

Orientierende Untersuchung der PFAS- Belastungen im Bereich Mannheim Nord

- Integrale Gefährdungsbeurteilung**
- Vorschlag zur weiteren Vorgehensweise**

Auftraggeber:

Stadt Mannheim Fachbereich Klima, Natur, Umwelt

Glücksteinallee 11

68163 Mannheim

12. September 2023

Kontakt

MICHAEL REIHNARD
Sachverständiger nach §18
BBodSchV

CHRISTOPHER SCHENKEL
Projektleiter

M 01725202800

E Christopher.Schenkel@arcadis.com

Arcadis Germany GmbH

Griesbachstraße 10

76185 Karlsruhe

Deutschland

Inhalt

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	12
2	Verwendete Unterlagen	13
2.1	Gutachten, Sonstiges	13
2.2	Verordnungen, Gesetztestexte	14
3	Standortbeschreibung	15
4	Bewertungsgrundlagen	19
4.1	Wirkungspfad Boden – Mensch	19
4.2	Wirkungspfad Boden – Pflanze	19
4.3	Wirkungspfad Boden – Grundwasser	20
4.4	Umgang mit PFAS-haltigem Bodenmaterial	22
5	Übersicht über die bisher durchgeführten Arbeiten	24
6	Darstellung der Ergebnisse sämtlicher durchgeführter Untersuchungen	34
6.1	Jährliche Beprobung der Beregnungsbrunnen (Grundwasseruntersuchungen)	35
6.2	Abgrenzung der Grundwasserverunreinigungen nach Norden (Landesgrenze zu Hessen)	37
6.3	Bodenuntersuchungen im Pflughorizont	39
6.4	Rammkernsondierungen zur Erkundung der Tiefenverlagerung	41
6.5	EOF- und Precursor-Untersuchungen	41
6.6		42
6.6.1		42
6.6.2		43
6.7	Coleman Kaserne	44
6.8	Fischproben aus dem Wilhelmswörtweiher	44
6.9	Untersuchung von Eigenwasserversorgern	45
6.10	Grundwasserüberwachung der Stadt Mannheim Untersuchung von Gartenbrunnen und im Landesmessnetz	46
7	Grundwassermodell	48

7.1	Hydrogeologischer Rahmen	48
7.2	Aufbau des Grundwassermodells	48
7.3	Grundwasserfließmodell	50
7.4	Modell zu PFAS-Eintrag in das Grundwasser aus dem ungesättigten Bereich	51
8	Gesamtauswertung und Bewertung sämtlicher Ergebnisse	54
8.1	Gefährdungspotenzial und Bewertung	54
8.2	Belastungsverteilung und Einteilung in Belastungs-Cluster	59
8.3	Beschreibung der regionalen Abgrenzung der Belastungs-Cluster	65
8.4	Hot-Spot Analyse	67
9	Integrales Standortmodell und clusterbezogene Beurteilung der Belastungsgrade	70
9.1	Belastungsgrade der verschiedenen Cluster	70
9.1.1	Nördliche Flächen an der Landesgrenze zu Hessen	70
9.1.2	Friesenheimer Insel	71
9.1.3	Bereich A	72
9.1.4	Bereich B	73
9.1.5	Bereich C	73
9.1.6	Bereich D	75
9.1.7	Bereich E	76
9.1.8	Bereich F	77
9.2	Überlegungen zur Priorisierung und zur Vorgehensstrategie	78
10	Bewertung und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen	79
11	Zusammenfassung	81

Tabellen

Tabelle 1	GFS-Werte und GOW für PFAS im Grundwasser (nach PFAS-Leitfaden [R 5])	21
Tabelle 2	Vorläufige maximal zulässige Konzentrationen im W/F 2:1 Eluat in µg/l für die entsprechende Verwertungskategorie (GFS-basierte Werte)	23
Tabelle 3	Vorläufige maximal zulässige Konzentrationen im W/F 2:1 Eluat in µg/l für die entsprechende Verwertungskategorie (GOW-basierte Werte)	23
Tabelle 4	Übersicht über bisher durchgeführte Untersuchungen im Bereich Mannheim Nord	24
Tabelle 5	Aufbau der Modellschichten im Grundwassermodell (aus [X 12]; [X 17]; [X 18])	49
Tabelle 6	Quartile und Mediane der Gesamtsumme PFAS und der wesentlichen PFAS-Einzelparameter (Tiefe 0 bis 0,3 m u. GOK)	59
Tabelle 7	Hot-Spot Übersicht in den einzelnen Untersuchungsbereichen	67

Abbildungen

Abbildung 1	Lage des Untersuchungsgebiets (blau umrandete Gebiete)	15
Abbildung 2	Geologie im Untersuchungsgebiet (nach GK50)	17
Abbildung 3	Pedologie im Untersuchungsgebiet (nach BK 50)	18
Abbildung 4	Entwicklung der Gesamt-PFAS-Konzentrationen in Beregnungsbrunnen. Jeder beprobte Brunnen ist durch einen Punkt dargestellt. Die Anzahl der beprobten Brunnen variiert pro Jahr.	36
Abbildung 5	Entwicklung der PFAS-Konzentrationen in BBR 9-2	36
Abbildung 6	Entwicklung der PFAS-Konzentrationen größer 10 µg/l PFAS in Beregnungsbrunnen	37
Abbildung 7	Eingrenzung der Grundwasserbelastungen nach Norden (Landesgrenze zu Hessen) aus [X 6]	38
Abbildung 8	Verteilung der PFAS-Einzelsubstanzen im Bodeneluat [µg/l] (Berechnung nur mit Werten oberhalb der analytischen BG; Boxplot-Darstellung: graues Kästchen gibt oberes und unteres Quartil an, Strich in der Mitte ist der Median)	40
Abbildung 9		42
Abbildung 10		43
Abbildung 11:	Darstellung der PFAS-Gesamtkonzentration im Brunnen A.	45
Abbildung 12	Darstellung der PFAS-Gesamtkonzentration im Brunnen B.	46
Abbildung 13	Grundwasserüberwachung Gartenbrunnen (es werden nur PFAS größer der BG dargestellt).	47
Abbildung 14	Grundwassergleichen (graue Linien) nach Berechnung mit dem Grundwassermodell	50
Abbildung 15	Konzept zu Eintragsmodell für Stoffeinträge in das Grundwasser aus dem ungesättigten Bereich	52
Abbildung 16	Überschreitungen der GFS- und/oder GOW-Werte am Ort der Probenahme (rote Flächen: belaste Flächen mit Überschreitung, grüne Flächen keine Überschreitung von GFS- und/oder GOW-Werten)	55

Abbildung 17	Lageplan mit Darstellung der Grundwasserbelastungen (Quotientensumme (QS)) im Zeitraum 2021 bis 2023	57
Abbildung 18	Verteilung PFHxA im Grundwasser (Beregnungsbrunnen) (dargestellt sind die höchsten PFHxA Befunde [25 % der höchsten Konzentrationen von größer 1,6 µg/l im Grundwasser] als violette Kreise)	58
Abbildung 19	Konzentrationsverteilung Boden Σ PFAS (Eluat in µg/l)	60
Abbildung 20	Konzentrationsverteilung Boden PFOA (Eluat in µg/l)	61
Abbildung 22	Konzentrationsverteilung Boden PFPeA (Eluat in µg/l).	62
Abbildung 24	Konzentrationsverteilung Boden PFHpA (Eluat in µg/l).	63
Abbildung 25	Aufteilung des Untersuchungsgebietes in acht Bereiche mit unterschiedlichen Belastungssituationen	65
Abbildung 28	Hot-Spot Analyse, Flächen mit höchsten PFAS-Gesamtkonzentrationen	69
Abbildung 29	Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich "Nördliche Flächen an der Landesgrenze Hessen"	70
Abbildung 30	Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich "Friesenheimer Insel"	71
Abbildung 31	Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich A: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert	72
Abbildung 32	Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich B: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert	73
Abbildung 33	Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich C: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert	74

- Abbildung 34 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich D: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS kleiner 1 mit gelbem Punkt markiert 75
- Abbildung 35 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich E: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert 76
- Abbildung 36 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich F: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert 77

Anlagen

Anlage 1	Lagepläne
Anlage 1.1	Grundwasseruntersuchungen
Anlage 1.1.1	Lageplan mit Darstellung der Grundwasserbelastungen (Quotientensumme (QS)) im Zeitraum 2021 bis 2023
Anlage 1.2	Bodenuntersuchungen
Anlage 1.2.1	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung mit kurzkettigen PFAS im Eluat (nach Vorgabe LWA)
Anlage 1.2.2	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFAS-Summe im Eluat
Anlage 1.2.3	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFAS-Konzentration im Eluat
Anlage 1.2.4	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFOA-Konzentration im Eluat
Anlage 1.2.5	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFHpA-Konzentration im Eluat
Anlage 1.2.6	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFHxA-Konzentration im Eluat
Anlage 1.2.7	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFPeA-Konzentration im Eluat
Anlage 1.2.8	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastung (GFS-Wert) und der PFNA-Konzentration im Eluat
Anlage 1.2.9	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastungen und der Hot-Spot- Flächen
Anlage 1.2.10	Lageplan mit Darstellung der Bodenbelastungen nach Verwertungskategorien (BMUV)
Anlage 1.3	Geologische und Pedologische Karten
Anlage 1.3.1	Bodenkarte (BK 50)
Anlage 1.3.2	Geologische Karte (GK50)

Anlage 2	Unterlagen Grundwassermodell
Anlage 3	Auflistung der Hot-Spot-Flächen

Abkürzungen Poly- und Perfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)

PFBA	Perfluorbutansäure
PFPeA	Perfluorpentansäure
PFHxA	Perfluorhexansäure
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFOA	Perfluoroktansäure
PFNA	Perfluornonansäure
PFDA	Perfluordekansäure
PFUdA	Perfluorundekansäure
PFDoA	Perfluordodekansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure
PFOS	Perfluoroktansulfonsäure
PFDS	Perfluordekansulfonsäure
PFOSA	Perfluoroktansulfonamid
HPFHpA	7H-Dodecanfluorheptansäure
H2PFDA	2H,2H-Perfluordecansäure
H4PFUnA	2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanot
H4PFHxS	1H,1H,2H,2H-Perfluorhexansulfonsäure (4:2 FTS)
H4PFOS	1H,1H,2H,2H-Perfluoroktansulfonsäure (6:2 FTS)
H4PFDS	1H,1H,2H,2H-Perfluordekansulfonsäure (8:2 FTS)
6:2 di-PAP	1H,1H,2H-Perfluorodecylphosphat
8:2 di-PAP	1H,1H,2H,2H-Perfluorodecylphosphat

1 **Veranlassung und Aufgabenstellung**

In Mannheim - Sandhofen findet seit dem Jahr 2015 wegen des Verdachts einer PFAS-Belastung der Ackerflächen eine Orientierende Untersuchung des Bodens und des Grundwassers statt. Wegen der flickenteppichartigen Verteilung der Belastung bestand für das Gesamtgebiet ein Gefahrenverdacht. Eine Untersuchung aller Flächen im Verdachtsgebietes war erforderlich.

Inzwischen ist im Frühjahr 2023 das komplette Untersuchungsgebiet mit rund 1.380 ha beprobt. Bei rund 41 % der untersuchten Fläche wurde eine PFAS-Belastung mit Überschreitung der GFS- und teilweise der GOW-Werte am Ort der Probenahme (nach Leitfaden zur PFAS-Bewertung des BMUV vom Februar 2022) festgestellt.

Nach dem Abschluss der Erkundungen war eine gesamtheitliche, integrale Beurteilung der großräumigen, flächenhaften, schädlichen Bodenveränderung, die sich aus den Einzelflächenkonglomeraten zusammensetzt, durchzuführen.

Die Vorgehensweise hierzu unterscheidet sich grundlegend von der Bewertung der Einzelflächen. In der integralen Gefährdungsbeurteilung war zu prüfen, ob mögliche Klumpen-Belastungen (Hot-Spots) mit erhöhten Beiträgen an der vorhandenen oder zukünftigen Gesamtbelastung des Grundwassers existieren und einer vorgezogenen Bearbeitung bedürfen.

Die Stadt Mannheim beauftragte die ARCADIS Germany GmbH am 19.08.2020 mit der Erstellung eines Sachverständigengutachtens zur Integralen Gefährdungsbeurteilung und der Prüfung möglicher Hot-Spots der PFAS-Belastung im Bereich Mannheim Nord.

Für die Auswertungen waren folgende Untersuchungsschritte durchzuführen:

- Auswertung aller vorliegenden Daten (Standortdaten, Analysedaten) und Erstellen eines integralen konzeptionellen Standortmodells
- Vereinfachtes stationäres GrundwassermodeLL auf Basis des Landesmodells, um eine integrale Sickerwasserprognose zu erstellen (Hydrogeologisches Modell, Grundwasserfließmodell, Eintragsmodell aus ungesättigtem Bereich)
- Integrale Gefährdungsbeurteilung
- Prüfung von Hot-Spots und ggf. Ausweisung von Belastungsbereichen, die in der Bearbeitung vorgezogen werden sollten
- Vorschlag zur weiteren Vorgehensweise

Das Gutachten zur Integralen Gefährdungsbeurteilung wird hiermit vorgelegt.

2 Verwendete Unterlagen

2.1 Gutachten, Sonstiges

- [X 1] PFAS-Untersuchungen an mit Papierschlämmen beaufschlagten Ackerflächen im Stadtkreis Mannheim, Pedos GmbH 02.03.2015.
- [X 2] PFAS-Bodenuntersuchung in Mannheim – Nord Orientierende Untersuchung, Arcadis Deutschland GmbH, 10.09.2015.
- [X 3] PFAS-Untersuchungen in Mannheim – Nord, Orientierende Untersuchung von nachgemeldeten Ackerschlägen, 1. Zwischenbericht, Arcadis Deutschland GmbH, 22.03.2016.
- [X 4] PFAS-Untersuchungen in Mannheim – Nord, Orientierende Untersuchung, 2. Zwischenbericht zur dritten Untersuchungskampagne, Arcadis Germany GmbH, 7.11.2016.
- [X 5] PFAS-Untersuchungen in Mannheim – Nord, Orientierende Untersuchung, 3. Zwischenbericht zur vierten Untersuchungskampagne, Arcadis Germany GmbH, 11.10.2017.
- [X 6] PFAS-Untersuchungen in Mannheim- Nord, Kurzbericht: Untersuchungen im Bereich der Landesgrenze zu Hessen, Arcadis Germany GmbH, 08.12.2017.
- [X 7] PFAS-Untersuchungen in Mannheim Nord, Orientierende Untersuchung – Untersuchung von 12 Verdachtsflächen sowie Untersuchungen des Kompostwerks und der Coleman- Kaserne, 4. Bericht zur fünften Untersuchungskampagne, Arcadis Germany GmbH, 08.03.2019.
- [X 8] PFAS-Untersuchungen Mannheim Nord, Orientierende Untersuchungen – Kurzstellungnahme zur Belastungssituation der 2019 untersuchten Teilflächen I – III, Arcadis Germany GmbH, 11. März 2020.
- [X 9] PFAS-Untersuchungen Mannheim Nord, Orientierende Untersuchungen – Kurzstellungnahme zur Belastungssituation der 2020 und 2021 untersuchten Teilflächen IV – VI, Arcadis Germany GmbH, 09. August 2021.
- [X 10] PFAS-Untersuchungen Mannheim Nord, Orientierende Untersuchungen – Kurzstellungnahme zur Belastungssituation der 2021 und 2022 untersuchten Teilflächen VII und VIII, Arcadis Germany GmbH, 09. August 2022.
- [X 11] Gutachten: Lebensmittelüberwachung; Untersuchung einer Probe „Aal aus Wilhelmswörthweiher“; Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Freiburg; 12.12.2019.
- [X 12] Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum, Fortschreibung 1983-1998. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg; Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz. Stuttgart, Wiesbaden, Mainz 1999.
- [X 13] Deutscher Wetterdienst (DWD): Wetterdaten der Station Mannheim, https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/baden-wuerttemberg/mannheim/_node.html und Daten des DWD CDC Portals https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html Abgerufen am 13. März 2023.

- [X 14] Analysenergebnisse zu Grundwasserprobenahmen von Eigenwasserversorgern durch den FB 58 der Stadt Mannheim.
- [X 15] Untersuchungsergebnisse zu Grundwasseruntersuchungen an Gartenbrunnen und EWW in Mannheim Nord im Auftrag der Stadt Mannheim.
- [X 16] Grundwasseranalysen Erdenwerk Mannheim. Verschiedene Analysenberichte. Zur Verfügung gestellt durch die Stadt Mannheim.
- [X 17] Geologische Karte GK 50 von Baden-Württemberg. LRGB RP Freiburg.
- [X 18] Bodenkarte BK 50 von Baden-Württemberg. LRGB RP Freiburg.
- [X 19] Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 330, 2008.

2.2 Verordnungen, Gesetztestexte

- [R 1] Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 7 Absatz 30 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306) geändert worden ist.
- [R 2] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten, (Erlass: 21.08.2018).
- [R 3] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juli 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.
- [R 4] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Vorläufige GFS-Werte PFAS für das Grundwasser und Sickerwasser aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten, Erlass 17.06.2015, ersetzt durch Erlass vom 21.08.2018. [Aufgehoben]
- [R 5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz; Leitfaden zur PFAS-Bewertung – Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. Stand 21.02.2022.
- [R 6] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Anwendung des Leitfadens zur PFAS-Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen des BMUV. Erlass vom 22.08.2022.

3 Standortbeschreibung

Untersuchungsgebiet. Das Untersuchungsgebiet umfasst die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche im Bereich Mannheim Nord inkl. der landwirtschaftlich genutzten Flächen auf der Friesenheimer Insel (siehe Abbildung 1 und Lagepläne im Anhang).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich am nördlichen Rand des Stadtgebietes Mannheim in den Stadtteilen Sandhofen und Scharhof.

Nutzung. Ein Großteil der Untersuchungsflächen sind genutzte Ackerflächen. Bei Mannheim Sandhofen und Scharhof reichen die Ackerflächen bis an die Bebauungsgrenze des südlich gelegenen Stadtgebietes heran. Im Osten bildet die genutzte amerikanische Coleman Kaserne die Begrenzung der ackerbaulich genutzten Flächen. Im nordwestlichen Bereich der Untersuchungsfläche ist in der Nähe des Rheins das kommunale Klärwerk der Stadt Mannheim angesiedelt (siehe Abbildung 1)



Abbildung 1 Lage des Untersuchungsgebiets (blau umrandete Gebiete)

Geologie und Hydrogeologie. Das Untersuchungsgebiet liegt im nördlichen Oberrheingraben innerhalb der Rheinniederung und der Niederterrasse des Rheins.

