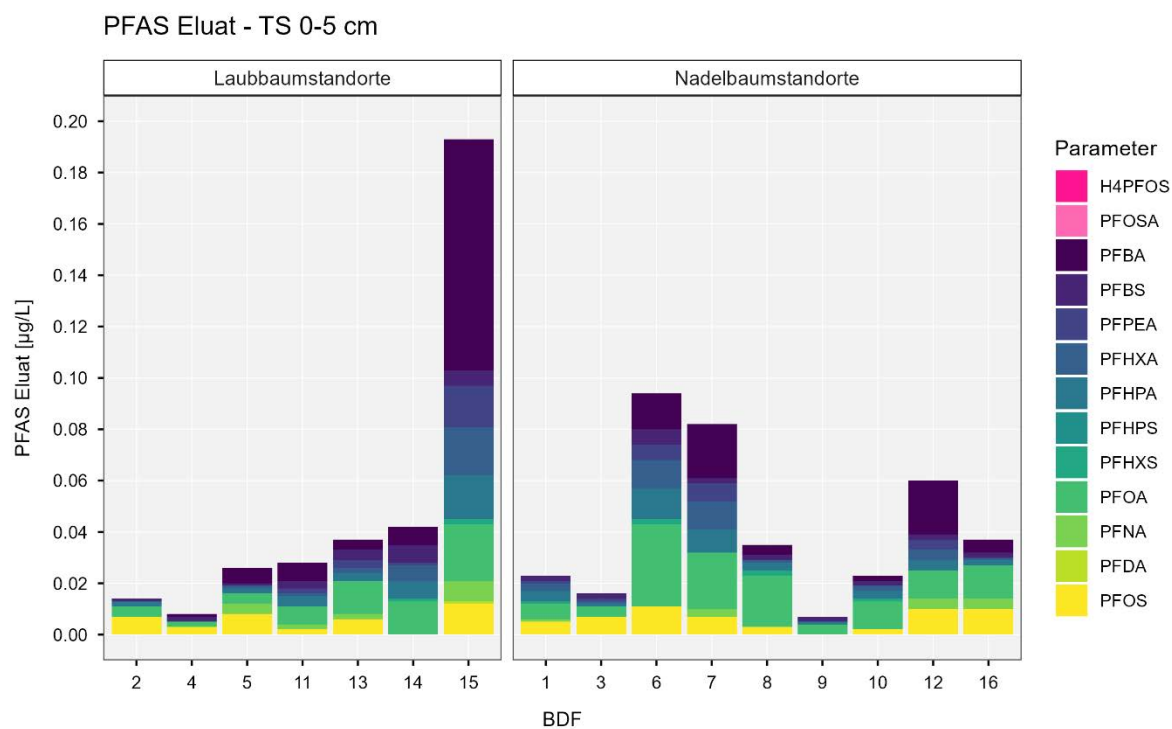


Abb. A44: PFAS Eluat in µg/l in der Tiefenstufe 0-5 cm der 2. Kernflächenbeprobung 2022