Die quartäre Grabenfüllung ist durch mächtige fluviatile Ablagerungen gekennzeichnet, die sich entsprechend der geologischen Klima- und Sedimentationsbedingungen aus grobkörnigeren sandig-kiesigen Schichtpaketen mit feinsandigen schluffig-tonigen Zwischenhorizonten abwechseln.

Lithologisch ergibt sich eine Gliederung in ein oberes, mittleres und unteres Kieslager, in dem jeweils das obere, mittlere und untere Grundwasserstockwerk ausgebildet sind. Die Sande und Kiese des betroffenen oberen Grundwasserleiters stehen im Untersuchungsgebiet meist ab rund 1 bis 2 m unter Geländeoberkante (GOK) an und haben eine Mächtigkeit von ca. 30 m.

Die Grundwasserfließrichtung ist großräumig betrachtet in Richtung des Rheins nach West-Nordwest gerichtet. Mit zunehmender Nähe zum Rhein wird die Fließrichtung durch die Wasserstände des Rheins beeinflusst. Bei hohen Rheinständen kann es aufgrund influenter Verhältnisse zu einer Umkehr der Fließrichtung bzw. zu einer Stagnation kommen. In der nachfolgenden Abbildung ist ein Ausschnitt der geologischen Karte (GK50) für den Untersuchungsbereich gezeigt. Diese ist detaillierter in Anlage 1.3.2 zu betrachten.

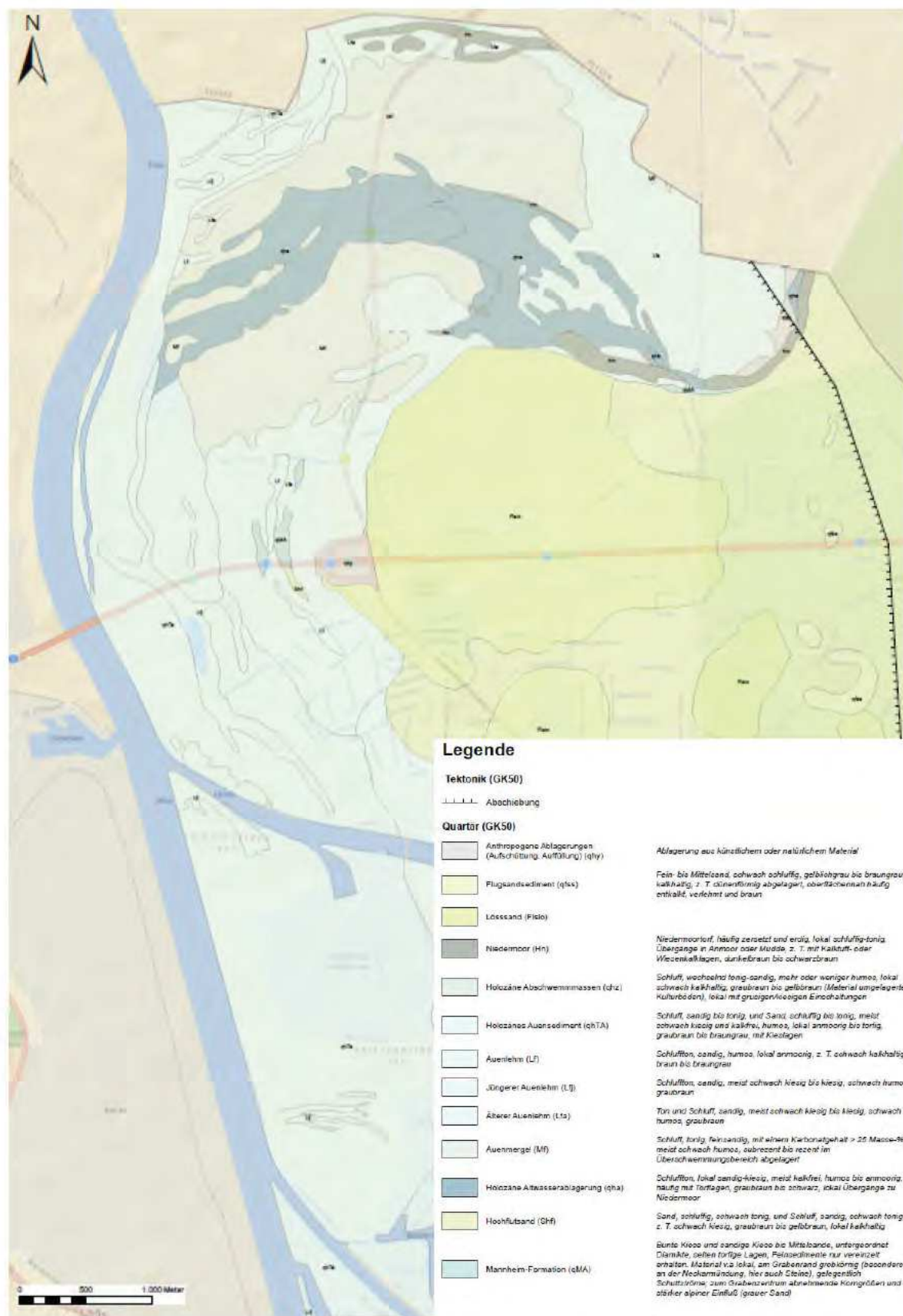


Abbildung 2 Geologie im Untersuchungsgebiet (nach GK50)

Pedologie. Überprägt von der Auenlandschaft des Rheins entwickelten sich im Untersuchungsgebiet aus den schluffig-lehmigen Sedimenten in selten überschwemmten Gebieten Auengleye, Auengley-Auenpararendzinen sowie Braune Auenböden. In Senken (Blumenauer Bruch) sind stark humose bis anmoorige Böden anzutreffen. Auf vorherrschend trockenen Standorten mit größeren Grundwasserflurabständen entwickelten sich Braunerden und Parabraunerden aus Hochflutlehm. In der nachfolgenden Abbildung ist ein Ausschnitt der Bodenkarte (BK50) für den Untersuchungsbereich gezeigt. Diese ist detaillierter in Anlage 1.3.1 zu betrachten.

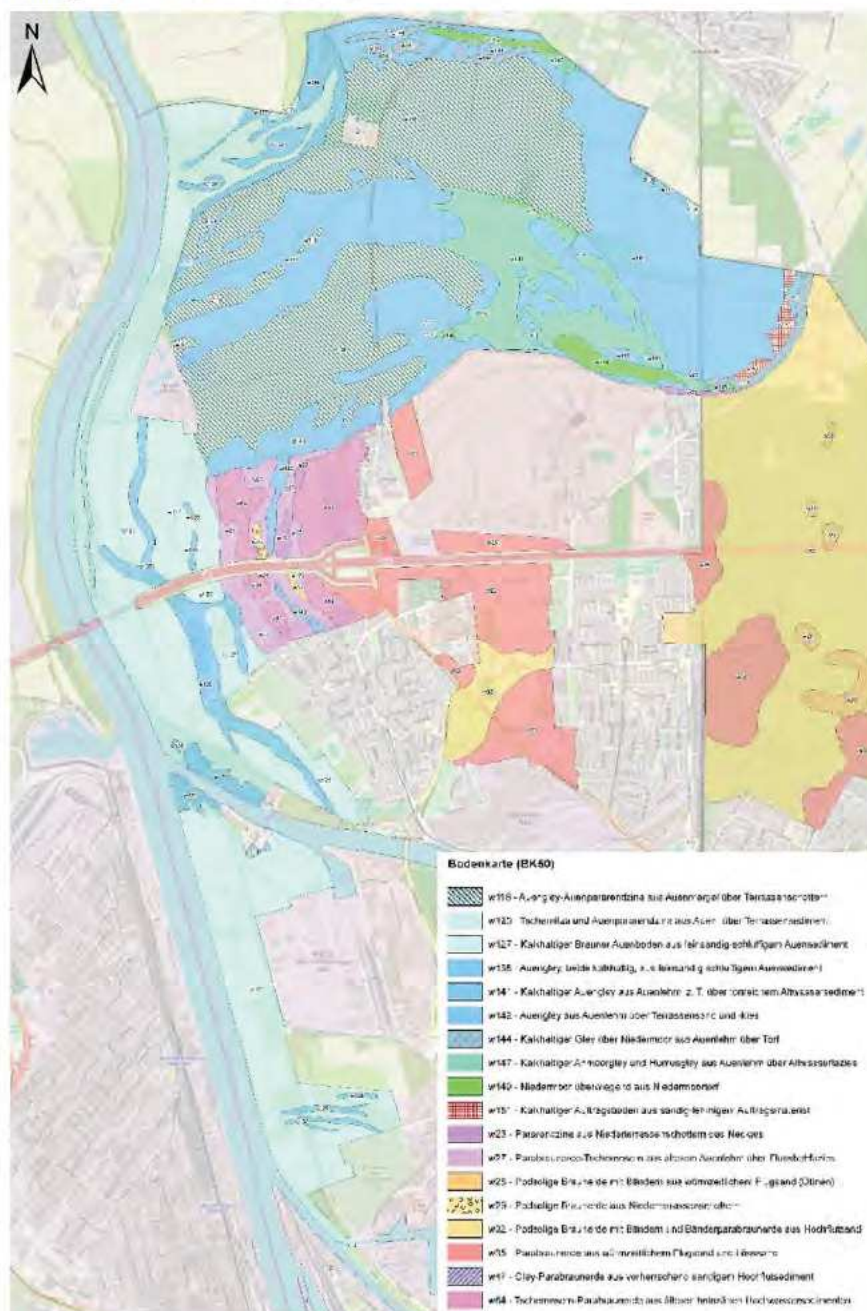


Abbildung 3 Pedologie im Untersuchungsgebiet (nach BK 50)

4 Bewertungsgrundlagen

4.1 Wirkungspfad Boden – Mensch

Bei einer landwirtschaftlichen Nutzung halten sich im Sinne der Bewertungsgrundlagen der BBodSchV [R 3][R 1] keine Menschen regelmäßig auf den Belastungsflächen auf. Deshalb ist der Wirkungspfad Boden – Mensch nicht betroffen.

4.2 Wirkungspfad Boden – Pflanze

Für den Wirkungspfad Boden – Nutzpflanze existieren keine bodenschutzrechtlichen Prüfwerte für PFAS.

Nachdem seitens des zuständigen Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) keine Aussagen über die gesundheitliche Einstufung der kurzkettigen PFAS getroffen werden konnten, hatte das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) auf der Basis der Verzehrsgewohnheiten für Obst und Gemüse Ausgangswerte errechnet und daraus Beurteilungswerte abgeleitet.

Lebensmittel, deren Gehalte mit kurzkettigen PFAS analytisch sicher über den jeweils geltenden Beurteilungswerten liegen, sind lebensmittelrechtlich nicht verkehrsfähig. Zwischenzeitlich wurden für Obst und Gemüse, für Lebensmittel aus tierischer Erzeugung (Fleisch, Milch, Eier und Honig) und für Getreide Beurteilungswerte (BUW) für die kurz- und mittelkettigen PFAS festgelegt. Erste Untersuchungen der Lebensmittelüberwachungsbehörden aus den Vorjahren haben gezeigt, dass langkettige PFAS kaum, kurzkettige jedoch in gewissem Umfang von den Pflanzen aufgenommen werden können.

Bei inzwischen mehrfach durchgeführten Vor-Ernte-Monitorings durch das Amt für Landwirtschaft und Naturschutz des Landratsamts Rhein-Neckar-Kreis wurden in Gemüseproben geringe Gehalte von PFBA und/oder PFPeA vorgefunden. Bei den Getreideproben wurden ebenfalls PFAS festgestellt. Hierbei wurden ausschließlich kurzkettige PFAS identifiziert.

4.3 Wirkungspfad Boden – Grundwasser

Die Gefahrenbeurteilung für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser erfolgte während der meisten Zeit des Projektverlaufs auf Grundlage des Erlasses „Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS) zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten“ vom 21. August 2018 [R 4]. Dieser wurde 2022 durch den PFAS-Leitfaden des BUMV [R 5] sowie den Hinweisen zur Anwendung des Leitfadens zur PFAS-Bewertung durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [R 6] ersetzt.

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit insbesondere zu den bereits vorgelegten Zwischenberichten sind bei den Zusammenfassungen der durchgeführten Arbeiten in Kapitel 5 die damals gültigen Bewertungen der belasteten Flächen beibehalten worden.

In den darauffolgenden Kapiteln wird die Bewertung auf Grundlage des aktuellen PFAS-Leitfadens aufgenommen und für das Gesamtgebiet angewendet.

Die Bewertungskriterien des Leitfadens zur PFAS-Bewertung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz „*Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung von PFAS-haltigen Bodenmaterials*“ [R 5] sowie die Hinweise zur „*Anwendung des Leitfadens zur PFAS-Bewertung von Boden und Grundwasserverunreinigungen des BMUV*“ durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg [R 6] für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser sind im Folgenden verkürzt dargestellt.

Für die Bewertung des für PFAS vorrangig relevanten Wirkungspfads Boden-Grundwasser wird für Materialproben aus der ungesättigten Bodenzone (Ort der Probennahme) die Konzentration der Stoffe im Sickerwasser am Ort der Beurteilung auf Grundlage von Elutions- oder Perkulationsversuchen abgeschätzt. Hierbei wird eine Sickerwasserprognose, bestehend aus Materialuntersuchungen und Transportprognose durchgeführt.

Mit Inkrafttreten der Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung am 01.08.2023 sind die GFS-Werte als Prüfwerte eingeführt und gelten für den Ort der Beurteilung. Die GOW-Werte gelten weiter als Prüfwertvorschläge.

Die Quotientensumme aus Eluatanalysen wird zur Beurteilung des Wirkungspfads Boden-Grundwasser nicht zusätzlich herangezogen.

Bei einer Überschreitung einer der Prüfwerte oder der Prüfwertvorschläge im Eluat bereits am Ort der Probenahme, ist mit einer Transportprognose (auch verbalargumentativ) abzuschätzen, ob diese Überschreitung auch am Ort der Beurteilung zu erwarten ist. Eine Überschreitung des Prüfwerts oder Prüfwertvorschlags führt nicht zur unmittelbaren Gefahrenfeststellung, sondern bewirkt eine weitere Prüfung.

Überschreitet die prognostizierte Konzentration am Ort der Beurteilung die Prüfwerte oder Prüfwertvorschläge, sind nach § 9 Absatz 2 BBodSchG wegen des hinreichenden Verdachts auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast weitere Sachverhaltsermittlungen durchzuführen [R 5]. Überschreitet die prognostizierte Konzentration am Ort der Beurteilung die Prüfwerte (GFS-Werte), sind nach § 9 Absatz 2 BBodSchG wegen des hinreichenden Verdachts auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast weitere Sachverhaltsermittlungen durchzuführen.

Gemäß dem Einführungsschreiben des Umweltministeriums [R 6] zum PFAS-Leitfaden [R 5] ist zur Bewertung mehrerer gleichzeitig auftretender PFAS im Grundwasser, für die GFS-Werte festgelegt wurden, die Quotientensumme analog der Additionsregel der Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 402) heranzuziehen. Wenn die Quotientensumme bei der Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit den Wert 1 überschreitet, ist eine schädliche Grundwasserveränderung zu vermuten [R 5]. Nach [R 5] haben im Unterschied zu GFS-Werten die GOW-Werte einen orientierenden Charakter, d.h. eine Überschreitung dieser für die Trinkwasserbewertung geltenden Werte deutet auf nachteilige Veränderung der Beschaffenheit des Grundwassers hin.

Tabelle 1 GFS-Werte und GOW für PFAS im Grundwasser (nach PFAS-Leitfaden [R 5])

Stoff	GFS-Wert [µg/l]	GOW [µg/l]
PFBA	10,0	
PFPeA		3,0
PFHxA	6,0	
PFHpA		0,3
PFOA	0,1	
PFNA	0,06	

Stoff	GFS-Wert [$\mu\text{g/l}$]	GOW [$\mu\text{g/l}$]
PFDA		0,1
PFBS	6,0	
PFHxS	0,1	
PFHpS		0,3
PFOS	0,1	
H4PFOS		0,1
PFOSA		0,1
Weitere PFAS mit R1- (CF ₂) _n -R ₂ , mit $n > 3$		0,1

Zur besseren Lesbarkeit des Textes ist ein Boden als „belastet“ bezeichnet, wenn die Prüfwerte (GFS-Werte) oder vorläufigen Prüfwerte (GOW-Werte) überschritten sind.

4.4 Umgang mit PFAS-haltigem Bodenmaterial

Sofern PFAS- verunreinigtes Bodenmaterial nach einem Aushub verwertet werden soll, finden die nachfolgend aufgeführten Verwertungskategorien nach dem PFAS-Leitfaden des BUMV [R 5] Verwendung.

Es erfolgt eine Einteilung über die Eluatwerte in drei Verwertungskategorien (VK):

- VK 1 = Uneingeschränkter offener Einbau
- VK 2 = Eingeschränkter offener Einbau in Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten
- VK 3 = Eingeschränkter Einbau in technischen Bauwerken mit definierten Sicherungsmaßnahmen.

Weiterführende Informationen zu den Verwertungskategorien sind im PFAS-Leitfaden des BUMV [R 5] detailliert aufgeführt.

Die maximal zulässigen Konzentrationen im W/F 2:1 Eluat für die entsprechenden Verwertungskategorien sind in den zwei nachfolgenden Tabellen aufgeführt.

Tabelle 2 Vorläufige maximal zulässige Konzentrationen im W/F 2:1 Eluat in µg/l für die entsprechende Verwertungskategorie (GFS-basierte Werte)

	VK 1	VK 2	VK 3
PFBA	≤ 10,0	≤ 20,0	≤ 50
PFHxA	≤ 6,0	≤ 12,0	≤ 30
PFOA	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
PFNA	≤ 0,06	≤ 0,12	≤ 0,6
PFBS	≤ 6,0	≤ 12,0	≤ 30
PFHxS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
PFOS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1

Tabelle 3 Vorläufige maximal zulässige Konzentrationen im W/F 2:1 Eluat in µg/l für die entsprechende Verwertungskategorie (GOW-basierte Werte)

	VK 1	VK 2	VK 3
PFPA	≤ 3,0	≤ 6,0	≤ 15
PFHpA	≤ 0,3	≤ 0,6	≤ 3
PFDA	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
PFHpS	≤ 0,3	≤ 0,6	≤ 3
H4PFOS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
PFOSA	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
Weitere PFAS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1

5 Übersicht über die bisher durchgeführten Arbeiten

Während der Jahre 2015 bis 2023 fanden in Mannheim Nord umfangreiche PFAS-Untersuchungen statt. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt und dienen der Übersicht. Die verwendeten Gutachten sind in Kapitel 2 aufgeführt. Die Ergebnisse in ihrer Gesamtheit sind im anschließenden Kapitel 6 detailliert beschrieben.

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit insbesondere zu den bereits vorgelegten Zwischenberichten sind nachfolgend die damals gültigen Bewertungen der belasteten Flächen beibehalten worden.

Tabelle 4 Übersicht über bisher durchgeführte Untersuchungen im Bereich Mannheim Nord

Untersuchung	Ziel / Maßnahme / Ergebnisse
Pedos GmbH: Untersuchung von fünf Ackerflächen [X 1]	Ziel der Untersuchung: Untersuchung zum Vorhandensein von Bodenbelastungen aus Papierfaserabfällen. Durchgeführte Maßnahmen: Oberbodenprobenahmen auf fünf Flächen in den Tiefenbereichen 0-30 cm und 30-60 cm. Untersuchung auf PFAS im Eluat und im Feststoff. Ergebnisse: Im Feststoff wurden Gehalte in der oberen Bodenschicht zwischen 25,4 µg/kg und 256 µg/kg und in der unteren Bodenschicht zwischen „nicht nachweisbar“ und 228 µg/kg analysiert. Im Eluat liegen die Konzentrationen zwischen 0,969 µg/l und 17,7 µg/l (0-30 cm Tiefe) und zwischen 1,18 µg/l und 64,03 µg/l (30-60 cm Tiefe).
Arcadis 2015: PFAS-Bodenuntersuchungen in Mannheim Nord – Orientierende Untersuchung [X 2]	Ziel der Untersuchung: Untersuchung von weiteren neun Ackerflächen und 14 Referenzflächen zum Ausschluss anderer

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

Eintragungspfade. Klärung der
Grundwasserbelastung.

Durchgeführte Maßnahmen:
Oberbodenprobenahmen je Fläche in den
Tiefenbereichen 0-30 cm und 30-60 cm.
Untersuchung auf PFAS im Eluat und im
Feststoff.
Grundwasseruntersuchungen an elf
Beregnungsbrunnen.

Ergebnisse:
Bei allen verdächtigen Ackerflächen wurde eine
PFAS-Belastung mit Überschreitung der QS
(Berechnung nach damals gültigem Erlass [R 4]
festgestellt. Die Referenzflächen wiesen bis auf
eine Ausnahme (Flächenbeaufschlagung vor/
oder nach 2006 bzw. 2008) keine Belastung auf.
Von elf Beregnungsbrunnen wurde bei vier PFAS
nachgewiesen. Die QS von eins wurde bei
keinem Brunnen überschritten.

Ziel der Untersuchung:
Untersuchung von Ackerschlägen mit
Kompostaufbringung während der Jahre 2006 bis
2008 auf PFAS-Belastungen.
Klärung der Grundwasserbelastung.

Arcadis 2016: PFAS-Untersuchungen in
Mannheim Nord, Orientierende Untersuchung
von nachgemeldeten Ackerschlägen, 1.
Zwischenbericht [X 3]

Durchgeführte Maßnahmen:
Oberbodenprobenahmen je Fläche in den
Tiefenbereichen 0-30 cm und 30-60 cm.
Untersuchung auf PFAS im Eluat und im
Feststoff.
Grundwasseruntersuchungen an 42
Beregnungsbrunnen.

Ergebnisse:

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

	Bei nahezu allen untersuchten Ackerflächen wurde eine PFAS- Belastung nachgewiesen. Der höchste Gesamtgehalt lag bei 178 µg/kg. Bei 24 der 42 Beregnungsbrunnen wurde PFAS in einer Konzentration von 0,001 µg/l bis maximal 16,3 µg/l nachgewiesen. Nach damals gültigem Erlass [R 4] überschritten 16 Beregnungsbrunnen die QS von 1 und wurden als belastet gewertet.
Arcadis 2016: PFAS-Untersuchungen in Mannheim Nord, Orientierende Untersuchung, Zweiter Zwischenbericht zur dritten Untersuchungskampagne [X 4].	Ziel der Untersuchung: Untersuchung von Ackerschlägen mit Kompostaufbringung, die während der vorhergehenden Kampagne nicht berücksichtigt werden konnten. Durchgeführte Maßnahmen: Oberbodenprobenahmen je Fläche in den Tiefenbereichen 0-30 cm und 30-60 cm. Untersuchung auf PFAS im Eluat und im Feststoff. Ergebnisse: Bei lediglich einem untersuchten Ackerschlag wird die QS von 1 nicht überschritten. Die anderen 14 Ackerschläge werden als belastet eingestuft.
Arcadis 2017: PFAS-Untersuchungen in Mannheim Nord, Orientierende Untersuchung, 3. Zwischenbericht zur vierten Untersuchungskampagne [X 5].	Ziel der Untersuchung: Untersuchung von Ackerschlägen mit Kompostaufbringungen vor 2006 und nach 2008. Rasterbeprobung von Ackerflächen, für die keine Kompostausbringung gemeldet wurden, welche allerdings im Zustrombereich von belasteten Beregnungsbrunnen liegen, für die keine korrespondierenden Belastungsflächen bekannt sind. Klärung der Grundwasserbelastung.

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

Durchgeführte Maßnahmen:

Oberbodenprobenahmen je Ackerfläche in den Tiefenbereichen 0-30 cm und 30-60 cm für Flächen mit bekannten Kompostausbringungen. Bei der Rasterbeprobung wurde nur der Tiefenbereich 0-30 cm entnommen. Untersuchung auf PFAS im Eluat und im Feststoff. Grundwasseruntersuchungen an 56 Beregnungsbrunnen.

Ergebnisse:

Von den untersuchten Ackerflächen mit bekannten Kompostaufbringungen wurden rund 42 %, als belastet mit einer QS von größer eins eingestuft. Bei der Beprobung der Rasterflächen wurden lediglich rund 3 Hektar der untersuchten 110 Hektar als gering belastet eingestuft. Rund 97 % der Flächen erwiesen sich als belastet, obwohl für diese Flächen keine Kompostaufbringungen gemeldet wurden. Es wurden an 54 von 56 untersuchten Beregnungsbrunnen PFAS- Konzentrationen zwischen 0,003 µg/l und 19,097 µg/l analytisch bestimmt. Nach damals gültigem Erlass [R 4] überschritten 16 Beregnungsbrunnen die QS von 1 und wurden als belastet gewertet.

Arcadis 2017: Kurzbericht: Untersuchungen im Bereich der Landesgrenze zu Hessen [X 6].

Ziel der Untersuchung:

Weiterführende Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit mit dem Schwerpunkt nördliche Landesgrenze zu Hessen. Es war zu ermitteln, ob die Grundwasserverunreinigungen des Gebietes Mannheim Nord auch bis in hessisches Landesgebiet reichen.

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

Maßnahmen:

Grundwasserprobenahme an sechs Grundwassermessstellen in der Nähe der hessischen Landesgrenze. Analyse der Proben auf PFAS.

Ergebnisse:

Bei vier der sechs untersuchten Grundwassermessstellen wurden PFAS bestimmt. Die Konzentrationen liegen zwischen 0,005 µg/l und 0,17 µg/l. Es sind vorwiegend kurzkettige PFAS und weitergehend auch die gleichen Hauptschadstoffparameter vorhanden, die auch bei den Untersuchungen der Beregnungsbrunnen auf Mannheimer Gemarkung analysiert wurden. Zum Untersuchungszeitpunkt liegt noch keine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vor, es muss allerdings nach den Erkenntnissen der bisherigen Untersuchungen mit einer weiteren Verschlechterung der Grundwasserqualität gerechnet werden.

Arcadis 2018: PFAS- Untersuchungen in Mannheim Nord, Orientierende Untersuchung – Untersuchung von 12 Verdachtsflächen sowie Untersuchungen des Kompostwerks und der Coleman- Kaserne, 4. Bericht zur fünften Untersuchungskampagne [X 7].

Ziel der Untersuchung:

Bei zwölf ausgewählten Ackerschlägen mit hohen PFAS- Belastungen wurden detaillierte Untersuchungen durchgeführt um für dieses Flächen das Beweisniveau einer Orientierenden Untersuchung zu Erreichen. Die weiterführenden Untersuchungen auf dem Gelände des Erdenwerks Mannheim und der Coleman-Kaserne wurden in der ebenfalls durchzuführenden Verursacheranalyse betrachten.

Maßnahme:

Auf jedem der zwölf Ackerschläge wurde eine

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

RKS- Linerbohrung bis zur Tiefe von 4 m unter GOK abgeteuft. Es wurden schicht- bzw. meterweise Proben entnommen und auf PFAS untersucht. Im An- und Abstrom der jeweiligen Fläche wurde eine temporäre Grundwasserhilfsmessstelle errichtet. Aus dieser wurden Grundwasserproben entnommen und auf PFAS analysiert. Im Randbereich der Coleman-Kaserne wurden Oberbodenproben entnommen, um Hinweise auf mögliche Löschschaumverwehungen zu erhalten. Hierbei wurden ebenfalls Grundwasserproben auf PFAS analysiert. Auf dem Gelände des Erdenwerks Mannheim wurden mehrere Rammkernsondierungen durchgeführt sowie mehrere temporäre Grundwasserhilfsmessstellen errichtet. Die erhaltenen Boden- und Grundwasserproben wurden auf PFAS untersucht.

Ergebnisse:

Bei acht der zwölf untersuchten Ackerschläge zeigt sich, dass die PFAS in der Schluffschicht der ungesättigten Bodenzone noch weitgehend zurückgehalten werden und es daher aktuell nur zu einem sehr geringen Sickerwasseraustrag kommt. Eine durchgeführte Sickerwasserprognose prognostiziert eine zukünftige Überschreitung der QS von 1 am Ort der Beurteilung. Bei vier Ackerflächen hat der Sickerwasseraustrag bereits jetzt eine Grundwasserverunreinigung verursacht. Im Rahmen der Verursacheranalyse wurde festgestellt, dass die vorliegenden Untersuchungsergebnisse darauf schließen lassen, dass die PFAS-Belastung durch das Aufbringen von PFAS-haltigen

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

	Papierfaserabfällen/ Kompostgemischen verursacht wurde. Andere mögliche Ursachen (bspw. ein Austrag aus der Coleman Kaserne) haben sich als nicht maßgeblich herausgestellt.
CVUA Freiburg 2019: ; Untersuchung einer Probe „Aal aus Wilhelmswörthweiher“ [X 11]	Ziel der Maßnahme: Überprüfung einer Akkumulation von PFAS im Fischkörpern des Wilhelmswörthweihers zum Zweck der Lebensmittelüberwachung Maßnahmen: Entnahme einer Fischprobe aus dem Wilhelmswörthweiher und chemische Untersuchung auf PFAS Ergebnisse: Es wurden Gehalte an PFDA und PFOS ermittelt. Insbesondere die Gehalte an PFOS überschreiten, bereits beim Verzehr einer geringen Menge des untersuchten Fisches, die tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge für PFOS.
Arcadis 2019: PFAS Untersuchungen Mannheim Nord, Orientierende Untersuchungen – Kurzstellungnahme zur Belastungssituation der 2019 untersuchten Teilflächen I – III, [X 8]	Ziel der Maßnahme: Flächendeckende Untersuchung der Oberböden in den Untersuchungsbereichen I bis III zur Identifikation sämtlicher belasteter Ackerflächen. Maßnahmen: Oberbodenprobenahmen bis in die Tiefe von 0,6 m. PFAS-Analyse der Bodenproben des ersten Tiefenhorizonts (0 – 0,3 m). Teilweise Analyse der Bodenproben des zweiten Tiefenhorizonts zur Abklärung einer Tiefenverlagerung. Ergebnisse:

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

	Von rund 230 Hektar beprobter Fläche sind rd. 143 Hektar mit einer QS von größer 1 als belastet und rund 53 Hektar als gering belastet (QS kleiner 1) eingestuft. Bei nur 35 Hektar konnten analytisch keine PFAS im Eluat bestimmt werden. Diese rund 15 % sind daher als nicht belastet eingestuft. Die maximal vorgefundene Eluatkonzentration beträgt 31,24 µg/l, woraus sich eine maximale Quotientensumme von 259,7 ergibt.
Arcadis 2021: PFAS Untersuchungen Mannheim Nord, Orientierende Untersuchungen – Kurzstellungnahme zur Belastungssituation der 2020 und 2021 untersuchten Teilflächen IV - VI, [[X 9]	Ziel der Maßnahme: Flächendeckende Untersuchung der Oberböden in den Untersuchungsbereichen IV bis VI zur Identifikation sämtlicher belasteter Ackerflächen. Maßnahmen: Oberbodenprobenahmen bis in die Tiefe von 0,6 m. PFAS Analyse der Bodenproben des ersten Tiefenhorizonts (0 – 0,3 m). Teilweise Analyse der Bodenproben des zweiten Tiefenhorizonts zur Abklärung einer Tiefenverlagerung. Ergebnisse: Von rund 355 Hektar beprobter Fläche sind rd. 146 Hektar mit einer QS von größer 1 als belastet und rund 107 Hektar als gering belastet (QS kleiner 1) eingestuft. Bei rd. 102 Hektar konnten analytisch keine PFAS im Eluat bestimmt werden. Diese rund 29 % sind daher als nicht belastet eingestuft. Die maximal vorgefundene Eluatkonzentration beträgt 32,91 µg/l, woraus sich eine maximale Quotientensumme von 238,2 ergibt
Arcadis 2022: PFAS Untersuchungen Mannheim Nord, Orientierende Untersuchungen – Kurzstellungnahme zur Belastungssituation der	Ziel der Maßnahme: Flächendeckende Untersuchung der Oberböden

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

2021 und 2022 untersuchten Teilflächen VII und VIII, [X 10].

in den Untersuchungsbereichen VII und VIII zur Identifikation sämtlicher belasteter Ackerflächen.

Maßnahmen:

Oberbodenprobenahmen bis in die Tiefe von 0,6 m. PFAS-Analyse der Bodenproben des ersten Tiefenhorizonts (0 – 0,3 m). Teilweise Analyse der Bodenproben des zweiten Tiefenhorizonts zur Abklärung einer Tiefenverlagerung.

Ergebnisse:

Von rund 450 Hektar beprobter Fläche sind rd. 39 Hektar mit einer QS von größer 1 als belastet und rund 145 Hektar als gering belastet (QS kleiner 1) eingestuft. Bei rd. 266 Hektar konnten analytisch keine PFAS im Eluat bestimmt werden. Diese rund 59 % sind daher als nicht belastet eingestuft. Die maximal vorgefundene Eluatkonzentration beträgt 47,6 µg/l, woraus sich eine maximale Quotientensumme von 7,21 ergibt

Ziel der Maßnahme:

Wiederkehrende (teilweise seit 2015) GW-Beprobung von insgesamt zwölf Eigenwasserversorgern im Untersuchungsgebiet.

Maßnahme:

Entnahme von Grundwasserproben und Analyse auf PFAS.

Untersuchung von Eigenwasserversorgern (EWW) [X 14].

Ergebnisse:

Bei sechs der zwölf untersuchten EWW konnten keine PFAS größer der BG ermittelt werden. Bei den übrigen Proben der EWW sind Konzentrationen zwischen 0,02 µg/l und 8,249 µg/l vorhanden. Nur bei einer EWW ist die QS von 1 in den letzten Jahren (mehrmals) überschritten worden.

Untersuchung

Ziel / Maßnahme / Ergebnisse

GW-Überwachung der Stadt Mannheim:
Gartenbrunnen bzw. GWMS [X 15].

Ziel der Maßnahme:

Ergänzende Untersuchung von elf
Gartenbrunnen bzw. GWMS in ausgewählten
Untersuchungsbereichen. Ermittlung der
Grundwasserbelastung in
Untersuchungsbereichen ohne
Grundwasseruntersuchungen.

Maßnahmen:

Entnahme von Grundwasserproben und Analyse
auf PFAS.

Ergebnisse:

In allen elf untersuchten Grundwasserbrunnen
konnten PFAS bestimmt werden. Die analysierten
Konzentrationen liegen zwischen 0,007 µg/l und
0,195 µg/l. Von den elf untersuchten Proben
überschreitet nur eine Probe die QS von 1 knapp
mit einem Wert von 1,1.

6 Darstellung der Ergebnisse sämtlicher durchgeführter Untersuchungen

Das Standard-Untersuchungsprogramm der PFAS umfasste, soweit im folgenden Text nicht anders erwähnt, die Parameter:

- PFBA
- PFPeA
- PFHxA
- PFHpA
- PFOA
- PFNA
- PFDA
- PFUnDA
- PFDoDA

- PFBS
- PFPeS
- PFHxS
- PFHpS
- PFOS
- PFDS
- PFOSA
- HPFHpA
- H2PFDA
- H4PFUnA
- H4PFOS

6.1 Jährliche Beprobung der Beregnungsbrunnen (Grundwasseruntersuchungen)

Schon im Jahr 2015 bestand der Verdacht einer nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit. Es wurde eine systematische Beprobung von Beregnungsbrunnen im Abstrom bekannter Belastungsbereiche veranlasst.

In den Folgejahren fanden Beprobungen in allen 56 nutzbaren Beregnungsbrunnen und Analysen des Grundwassers auf PFAS statt. Die Ergebnisse sind in Anlage 1.1.1 dargestellt.

In der nachfolgenden Abbildung 4 ist als grobe Übersicht die Gesamtsumme der analysierten PFAS abgebildet. Jeder Punkt steht dabei für eine Grundwasserprobe eines Beregnungsbrunnens. Im Verlauf der Jahre zeigt sich, dass ein Großteil der analysierten Proben auf einem ungefähr gleichen Konzentrationsniveau zwischen 0 und rund 5 µg/l liegt.

Bei einzelnen Brunnen steigt die Konzentration jedoch deutlich an. Brunnen 9- 2 zeigte dabei in den letzten drei Beprobungsjahren immer die höchsten PFAS-Konzentrationen aller gemessener Brunnen. Die maximal ermittelte PFAS-Konzentration im Grundwasser beträgt 33,4 µg/l.