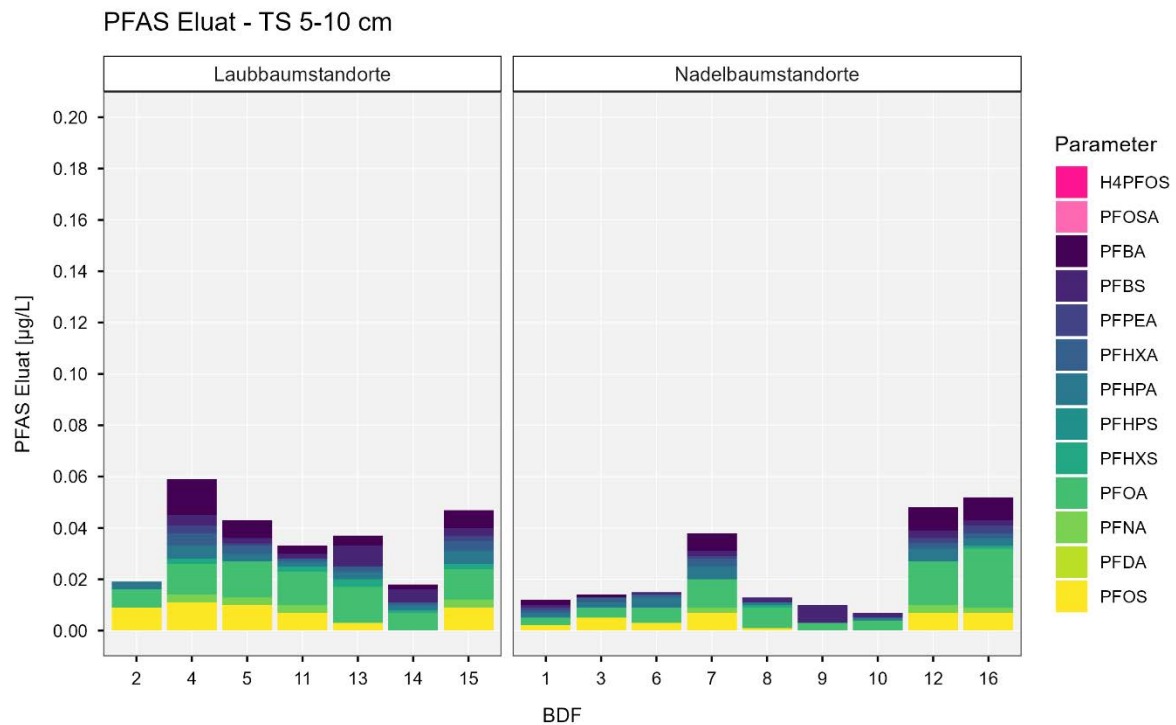


Abb. A45: PFAS Eluat in µg/l in der Tiefenstufe 5-10 cm der 2. Kernflächenbeobachtung 2022

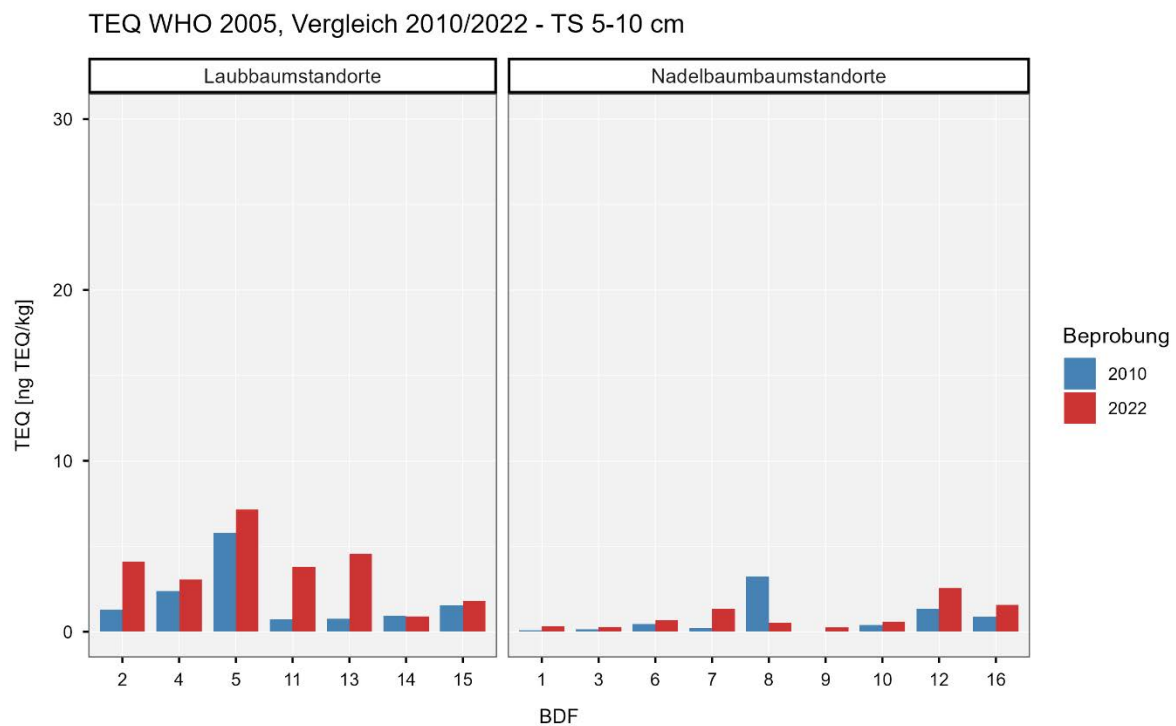


Abb. A46: Vergleich TEQ WHO 2005 in ng TEQ/kg in der Tiefenstufe 5-10 cm der 1. und 2. Kernflächenbeobachtung 2010 und 2022