Als Hauptschadstoffparameter treten im Grundwasser PFHxA, PFPeA sowie in deutlich geringeren Konzentrationen PFHpA und PFBA auf.

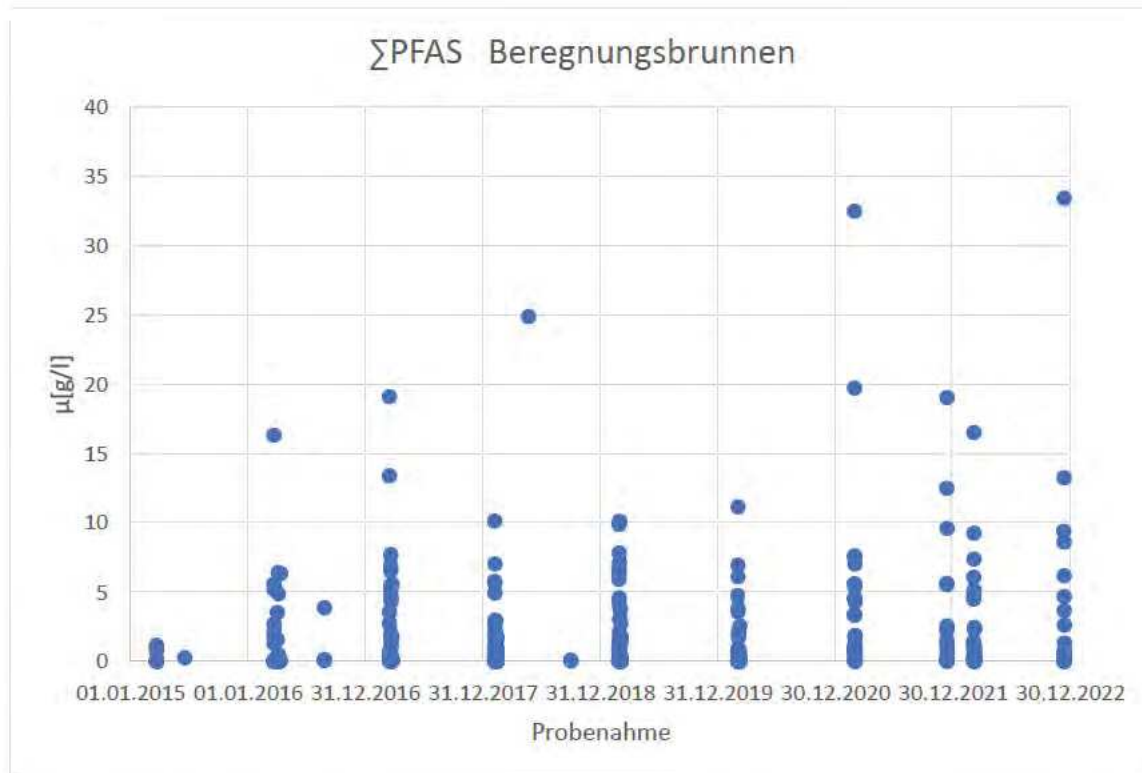


Abbildung 4 Entwicklung der Gesamt-PFAS-Konzentrationen in Beregnungsbrunnen. Jeder beprobte Brunnen ist durch einen Punkt dargestellt. Die Anzahl der beprobten Brunnen variiert pro Jahr.

Der Verlauf der Konzentrationsentwicklung im Brunnen 9-2 ist in Abbildung 5 dargestellt. Seit dem Jahr 2020 sind steigende PFAS-Konzentrationen erkennbar.

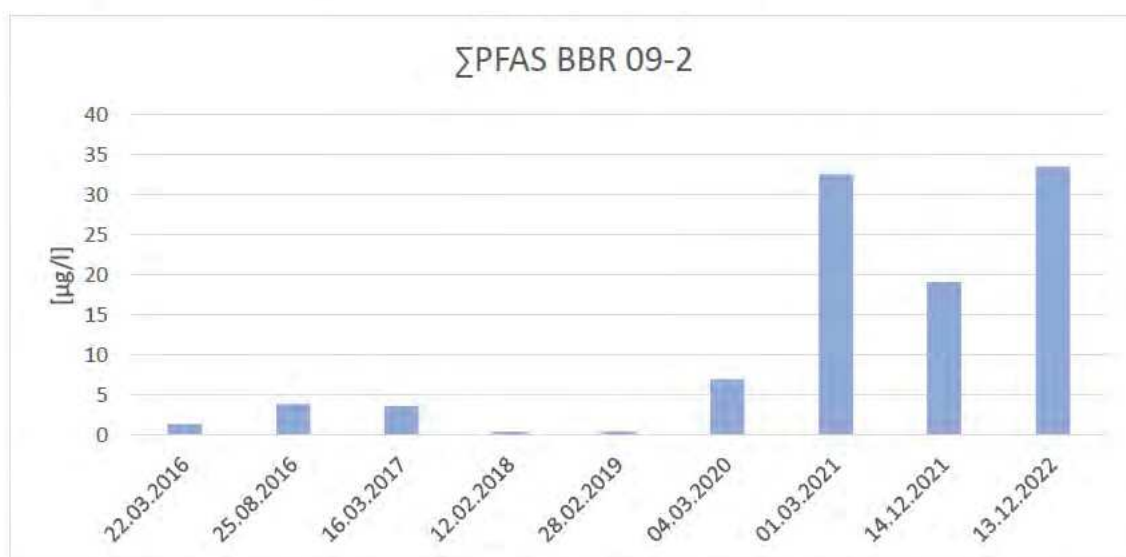


Abbildung 5 Entwicklung der PFAS-Konzentrationen in BBR 9-2

In der nachfolgenden Abbildung 6 ist die Entwicklung der PFAS-Gesamtkonzentration in allen Beregnungsbrunnen dargestellt, die 10 µg/l PFAS überschreitet. Hierzu zählen neben

dem bereits erwähnten Brunnen 9.-2 die Brunnen 1, 11-1, 12-1 und mit einer einmaligen Überschreitung von 10 µg/l auch der Brunnen 21.

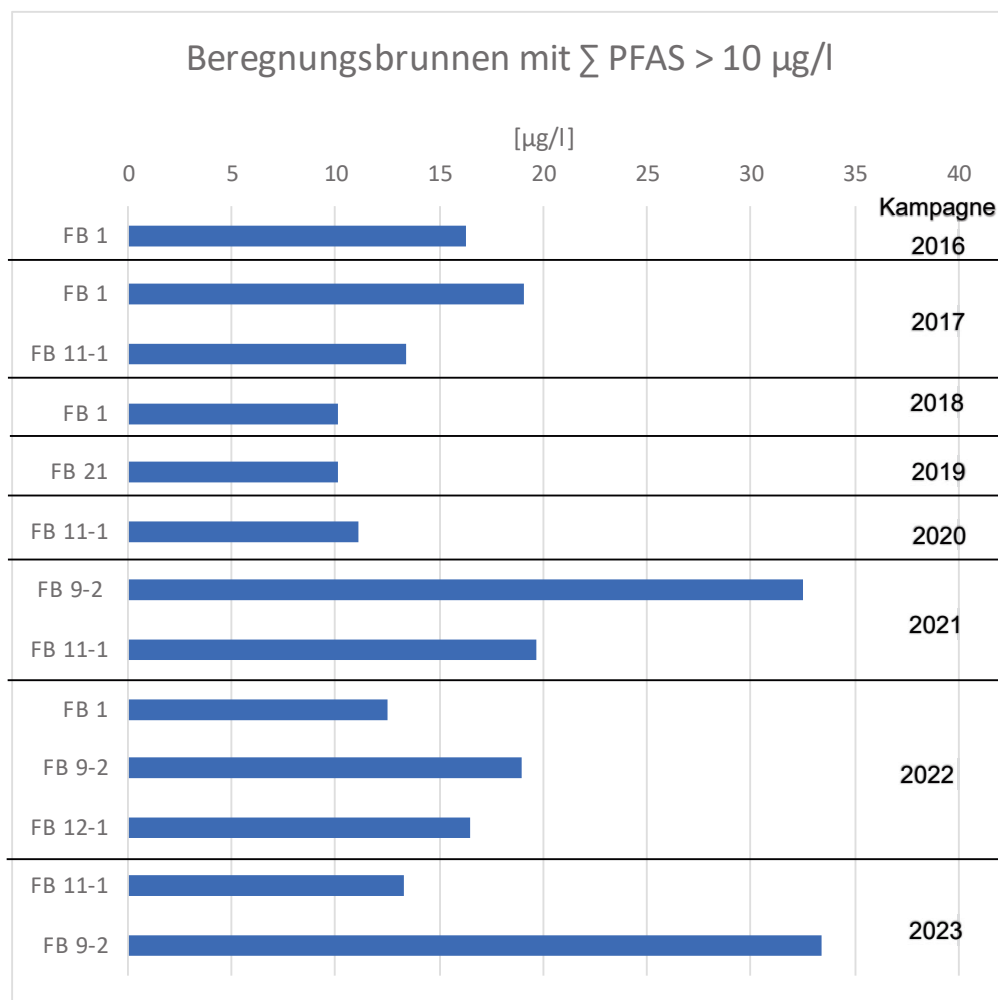


Abbildung 6 Entwicklung der PFAS-Konzentrationen größer 10 µg/l PFAS in Beregnungsbrunnen

Bis auf Brunnen 9-2 lässt sich kein deutlich ansteigender Trend in der Konzentrationsentwicklung ableiten.

6.2 Abgrenzung der Grundwasserverunreinigungen nach Norden (Landesgrenze zu Hessen)

Im Jahr 2017 fanden weiterführende Untersuchungen zur Abgrenzung der Grundwasserverunreinigungen nach Norden statt. Ziel war es, zu prüfen, ob möglicherweise Grundwasserbelastungen über die Landesgrenze hinaus vorhanden sind.

Bei der Untersuchung von sechs Messstellen (siehe Abbildung 7) waren in vier Messstellen PFAS bestimmbar. Die Konzentrationen lagen zwischen 0,005 µg/l und 0,17 µg/l.

Die Schadstoffverteilung entspricht der, die auch bei den Untersuchungen der Beregnungsbrunnen auf Mannheimer Gemarkung analysiert wurde.

Es lag zum Zeitpunkt der Probenahme keine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vor. Die vollständigen Ergebnisse sind im Bericht [X 6] beschrieben.



Abbildung 7 Eingrenzung der Grundwasserbelastungen nach Norden (Landesgrenze zu Hessen) aus [X 6]

6.3 Bodenuntersuchungen im Pflughorizont

Mit Abschluss der Bodenuntersuchungen im Jahr 2023 sind sämtlich ackerbaulich genutzten Flächen im Bereich Mannheim-Nord vollständig untersucht.

Das Belastungsbild ist in den Anlagen 1.2.2 bis 1.2.8 dargestellt.

Es wurde eine Fläche von insgesamt 1.381,6 ha untersucht. Auf 395,9 ha sind im Bodeneluat keine PFAS größer der Bestimmungsgrenze analysierbar. Auf den restlichen 985,7 ha können PFAS im Bodeneluat bestimmt werden. Die analysierten PFAS-Konzentrationen reichen von 0,01 µg/l bis 32,91 µg/l.

Für einen Teil der Flächen sind Feststoffanalysen vorhanden. Die Gesamtgehalte, größer der Bestimmungsgrenze, bewegen sich in einem Bereich von 5 µg/kg bis 255,6 µg/kg. Die Feststoffgehalte wurden zu Beginn der flächendeckenden Untersuchungen parallel zu den Eluatuntersuchungen durchgeführt. Für die Bodenproben ab dem Jahr 2019 existieren ausschließlich Analysen aus Bodeneluaten.

Hauptschadstoffparameter im Eluat ist PFOA. Mit etwas geringeren Eluatkonzentrationen folgen PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA (siehe auch Tabelle 6).

Die Schadstoffquelle liegt innerhalb des Pflughorizontes (0 bis 0,6 m u. GOK) und bei einem Großteil der Flächen in der Tiefe 0,0 bis 0,3 m u. GOK.

Die Ergebnisse der Oberbodenuntersuchungen sind in den Karten der Anlage 1.2 umfassend dargestellt.

In der nachfolgenden Abbildung 8 ist die Verteilung der PFAS-Einzelsubstanzen mit ihrer minimalen, maximalen und mittleren Konzentration (Median) und dem jeweiligen oberen und unterem Quartil aufgetragen. Im Diagramm sind nur die analytisch bestimmten Einzelparameter dargestellt.

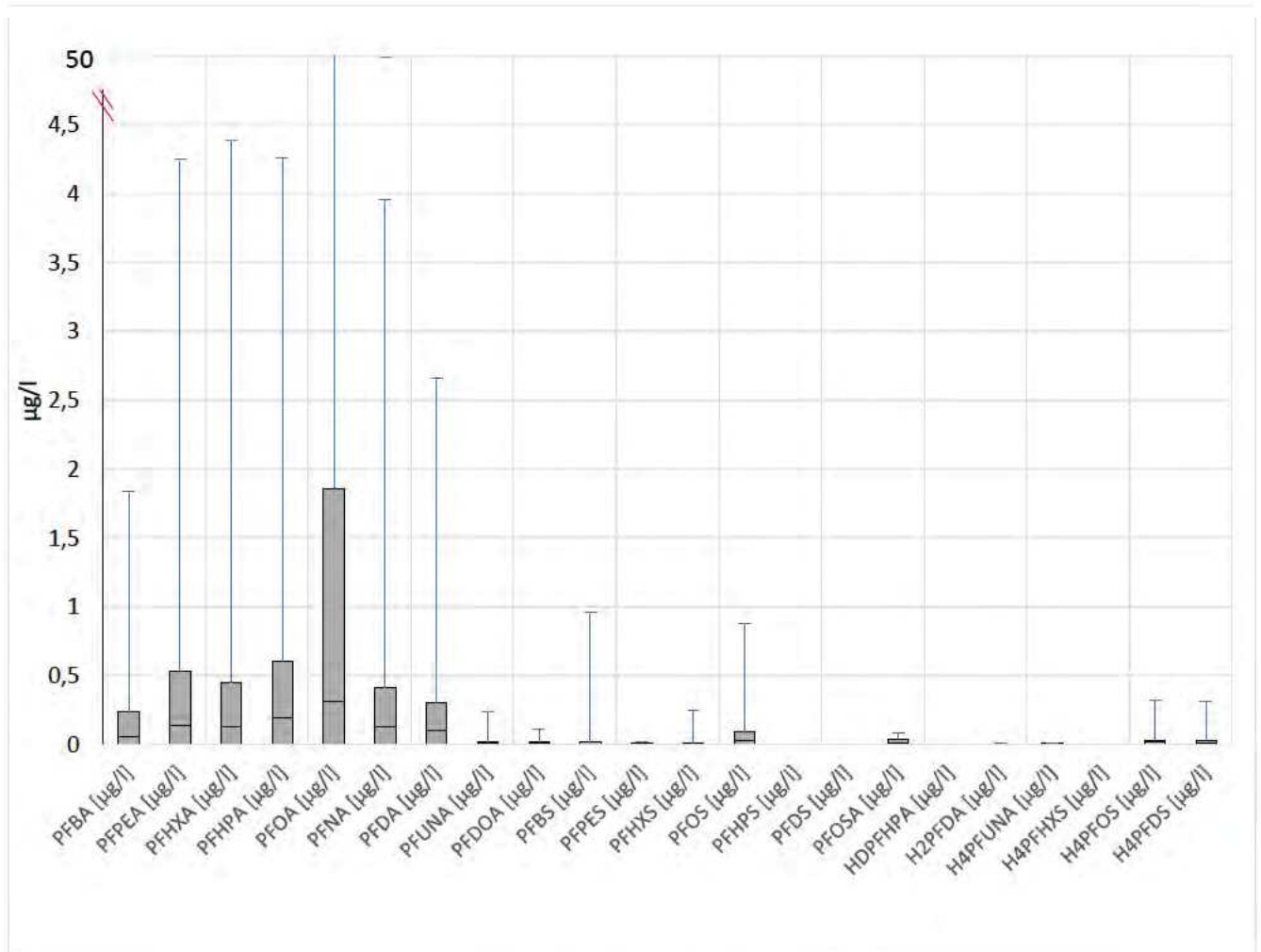


Abbildung 8 Verteilung der PFAS-Einzelsubstanzen im Bodeneluat [µg/l] (Berechnung nur mit Werten oberhalb der analytischen BG; Boxplot-Darstellung: graues Kästchen gibt oberes und unteres Quartil an, Strich in der Mitte ist der Median)

6.4 Rammkernsondierungen zur Erkundung der Tiefenverlagerung

In mehreren Untersuchungskampagnen zwischen den Jahren 2016 und 2018 wurden bei exemplarisch ausgewählten Ackerflächen Kleinrammkernbohrungen mit Inlinern (Linerbohrungen) durchgeführt. Teilweise wurden anschließend in den Kleinrammkernbohrungen auch temporäre Grundwasserhilfsmessstellen („Rammpegel“) hergestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Hauptschadstoffbelastungen innerhalb des Pflughorizontes liegt. Teilweise auch in der direkt darunter folgenden Schicht bei einem höheren Anteil organischer Substanz. In den darunter folgenden Sanden und Kiesen lag der PFAS-Gehalt im Boden unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (5 µg/kg).

Im Bodeneluat sind die PFAS bis in deutlich tiefere Bodenschichten bestimmbar und reichen teilweise bis in den grundwassergesättigten Bereich. Hier ist der Sickerwasserweg von leichter mobilisierbaren PFAS in das Grundwasser analytisch nachgewiesen. Die PFAS sind auch in den Grundwasserproben der temporären Grundwasserhilfsmessstellen bestimmbar.

Die vollständigen Ergebnisse sind im Bericht [X 5] beschrieben.

6.5 EOF- und Precursor-Untersuchungen

Sowohl durch ein Forschungsprojekt des TZW Karlsruhe wie auch durch Untersuchungen im Rahmen der Orientierenden Untersuchung wurden mehrere Bodenproben verschiedener Ackerflächen auf die Parameter EOF (im Feststoff enthaltenes organisch gebundenes Fluor) untersucht. Bei den durchgeführten Analysen wurde ein Anteil von nicht in einer Einzelanalyse aufschlüsselbaren fluorierten organischen Stoffen von rund 75 – 90 % ermittelt.

Di-PAP Verbindungen (Fluortelomerphosphatdiester) konnten ebenfalls in mehreren Proben mit Gehalten von 9 µg/kg bis 84 µg/kg bestimmt werden. Bei den di-PAP-Verbindungen handelt es sich um polyfluorierte Verbindungen, die aufgrund ihrer amphiphilen Eigenschaften als fettabweisendes Beschichtungsmaterial von Papieren in der Papierindustrie Anwendung finden. Di-PAP-Verbindungen können als Precursor (Vorläuferverbindungen) durch mikrobielle Transformation in natürlichen Umweltmedien

(Boden/Grundwasser) zu Perfluorcarbonsäuren transformiert werden. Die vollständigen Ergebnisse sind im Bericht [X 7] beschrieben.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

6.7 Coleman Kaserne

Das an die Ackerflächen im Mannheimer Norden angrenzende Kasernengelände der Coleman Kaserne wurde untersucht, um mögliche PFAS-Beeinflussungen des zuströmenden Grundwassers aus AFFF-Löschschaumeinsätzen identifizieren zu können.

Es wurde eine temporäre Grundwassermessstelle im Abstrombereich der Colman-Kaserne errichtet und Grundwasserproben entnommen. Ebenfalls wurden zwei Regenrückhaltebecken untersucht. Um Bodenverunreinigungen durch Verwehungen von PFAS-belastetem Löschaum auf Ackerflächen ausschließen zu können, fanden im Randbereich der Coleman-Kaserne Bodenprobenahmen statt.

Bei den Bodenproben sind im Feststoff keine PFAS oberhalb der Bestimmungsgrenze vorhanden. Die im Bodeneluat analysierten PFAS-Gesamtkonzentrationen sind deutlich geringer als bei den meisten Ackerflächen.

In den Grundwasserproben bzw. den Tanks der Regenrückhaltebecken waren, wenn überhaupt nur sehr geringe PFAS-Konzentrationen messbar. Die vollständigen Ergebnisse können sind im Bericht [X 7] beschreiben.

Auf dem Gelände der Coleman Kaserne sowie in dessen direkten Umfeld finden weitere Untersuchungen auf PFAS statt.

Insgesamt wurde festgestellt, dass sich die Verteilung der PFAS deutlich von der Verteilung auf den Ackerflächen unterscheidet und die Belastungen daher auf andere Ursachen (vmtl. Löschaume) rückführen lassen.

6.8 Fischproben aus dem Wilhelmswörtweiher

Die Stadt Mannheim, Fachbereich Sicherheit und Ordnung, Verbraucherschutz entnahm im Juli 2019 eine Fischprobe aus dem Wilhelmswörtweiher in Mannheim Sandhofen und ließ diese durch das CVUA Freiburg auf PFAS untersuchen. In der Probe waren PFDA und PFOS enthalten. Laut CVUA liegt der für PFDA ermittelte Wert von 2,3 µg/kg oberhalb des Beurteilungswertes des Erlasses vom 12.07.2018 des Ministeriums für Ländlichen Raum.

Der PFOS-Gehalt (58 µg/kg) wurde durch das Labor CVUA so eingeordnet, dass die von der EFSA veröffentlichte tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI) von 0,013 µg pro kg Körpergewicht pro Woche bei einem Verzehr von 16 g Fisch erreicht würde (siehe [X 11]).

6.9 Untersuchung von Eigenwasserversorgern

Die Stadt Mannheim führt seit 2015 wiederkehrende Untersuchungen von Eigenwasserversorgern (EWV) in Mannheim Nord auf den Schadstoff PFAS im Grundwasser durch (vgl. [X 14]). Hierbei wurden insgesamt zwölf Entnahmestellen teilweise mehrfach beprobt. Bei sechs der untersuchten EWV konnten keine PFAS größer der Bestimmungsgrenze analysiert werden. Bei den übrigen Proben sind Konzentrationen zwischen 0,02 µg/l und 8,249 µg/l vorhanden. Nur bei einer EWV ist die QS von 1 in den letzten Jahren (mehrmals) überschritten worden, hier wurde eine entsprechende Nutzungsbeschränkung ausgesprochen. Bei einer weiteren EWV wurden die GFS-Werte von PFPeA und PFHpA im Jahr 2023 überschritten. Da lediglich Einzelwerte in tolerierbarer Höhe überschritten und die Trinkwasserleitwerte eingehalten wurden, war bisher eine Erteilung von Nutzungseinschränkungen durch die Stadt Mannheim nicht erforderlich.

Der Konzentrationsverlauf der EWV mit Überschreitung der QS sowie der EWV mit erstmaliger Überschreitung einzelner Grenzwerte ist in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

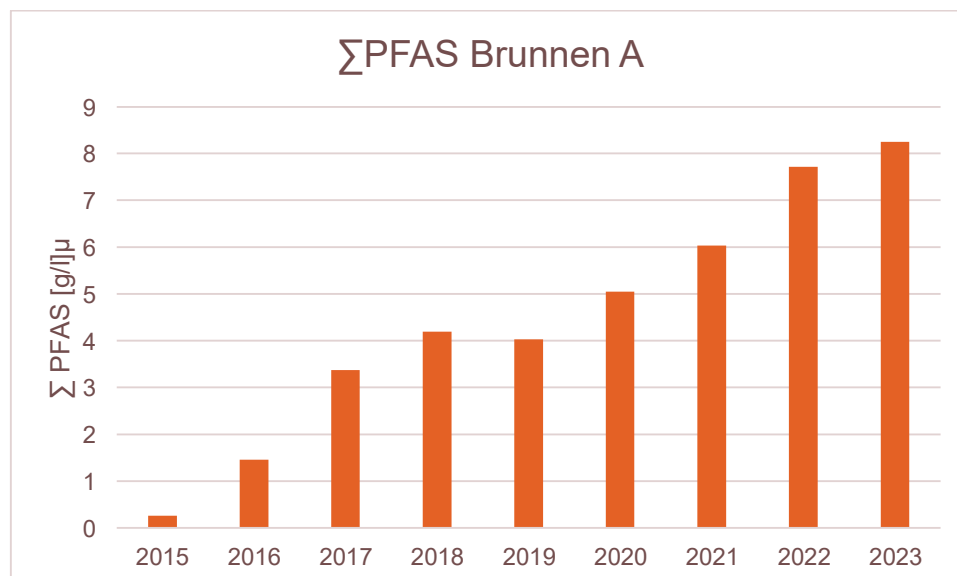


Abbildung 11: Darstellung der PFAS-Gesamtkonzentration im Brunnen A.

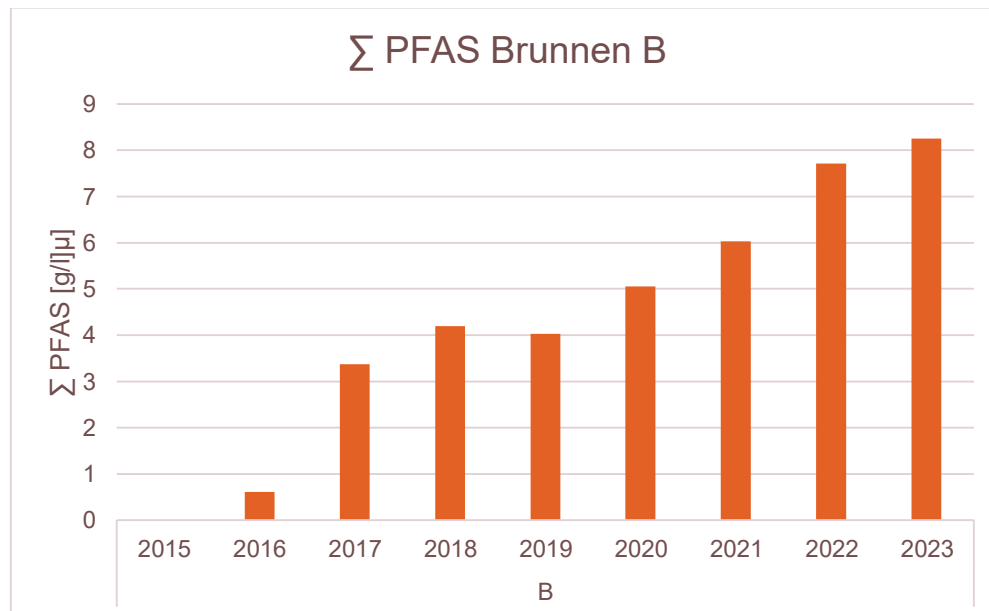


Abbildung 12 Darstellung der PFAS-Gesamtkonzentration im Brunnen B.

Bei Brunnen A und B und zeigen sich kontinuierliche Zunahmen der Konzentrationen.

6.10 Grundwasserüberwachung der Stadt Mannheim

Untersuchung von Gartenbrunnen und im Landesmessnetz

Durch die Stadt Mannheim wurden im ersten Halbjahr 2023 an elf ausgewählte Gartenbrunnen auf PFAS untersucht (vgl. [X 15]). Diese Gartenbrunnen befinden sich in Untersuchungsbereichen, die nicht durch die jährlichen Beprobungen der Beregnungsbrunnen abgedeckt sind. Hierbei waren in allen elf Grundwasserbrunnen PFAS analytisch bestimmbar. Die PFAS-Gesamtkonzentrationen liegen zwischen 0,007 µg/l und 0,915 µg/l. Von den elf untersuchten Proben überschreitet nur eine Probe die QS von 1 knapp mit einem Wert von 1,1. In dem nachfolgenden Schaubild sind die PFAS-Konzentrationen der elf untersuchten Gartenbrunnen dargestellt.

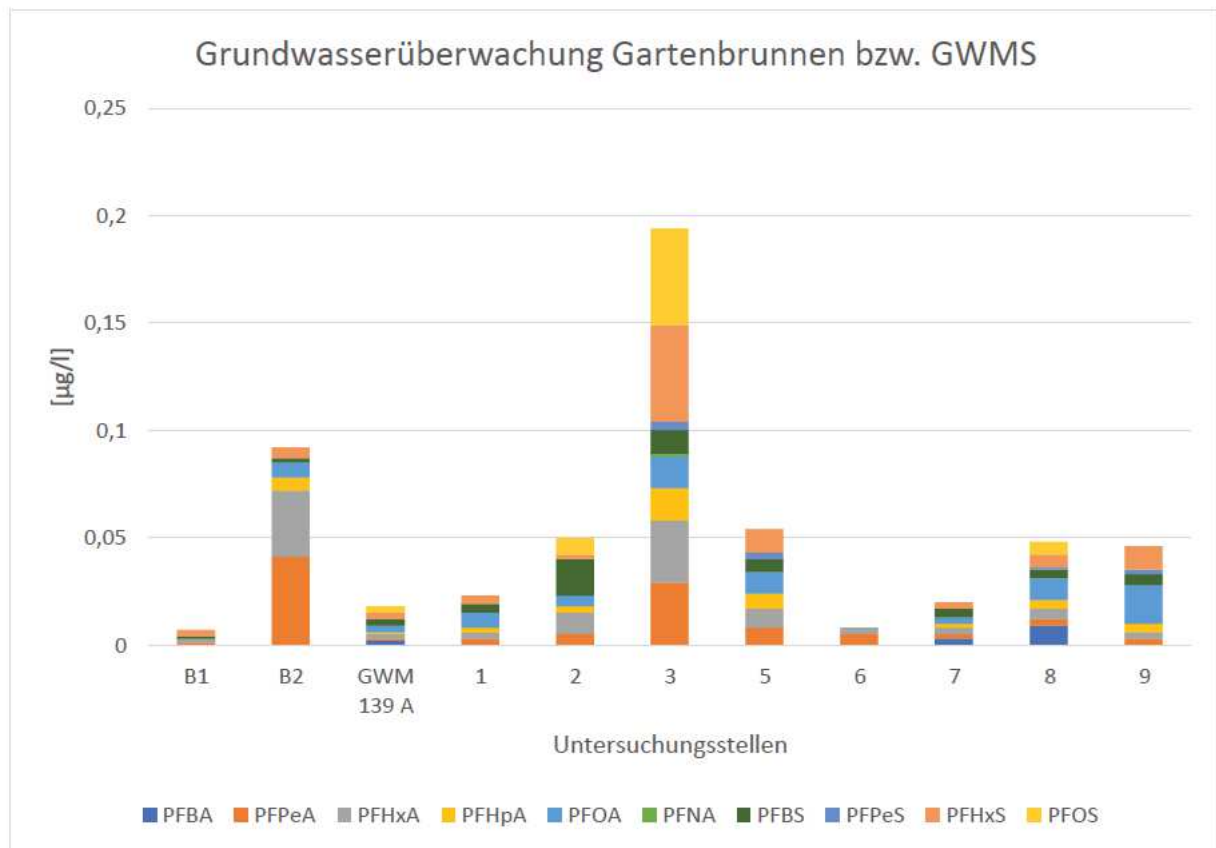


Abbildung 13 Grundwasserüberwachung Gartenbrunnen (es werden nur PFAS größer der BG dargestellt).

Der Großteil der untersuchten Grundwasserproben weisen eine PFAS-Gesamtkonzentration von kleiner 0,05 µg/l auf. Nur die Probenahmestelle B2 sowie 3 zeigen deutlich höhere PFAS-Konzentrationen. Bei dieser Messstelle ist PFOS mit 0,045 µg/l bestimmt worden. PFOS werden ansonsten nur noch an drei weiteren Messstellen (GWM 139A, 2 und 8) in deutlich geringeren Konzentrationen bestimmt (0,003 µg/l, 0,008 µg/l und 0,006 µg/l).

Ebenso wurden in der Vergangenheit sieben im Untersuchungsgebiet vorhandene Grundwassermessstellen durch das Landesmessnetz der LUBW auf PFAS untersucht. Hierbei wurden bei zwei GWM keine PFAS Werte größer der Bestimmungsgrenze analysiert. Bei drei weiteren GWM sind PFAS-Gesamtkonzentrationen von 0,002 – 0,007 µg/l und damit nur knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze vorhanden. Zwei weitere GWM zeigen eine deutlich höhere Belastung an PFAS mit den höchsten gemessenen PFAS-Gesamtkonzentration von 0,194 µg/l bzw. 0,735 µg/l. Die Messstelle mit der niedrigeren Konzentration wird bereits regelmäßig bei den Untersuchungen der Beregnungsbrunnen mit ähnlichen Konzentrationen untersucht.

7 Grundwassermodell

7.1 Hydrogeologischer Rahmen

Das Untersuchungsgebiet liegt nördlich der Stadt Mannheim und nahe zum Rhein größtenteils im Bereich der Rheinaue. Das Gebiet ist durch den ursprünglichen Rheinlauf mit mehreren Mäandern und vielen kleinen Nebenflüssen geprägt.

Die quartäre Grabenfüllung ist durch mächtige fluviatile Ablagerungen gekennzeichnet (siehe Kapitel 3).

7.2 Aufbau des Grundwassermodells

Für die Modellierung der Grundwasserströmung wurde das Programm FEFLOW eingesetzt. Das 4-Schichtige 3D-Modell simuliert die Grundwasserströmung im Oberen Grundwasserleiter und ist stationär auf die mittleren Grundwasserverhältnisse des Zeitraums 2016 bis 2021 kalibriert. Die Lage des Modellgebietes ist in der Anlage 2 dargestellt.

Die mittlere Höhenlage und die Mächtigkeiten der Modellschichten, die Bodenarten und die Durchlässigkeitsbeiwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 5 zusammenfassend beschrieben. Die Modellschichten 3-5 repräsentieren den Oberen Grundwasserleiter (OGWL).

Die Ränder des Grundwassermodells durchschneiden den jungquartären Porengrundwasserleiter. Die Grundwasserhöhe des westlichen Feststrandpotentials wurde anhand des mittleren Grundwasserstands des Rheins festgelegt. Die übrigen Ränder wurden als Festpotentialränder definiert. Die Aquiferbasis des, den OGWL unterlagernden gering durchlässigen OZH wurde vereinfachend als undurchlässiger Rand modelliert.

Tabelle 5 Aufbau der Modellschichten im Grundwassermodell (aus [X 12])

Schicht	Schicht	Höhenlage Oberfläche [m NN]	Mächtigkeit, [m]	Durchlässig- keitsbeiwert [m/s]	Bodenart	Geologie Bemerkungen
1	Mutterboden	86 – 96	0.2 m – 0,5 m	Variiert		Mutterboden/ Auffüllungen
2	Oberfläche Schluffschicht (wo existent)	85 – 95	2 m	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$	Schluff- Feinsand	Auenlehm/Deck schichten
3	Oberfläche des Oberen Grundwasser Leiters (OGWL)	83 – 93	11 m	$3 \cdot 10^{-4c} - 1 \cdot 10^{-5}$	Feinsand- Kiessand	OGWL
4	Mitte des OGWL	72 – 90	8 m	$3 \cdot 10^{-4}$	Feinsand- Kiessand	OGWL
5	Boden des OGWL	64 – 74				OGWL

Die hydraulische Durchlässigkeit und die Nutzporosität der jeweiligen Modellschichten wurden aus der Hydrogeologische Kartierung [X 12] übernommen und im Zuge der Eichung angepasst. Das Grundwassermodell wurde stationär auf mittlere Grundwasserverhältnisse geeicht.

7.3 Grundwasserfließmodell

Die Ergebnisse der Berechnungen der Linien gleichen Grundwasserstands sind in nachfolgender Abbildung 14 ersichtlich (Linien in grauer Farbe). Die berechnete Grundwasserströmung des Modellgebietes ist zusätzlich in den Anlagen 1.1.1 sowie 1.2.6 dargestellt.

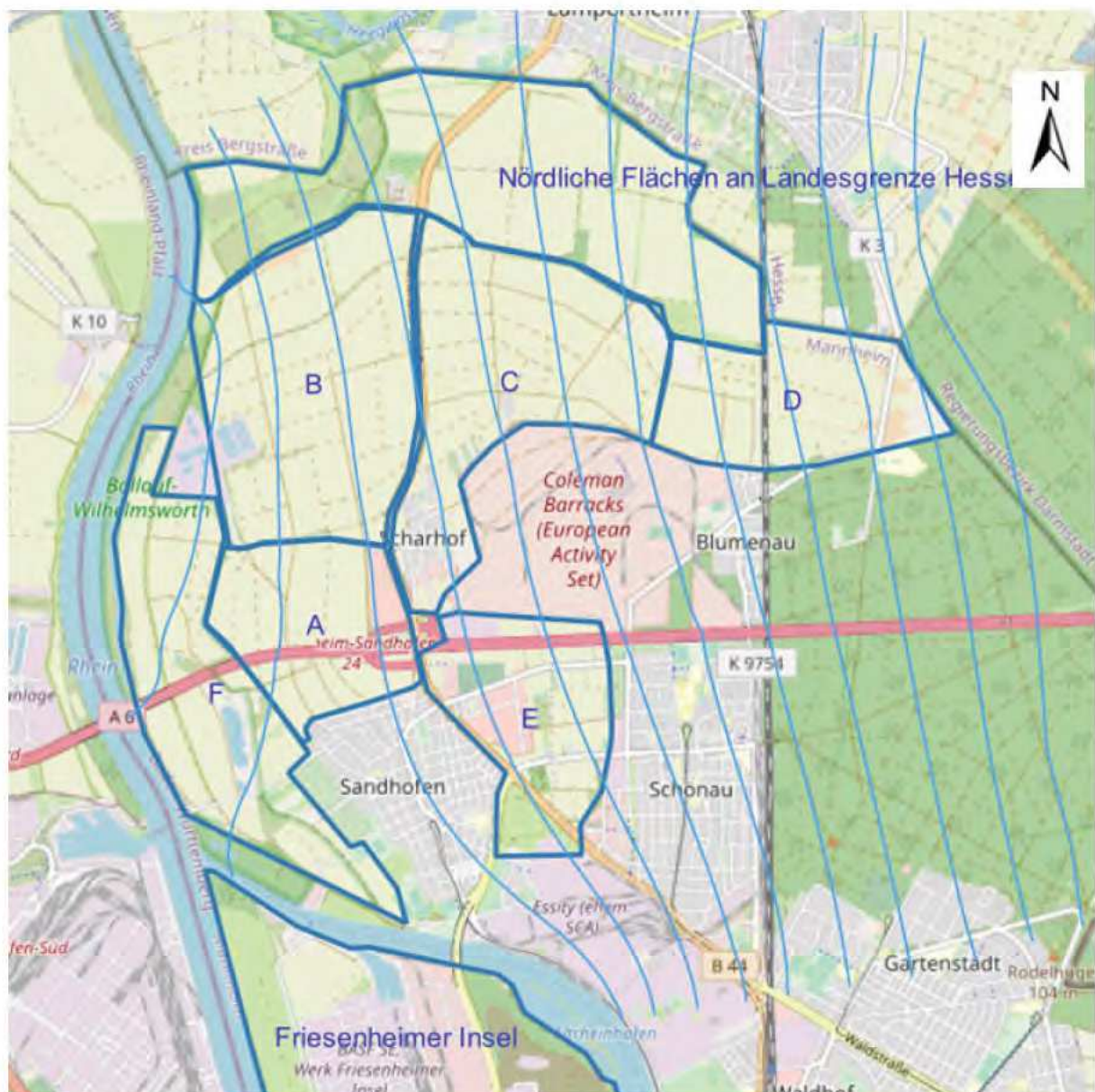


Abbildung 14 Grundwassergleichen (graue Linien) nach Berechnung mit dem Grundwassermodell

Die mit dem Modell berechnete Grundwasserfließrichtung ist nach Westen dem Rhein entgegen gerichtet. Insbesondere in Rheinnähe findet in der unteren, südlichen Hälfte eine

leichte Umlenkung in West-Nord-West Richtung statt. Im Süden des Gebietes ist ebenfalls der Einfluss des Rheinarms (Friesenheimer Insel) deutlich erkennbar.

7.4 Modell zu PFAS-Eintrag in das Grundwasser aus dem ungesättigten Bereich

Die ungesättigte Zone im Modellgebiet ist im Durchschnitt 3 bis 4 m mächtig. Dies kann jedoch jahreszeitlich variieren, abhängig von den Wasserständen im Rhein und Niederschlägen. Um die Laufzeiten durch die ungesättigte Zone während der Jahreszeiten zu berechnen, wurden für vier verschiedene, im Untersuchungsbereich auftretende Bodentypen 1D-Modelle für die ungesättigte Zone mit dem Programm HYDRUS-1D aufgestellt.

Im nächsten Schritt erfolgte die Berechnung für Hoch- und Niedrigwasserperioden, um die jährliche Beaufschlagung des Grundwasserleiters abzuschätzen.

Das Konzept für das Eintragsmodell für Stoffeinträge aus dem ungesättigten Bereich ist in der Abbildung 15 dargestellt.

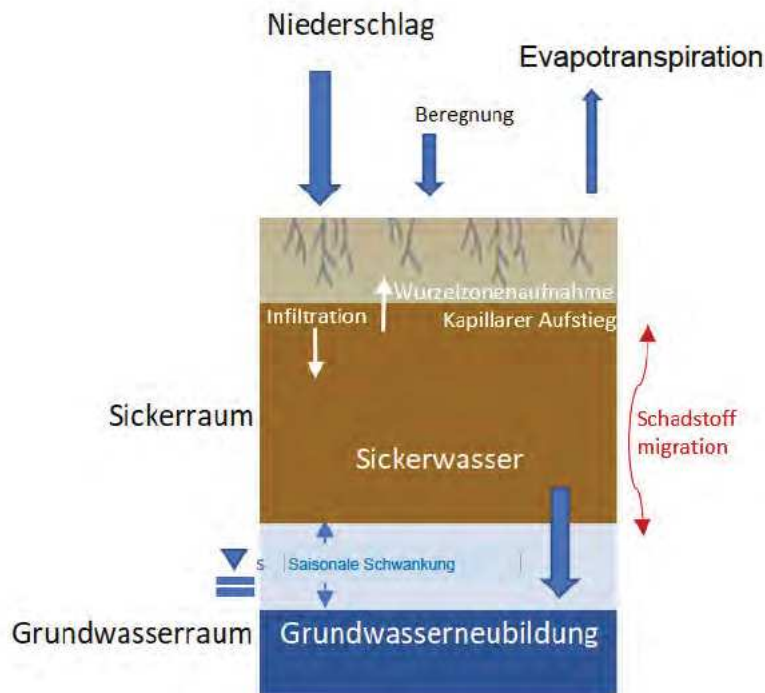


Abbildung 15 Konzept zu Eintragsmodell für Stoffeinträge in das Grundwasser aus dem ungesättigten Bereich

Folgende Bedingungen wurden im Modell berücksichtigt:

- Mächtigkeit Sickerraum 4,6 m
- Niederschlag (Mittelwert Jahresniederschlag [X 13]) rd. 680 mm/a
- Lufttemperatur (Jahresmittel, langfr. [X 13]) 10,9 °C
- Bodenart [X 18] Schluffig, lehmige, teilweise sandige Oberböden (Auengleye, Braune Auenböden, Parabraunerde, vereinzelt Anmoorgley und Niedermoor)
- Bewirtschaftung Mais, Getreide
- Beregnung nicht im Modell berücksichtigt.

In mehrere Modellläufen wurden Boden- und Bewirtschaftungsart variiert. In den meisten Fällen ist ein Durchbruch der Schadstofffront in den gesättigten Bereich zu erwarten. Zusätzlich überschreiten die, für den Ort der Beurteilung (Grenzfläche ungesättigter Bereich

zu gesättigtem Bereich) berechneten Konzentrationen, die im PFAS-Leitfaden [R 5] genannten GFS-Werte (insbesondere für PFOA).

Im Modell blieb die Berechnung zunächst unberücksichtigt. Schon hierbei ist eine Überschreitung von GFS-Werten vorhanden. In einem weiteren Schritt wurden unterschiedliche Berechnungssituationen einbezogen, um die Auswirkungen auf die Schadstofffahne sowie den Grundwasserspiegel zu untersuchen. Auch bei den erweiterten Modellläufen ergeben sich Überschreitungen von GFS-Werten am Ort der Beurteilung. Die Dokumentation befindet sich in Anlage 2.

8 Gesamtauswertung und Bewertung sämtlicher Ergebnisse

8.1 Gefährdungspotenzial und Bewertung

Von den insgesamt untersuchten 1.382 ha Ackerflächen überschreiten die Bodeneluatate von rund 565 ha die GFS- und/oder der GOW-Werte. Alle belasteten Ackerflächen weisen im Bodeneluat PFOA in -im Vergleich zu den anderen Parametern- hohen Konzentrationen auf. PFOA kann daher als Leitparameter angesehen werden. Mit geringeren Eluatkonzentrationen tragen PFHpA, PFHxA, PFHpA und PFNA ebenfalls zur Schadstoffbelastung bei.

Der Schwerpunkt der PFAS-Belastungen befindet sich hauptsächlich im oberen Bereich des Pflughorizontes (0 bis 0,6 m) in 0 bis 0,3 m Tiefe.

Die in Abbildung 16 und Anlage 1.2.2 rot dargestellten Flächen überschreiten einen oder mehrere GFS- und/oder GOW-Werte am Ort der Probenahme. Nach den Erkenntnissen aus den Untersuchungen zur Tiefenverteilung ist bei den meisten belasteten Flächen von einer Tiefenverlagerung der PFAS auszugehen.

Bei den Untersuchungen zur Tiefenverlagerung wurde bei einigen Flächen eine, den Pflughorizont unterlagernde Schluffschicht entdeckt, welche die Schadstofffront zurückhalten könnte. Allerdings ist aus den Untersuchungen erkennbar, dass die Schadstofffront bereits in den Schluffhorizont vorgedrungen ist und bei geringen Mächtigkeiten mit einem kurz- bis mittelfristigen Durchbruch der Schadstoffe gerechnet werden muss. Nach dem Durchbruch würde dann ein weitgehend unretardierter Transport durch die Sande und Kiese in das Grundwasser stattfinden.

Das Durchbrechen der PFAS durch die Schluffschicht ist bei einigen der untersuchten Flächen bereits nachgewiesen (vgl. [X 4]; [X 5]; [X 7]) und wird auch durch das Eintragsmodell (siehe Kapitel 7.4) prognostiziert.

Es ist daher davon auszugehen, dass bei den Flächen mit einer Überschreitung der GFS- oder/und der GOW-Werte am Ort der Probenahme sich diese Werte jetzt oder in absehbarer Zukunft auch am Ort der Beurteilung und im Grundwasser zeigen werden. **Die rot gekennzeichneten Flächen werden daher als belastete Flächen bezeichnet, für sie besteht ein hinreichender Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung** (vgl. [R 5]).

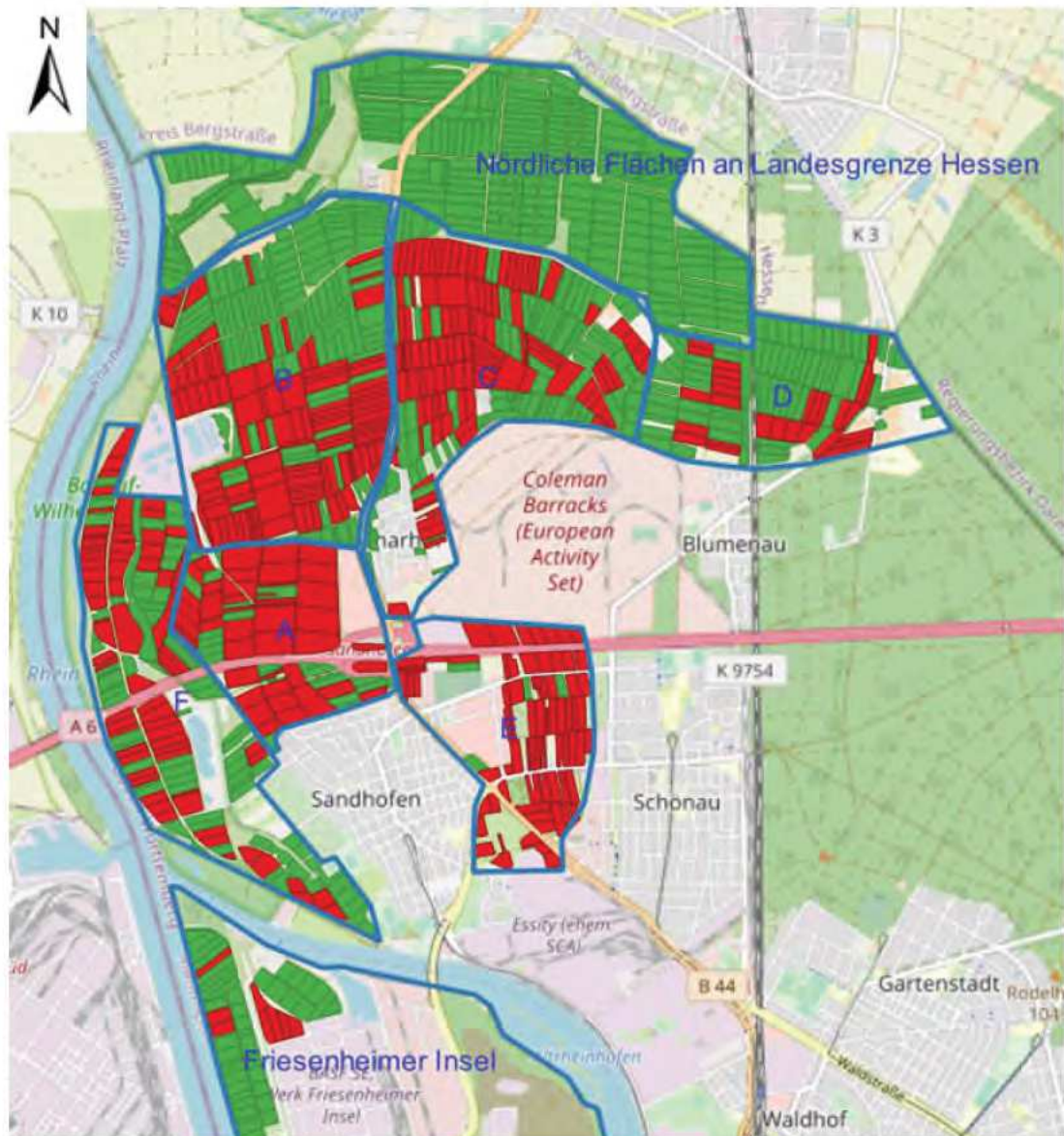


Abbildung 16 Überschreitungen der GFS- und/oder GOW-Werte am Ort der Probenahme (rote Flächen: belastete Flächen mit Überschreitung, grüne Flächen keine Überschreitung von GFS- und/oder GOW-Werten)

In der Abbildung 17 sind die Quotientensumme der Grundwasseranalysen aus den untersuchten Beregnungsbrunnen abgebildet.

Die Quotientensumme (QS) von 1) wurde in den Jahren 2021 bis 2023 bei insgesamt 14 Brunnen überschritten

Die belasteten Brunnen mit Überschreitung der Quotientensumme befinden sich hauptsächlich im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes. In nördlicher Richtung nehmen die Belastungen ab. Für den Bereich der Friesenheimer Insel sind keine Grundwasseranalysen vorhanden. Im Bereich der am nördlichsten liegenden Flächen an der Landesgrenze zu Hessen existieren nur Messungen am südlichen Rand dieses Bereichs. Diese zeigen keine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit.

Die nachfolgende Abbildung 18 stellt die Verteilung des Parameters PFHxA dar. Aufgrund der geringen Retardation ist PFHxA als einer der ersten Parameter in das Grundwasser gelangt und kann im Grundwasser derzeit als Hauptschadstoffparameter eingestuft werden.

Die Aufteilung in der Abbildung erfolgte nach den Quartilen der PFHxA Konzentration. Es sind die höchsten 25% der Belastungen dargestellt.

Auch für PFHxA zeigt sich, dass die höchsten PFHxA Befunde im zentralen Teil des Untersuchungsgebiets vorliegen. Hier wird zwar bei einem Großteil der auffälligen Brunnen der QS-Wert von 1 noch nicht überschritten, allerdings ist in Zukunft mit weiter ansteigenden Konzentrationen zu rechnen.

Das bereits flächige Vorkommen von kurzkettigen PFAS im Grundwasser unterstreicht, dass zukünftig zeitverzögert auch die Parameter mit größerer Retardation in das Grundwasser ausgetragen werden.

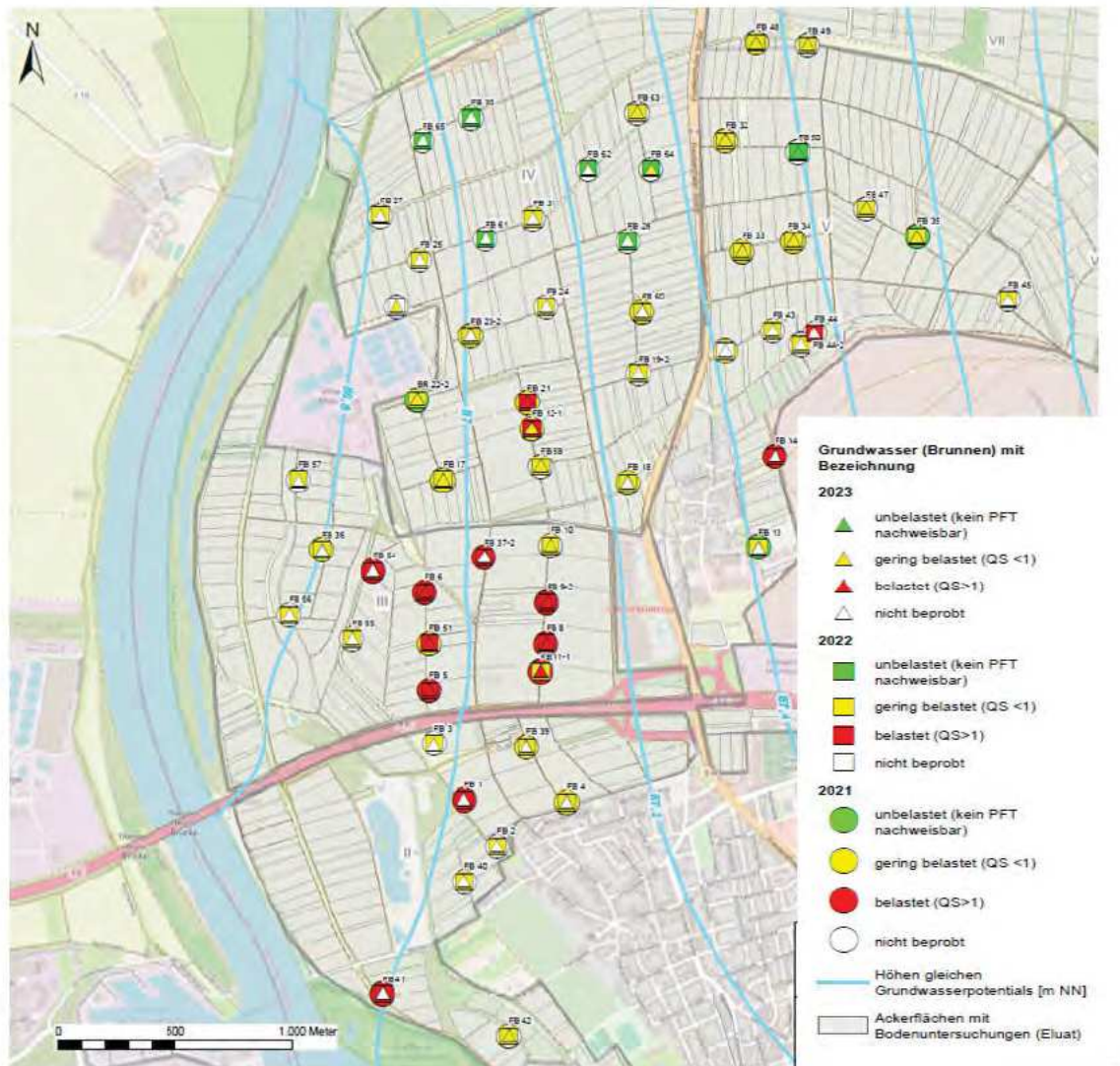


Abbildung 17 Lageplan mit Darstellung der Grundwasserbelastungen (Quotientensumme (QS)) im Zeitraum 2021 bis 2023

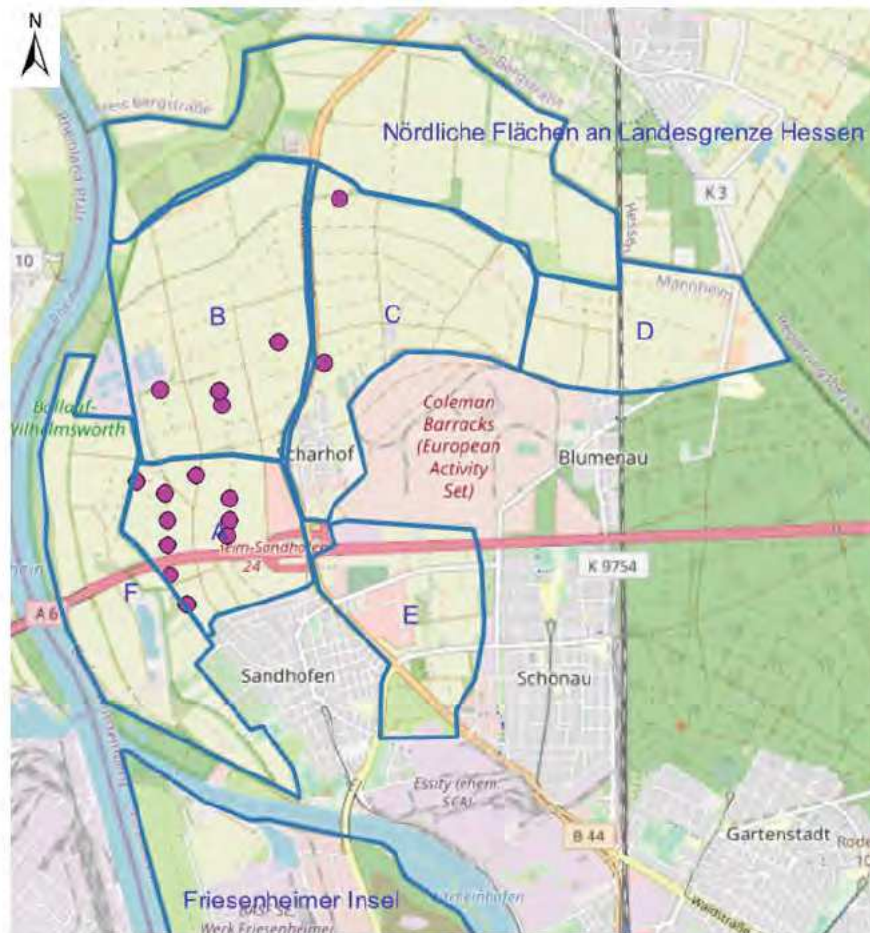


Abbildung 18 Verteilung PFHxA im Grundwasser (Beregnungsbrunnen) (dargestellt sind die höchsten PFHxA Befunde [25 % der höchsten Konzentrationen von größer 1,6 µg/l im Grundwasser] als violette Kreise)

PFOA als Hauptschadstoffparameter mit den höchsten Gehalten im Boden ist bisher in Spuren im Grundwasser nachzuweisen. PFOA retardierte stärker am Boden und wird durch das Sickerwasser langsamer zur Tiefe hin verlagert.

Durch den Schadstofftransport der PFAS in das Grundwasser sind bereits zwei Eigenwasserversorgungen (EWV) betroffen. Hier wurden bei einer EWV GFS-Überschreitungen und bei der anderen EWV eine QS-Überschreitung festgestellt. Bei insgesamt 14 Beregnungsbrunnen (zu landwirtschaftlichen Zwecken) lagen in den Jahren 2021 bis 2023 Überschreitungen der QS vor.

Wegen der Überschreitungen der GFS und der QS im Grundwasser sowie der betroffenen Nutzungen (Eigenwasserversorgungen, landwirtschaftliche Bewässerung) sind lokale schädliche Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit bereits eingetreten.

8.2 Belastungsverteilung und Einteilung in Belastungs-Cluster

Für die Einstufung der Belastungshöhe wurden die jeweiligen Quartile und Mediane der Einzelparameterkonzentration ausgewählt. In den Anlagen 1.2.3 bis 1.2.8 sind die Auswertungen zur Gesamtsumme PFAS und für die Parameter PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA dargestellt.

Die jeweiligen Quartile und Mediane der betrachteten PFAS-Einzelparameter sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Messwerte kleiner der BG sowie Summenwerte = 0 wurden nicht in die Betrachtung miteinbezogen.

Tabelle 6 Quartile und Mediane der Gesamtsumme PFAS und der wesentlichen PFAS-Einzelparameter (Tiefe 0 bis 0,3 m u. GOK)

Angaben in [µg/l]	Σ PFAS	PFOA	PFPEA	PFHXA	PFHPA	PFNA
Minimum	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Q1	0,94	0,05	0,06	0,05	0,04	0,04
Median	2,91	0,41	0,21	0,18	0,25	0,18
Q3	6,22	1,86	0,57	0,48	0,57	0,48
Maximum	32,91	21,00	4,30	4,20	4,30	4,00

Die Konzentrationsverteilung für die Summe der PFAS-Eluatkonzentrationen ist in der Abbildung 19 dargestellt.

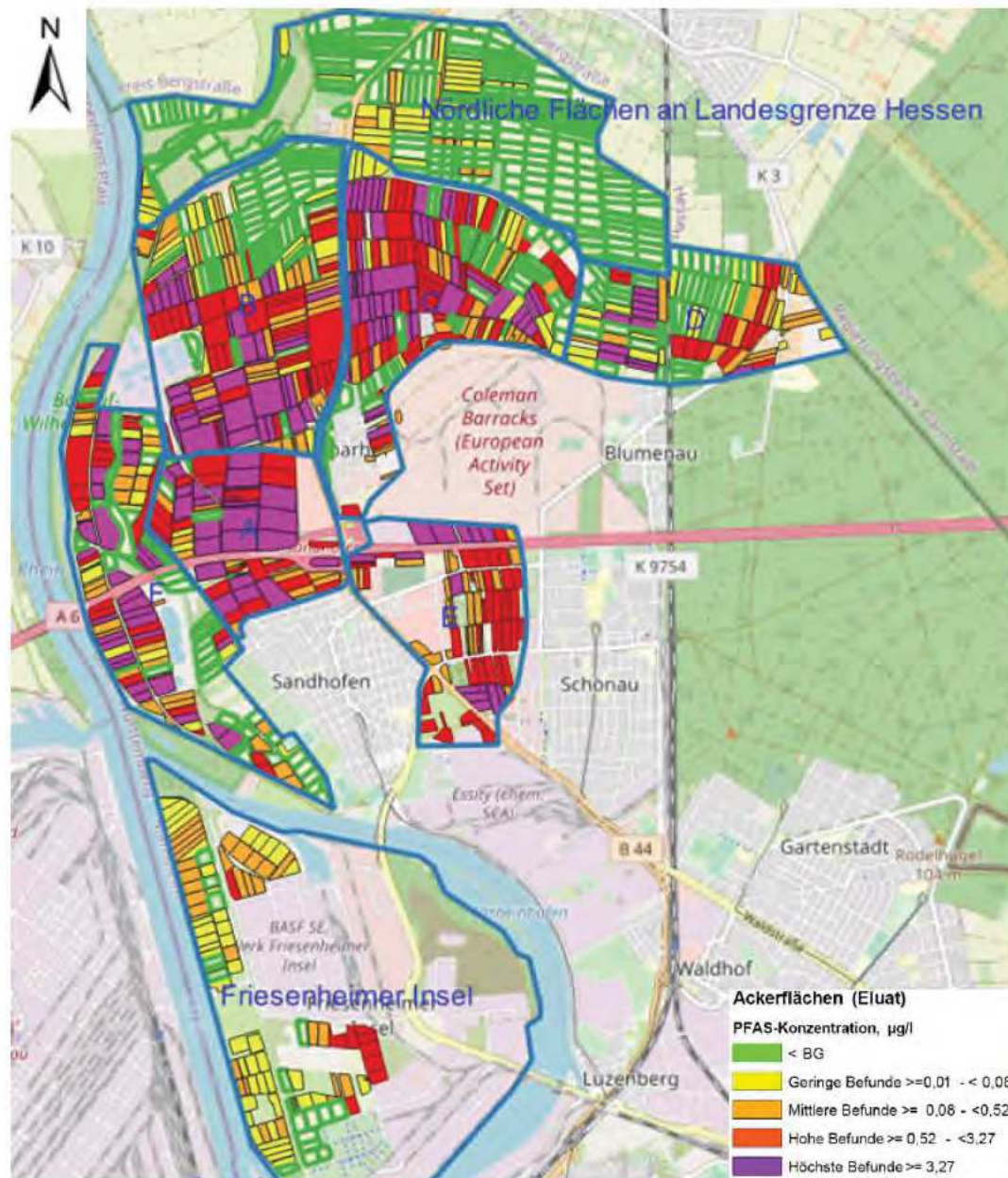


Abbildung 19 Konzentrationsverteilung Boden Σ PFAS (Eluat in µg/l)

Die Konzentrationsverteilung des Hauptschadstoffparameters PFOA ist in Abbildung 20 sowie in Anlage 1.2.4 dargestellt.

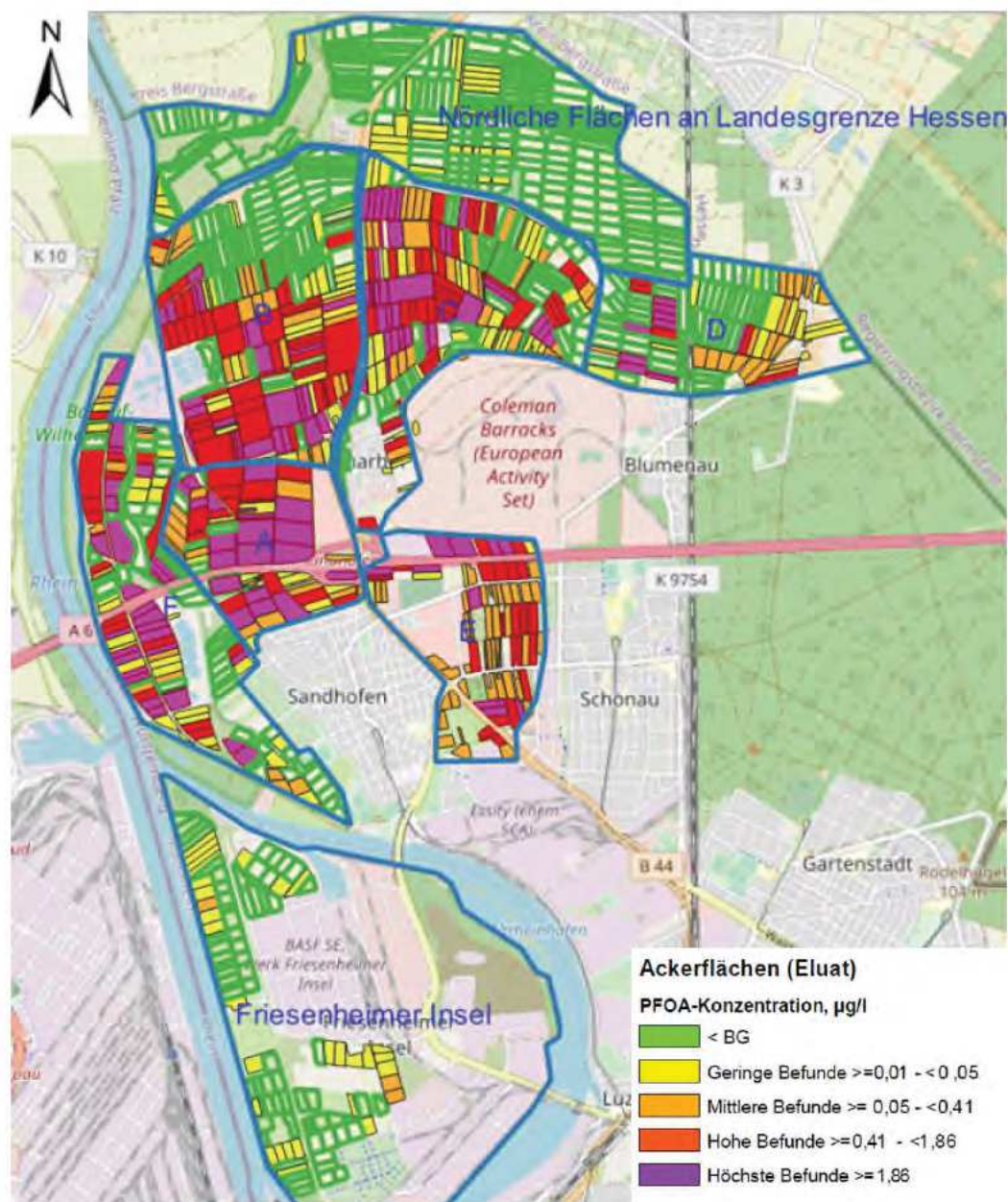


Abbildung 20 Konzentrationsverteilung Boden PFOA (Eluat in µg/l)

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die **Konzentrationsverteilungen der Parameter PFPeA, PFHxA, PFHpA; PFNA**.

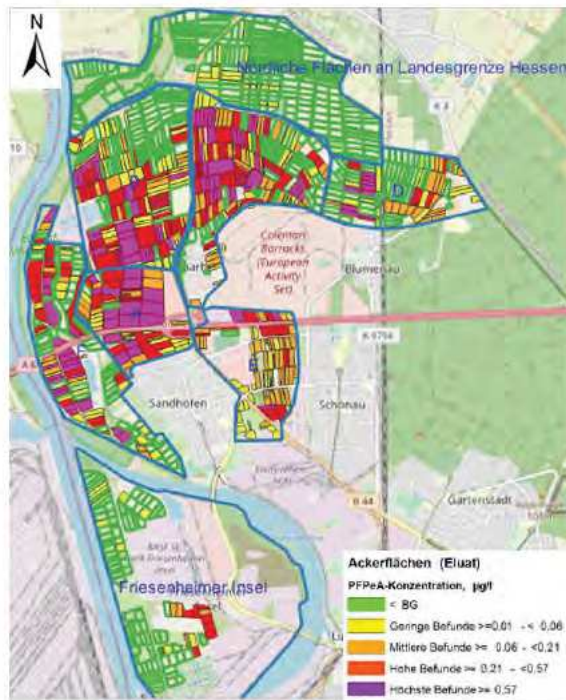


Abbildung 21 Konzentrationsverteilung Boden PFPeA (Eluat in µg/l).

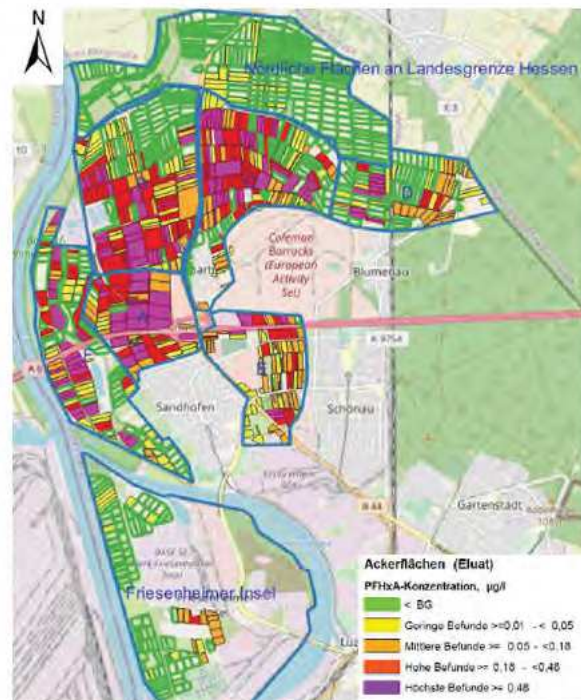


Abbildung 23 Konzentrationsverteilung Boden PFHxA (Eluat in µg/l).

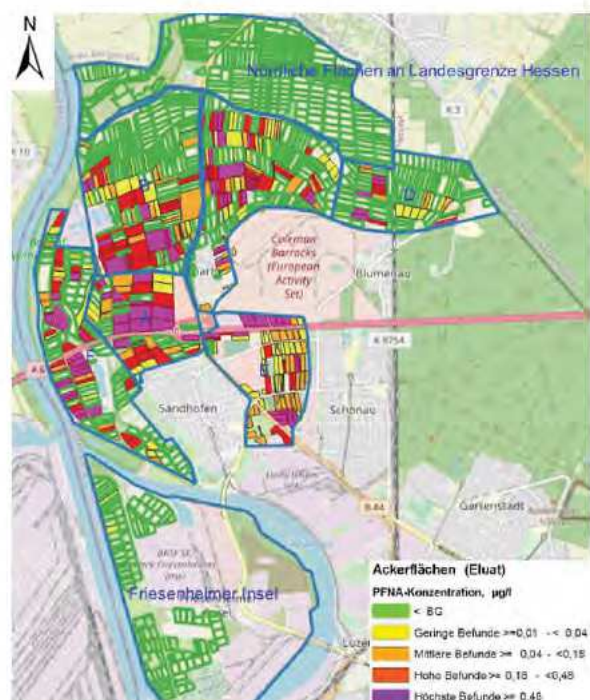
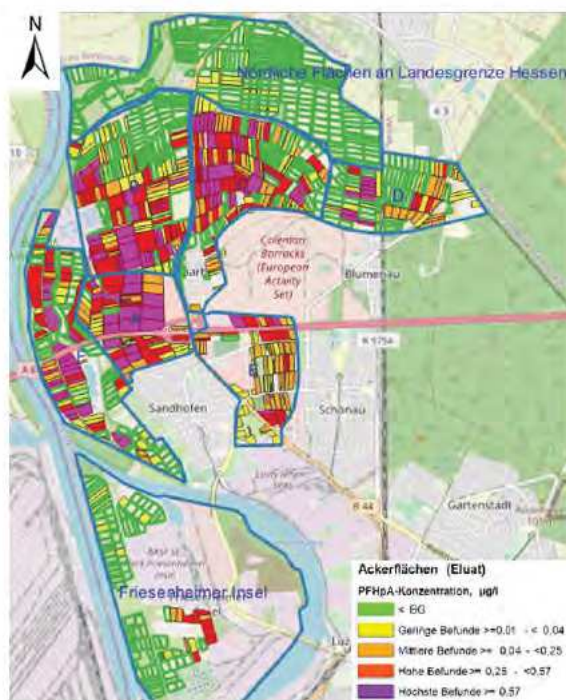


Abbildung 22 Konzentrationsverteilung Boden
PFHpA (Eluat in µg/l).

Abbildung 25 Konzentrationsverteilung Boden
PFNA (Eluat in µg/l).

Weitere grafische Auswertungen zur PFAS-Belastung sind als Karten in Anlagen 2.1.ff dem Bericht beigelegt. Es ist die Tiefe 0 bis 0,3 m dargestellt, da für diesen Tiefenbereich flächenhaft vollständige Daten existieren.

Es lassen sich regional unterschiedliche Verteilungen und Belastungsgrade der Flächen unterscheiden.

Zur besseren Auswertung fand für die unterschiedlichen Bereiche eine regionale Clusterung statt. Der besseren Lesbarkeit halber sind die Cluster in allen Abbildungen dargestellt. Die **Clusterung und die Verteilung der Belastung** werden nachfolgend erläutert.

Im zentralen Teil des Untersuchungsgebietes sind die Bodenbelastungen nahezu flächig vorhanden. Dieser Bereich ist auch dadurch gekennzeichnet, dass im Grundwasser bereits in weiten Teilen die Quotientensumme überschritten ist. Es liegen flächig die höchsten PFHxA-Konzentrationen vor. Aus diesem Grund ist dieser Teil als Cluster abgegrenzt (Bereich A).

Flächen ohne PFAS-Befunde (alle Einzelparameter kleiner der BG) sind über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Hervorzuheben ist hierbei der Bereich „Nördliche Flächen an Landesgrenze Hessen“ im Norden des Untersuchungsgebietes, in dem nur wenige PFAS-beaufschlagte Flächen mit geringen Befunden (0,01 – 0,08 µg/l) und mittleren Befunden (0,08 – 0,52 µg/l) vorhanden sind.

Im Bereich der „Friesenheimer Insel“ sind ebenfalls mehrere Flächen ohne PFAS-Befunde vorhanden. Die Mehrheit der Flächen weist geringe PFAS-Eluatkonzentrationen kleiner 0,08 µg/l auf. Neben diesen Flächen existieren auf der Friesenheimer Insel ebenfalls Flächen mit einem mittleren Konzentrationsniveau zwischen 0,08 µg/l und 0,52 µg/l. Hohe Befunde kommen auf der Friesenheimer Insel mit einer Ausnahme im Westen der Insel vor.

Die übrigen Bereiche (Bereiche B, C, D, E, F) sind um den Bereich A herum gruppiert.

Die **Verteilung der PFAS-Einzelkomponenten** zeigt folgendes Bild.

Im Bereich der Friesenheimer Insel sowie im Bereich der nördlichen Flächen an der Landesgrenze zu Hessen sind zumeist Flächen mit **PFOA-Befunden** kleiner der Bestimmungsgrenze sowie mit geringen Konzentrationen (< 0,05 µg/l) vorhanden. Im

Vergleich zu den übrigen Bereichen tritt auf den Ackerflächen der Friesenheimer Insel PFOA als Hauptparameter zurück und PFOS zeigt die höchsten Belastungen.

Im mittleren Untersuchungsbereich sind Flächen ohne PFOA-Befunde sowie mit geringen Konzentrationen nur vereinzelt anzutreffen. Hierbei handelt es sich, insbesondere bei den Flächen ohne PFOA-Befund auch um die bereits erwähnten Naturschutzflächen ohne landwirtschaftliche Bearbeitung. Mittlere Konzentrationen von (0,05 – 0,41 µg/l) sind in den zentralen Bereichen A, B, C, E und F nur in geringer Anzahl vorzufinden. In den Bereichen C, und F dominieren hohe Befunden zwischen 0,41 – 1,86 µg/l.

Die höchsten PFOA-Befunde (> 1,86 µg/l) sind in Bereich A sowie im südlichen Teil von Bereich B und im westlichen Teil von Bereich C als größere zusammenhängende Flächenbereiche anzutreffen.

Wie bei der Gesamtsumme PFAS sind auch für den Hauptschadstoffparameter PFOA zusammenhängende Flächen im Bereich E direkt östlich des Erdenwerks/ südlich der Coleman-Kaserne mit meist mittleren und hohen PFOA-Konzentrationen vorhanden.

Im Bereich D sind mehrere Flächen im Bereich des Blumenauer Bruchs mit mittleren und hohen Befunden, teilweise als zusammenhängende Flächenbereiche, vorhanden.

Die **Konzentrationsverteilungen der PFAS-Einzelsubstanzen PFPeA, PFHxA, PFHpA und PFNA** sind sehr ähnlich. Dies betrifft vor allem die Verteilung der höchsten Konzentrationen und Konzentration der höchsten Belastungen im Bereich A nördlich der A6, südliche Flächen im Bereich B, Flächen im westlichen Teil des Bereichs C sowie zusammenhängende Flächen entlang des Rheins in Bereich F.

8.3 Beschreibung der regionalen Abgrenzung der Belastungs-Cluster

Die regionalen Abgrenzungen der acht Bereiche (siehe Abbildung 23) sind nachfolgend detailliert beschrieben.



Abbildung 23 Aufteilung des Untersuchungsgebietes in acht Bereiche mit unterschiedlichen Belastungssituationen

Nördliche Flächen an Landesgrenze Hessen. Die im Untersuchungsgebiet am nördlichsten gelegenen Flächen direkt an der Landesgrenze zu Hessen werden durch einen Großbewirtschafter landwirtschaftlich genutzt. In diesem Gebiet sind im westlichen Teil vereinzelte Naturschutzflächen vorhanden. Die südliche Grenze des Untersuchungsbereichs wird durch die Straße „Hohe Weg zum Rhein“ im Westen sowie im Osten den auf gleicher Höhe verlaufenden Nachtweid- bzw. im weiteren Verlauf Bruchgraben gebildet.

Friesenheimer Insel. Bei der Friesenheimer Insel handelt es sich um einen von Rhein und den Altrhein abgegrenzten Untersuchungsbereich, auf dem neben landwirtschaftlich genutzten Flächen (sowie Naturschutzflächen) auch Industrieflächen vorhanden sind. Als Zugänge zur Friesenheimer Insel bestehen nur Verbindungen über die zwei Brücken der Diffenestraße sowie eine Fährverbindung über den Altrhein nach Sandhofen.

Bereich A. Der Bereich A ist der zentrale Bereich des Untersuchungsgebietes und beginnt im Süden an der Bebauungsgrenze von Sandhofen. Die nördliche Grenze bildet die Verbindungsstraße zwischen Scharhof und dem Klärwerk. Im Osten ist dieser Untersuchungsbereich durch den „Homepark-Mannheim“ eingegrenzt. Die westliche Grenze bildet der begrünte Wall, in dem eine Leitung von Klärwerk zum Pumpwerk Sandhofen verläuft. Dieser Verlauf spiegelt auch grob die unterschiedliche Pedologie in diesem Bereich wider. Im Bereich A ist überwiegend Pararendzina aus Niederterrassenschottern sowie verschiedene Parabraunerden vorhanden. Östlich dieses Walls dahingegen sind ausschließlich braune Auenböden sowie Auengleye vorhanden.

Bereich B. Der Bereich B liegt nördlich des Bereichs A. Die südliche Grenze bildet dabei die Verbindungsstraße zum Klärwerk. Die westliche Grenze wird ebenfalls zum Teil durch die Leitung Klärwerk – Pumpwerk Sandhofen bzw. durch die Grenze zur Kläranlage bestimmt. Die nördliche Fläche wird durch die Straße „Der Hohe Weg zum Rhein“ sowie die östliche Grenze durch die Bundesstraße B44 gebildet. Teilweise existieren in diesem Bereich größere Flächenbereiche, welche als zusammenhängende Ackerschläge bewirtschaftet werden.

Bereich C. Der Bereich C schließt östlich an den Bereich B an. Die westliche Grenze bildet daher ebenfalls die B44. Im Norden wird dieser Bereich durch den Nachtweid- bzw. im weiteren Verlauf Bruchgraben begrenzt. Die östliche Grenze wird durch den Blumenauer Bruch, bzw. den Bruchgraben bestimmt. Die Flächen im Blumenauer Bruch sind nicht im Bereich C beinhaltet. Die südliche Grenze wird durch das Gelände der Coleman-Kaserne bestimmt.

Bereich D. Der Bereich D schließt östlich an den Bereich C an und beginnt mit den Ackerflächen im Blumenauer Bruch. Der Untersuchungsbereich setzt sich im Osten mit den Flächen der Sandhofer Äcker fort. Die nördliche Grenze wird dabei teilweise durch den Sandhofer Bruch sowie durch die Landesgrenze zu Hessen bestimmt. Diese Landesgrenze bestimmt ebenfalls die östliche Begrenzung dieses Bereichs. Im Süden ist die Fläche durch das Gelände der Coleman-Kaserne abgegrenzt.

Bereich E. Der Bereich E befindet sich südlich der Coleman-Kaserne und grenzt direkt östlich an das Erdenwerk Mannheim an. Im Osten wird der Bereich E durch die Bebauungsgrenze Schönau, im Süden durch das Industrieareal Essity (ehem. SEA) und im Westen durch die Wohnbebauung von Sandhofen eingegrenzt. Neben größeren

Bewirtschaftungsflächen sind in diesem Bereich auch mehrere kleinräumig bewirtschaftete Flächen vorhanden.

Bereich F. Der Bereich F ist durch seine Rheinnähe geprägt, welcher auch die westliche Grenze bildet. Dieser Untersuchungsbereich liegt westlich des zentralen Bereichs A. Die östliche Grenze bildet daher, wie bereits oben beschrieben, der begrünte Wall, innerhalb dessen eine Leitung von Klärwerk zum Pumpwerk Sandhofen verläuft. Im Bereich F sind aus pedologischer Sicht ausschließlich braune Auenböden sowie Auengleye vorhanden. Die südliche Grenze bildet der Altrheinarm bzw. dort vorhandene Bereiche mit Auenwäldern sowie die Wohnbebauung in Sandhofen. Im Norden wird die Grenze durch das Klärwerk sowie einen breiteren Bereich mit Auenwäldern bestimmt, der diesen Untersuchungsbereich und die nördlicher liegenden voneinander trennt. Innerhalb dieses Bereichs sind auch mehrere Naturschutz- bzw. Ausgleichsflächen vorhanden, die die Flächen teilweise als Grünstreifen durchziehen.

8.4 Hot-Spot Analyse

Für das Untersuchungsgebiet wurde eine Hot-Spot Analyse durchgeführt. Diese dient dazu, die Flächen mit den höchsten Belastungen als ein Kriterium für eine spätere Priorisierung herauszufiltern. Die Einstufung der Flächen erfolgte dabei über das 90% Perzentil der Gesamtsumme PFAS (10,97 µg/l) im Eluat der als belastet eingestuften Flächen. Als Hot-Spots werden somit die 10 % der Flächen der belasteten Flächen definiert, die am höchsten belastet sind. Die Auswertung bezieht sich auf die Analysen der oberen 0,3 m.

Für die Bereiche A bis F, „Nördliche Flächen an Landesgrenze Hessen“ und „Friesenheimer Insel“ sind die Anzahl und Gesamtfläche der Hot-Spot Flächen aufgelistet. Eine detaillierte Auflistung findet sich in Anlage 3.

Tabelle 7 Hot-Spot Übersicht in den einzelnen Untersuchungsbereichen

Bereiche	Anzahl der Hot-Spot Flächen	Flächengröße insgesamt [ha]
Bereich A	2	4,0
Bereich B	3	4,1
Bereich C	15	21,8
Bereich D	7	8,4

Bereich E	3	5,3
Bereich F	12	22,5
Nördliche Flächen an Landesgrenze Hessen	0	0
Friesenheimer Insel	0	0

In Abbildung 24 sind die Hot-Spot-Flächen dargestellt.

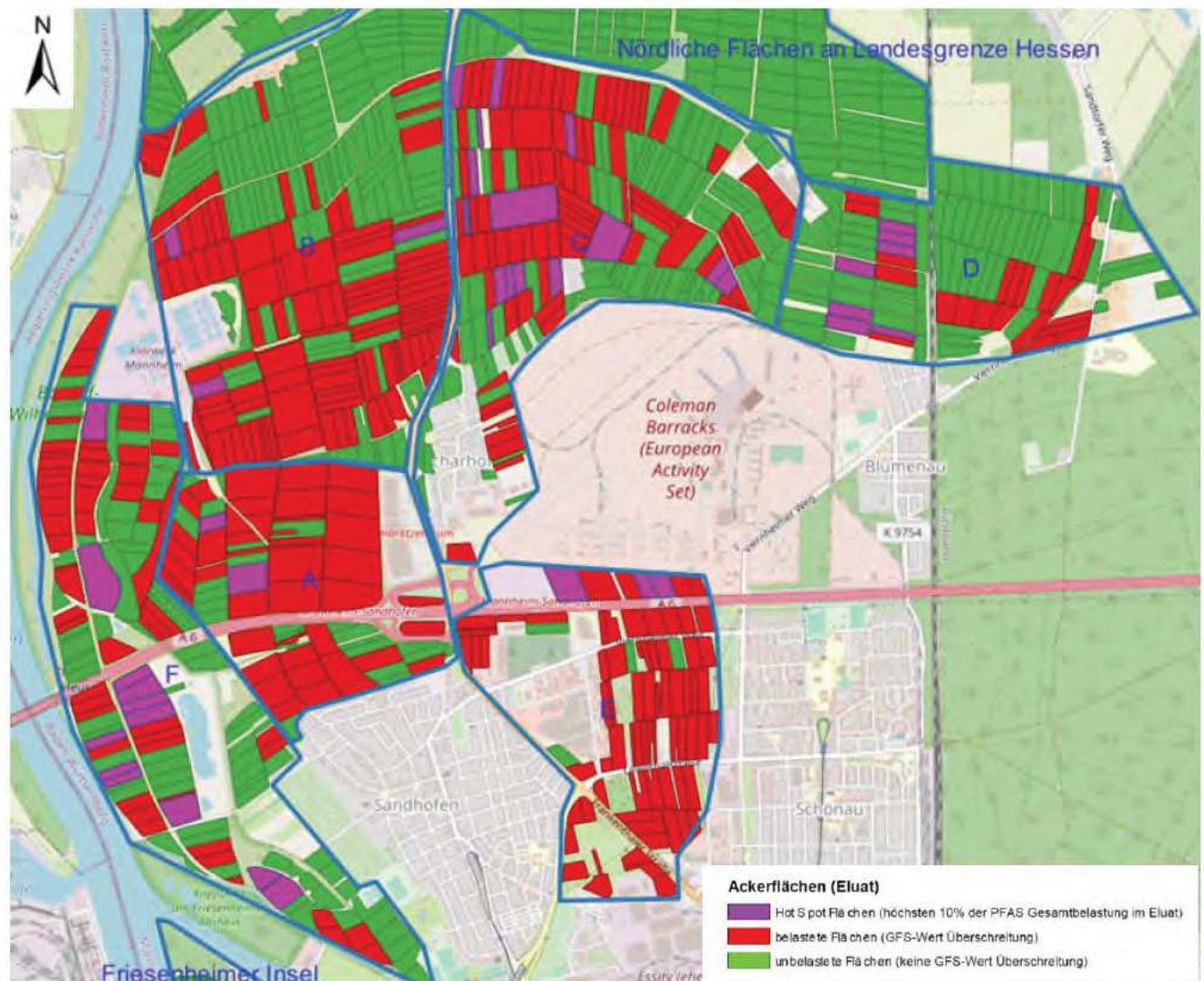


Abbildung 24 Hot-Spot Analyse, Flächen mit höchsten PFAS-Gesamtkonzentrationen

9 Integrales Standortmodell und clusterbezogene Beurteilung der Belastungsgrade

9.1 Belastungsgrade der verschiedenen Cluster

9.1.1 Nördliche Flächen an der Landesgrenze zu Hessen

Dieser Bereich weist nur vereinzelt geringe PFAS-Anteile größer der Bestimmungsgrenze auf. Vereinzelt sind geringe und mittlere Befunde der Gesamtsumme PFAS im Eluat vorhanden. Sämtliche in diesem Bereich vorhandenen Flächen werden durch einen Großbewirtschafter verwaltet und bearbeitet. In diesem Untersuchungsbereich wurden nur wenige Grundwasserproben untersucht. Die am südlichen Rand des Bereichs vorliegenden Grundwasseranalysen zeigen geringe PFAS-Kontaminationen. Nach der Bewertung anhand BBodSchV und durch den PFAS-Leitfaden [R 5] ist für die Flächen in diesem Bereich der Gefahrenverdacht ausgeräumt (siehe auch nachfolgende Abbildung).



Abbildung 25 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich "Nördliche Flächen an der Landesgrenze Hessen"

9.1.2 Friesenheimer Insel

Friesenheimer Insel. Auf der Friesenheimer Insel sind hauptsächlich Flächen mit ausgeräumten Gefahrenverdacht vorhanden. Acht Flächen werden als belastet eingestuft. Die PFAS-Gesamtkonzentrationen dieser acht Flächen liegen zwischen 0,16 µg/l und 0,61 µg/l. Der Hauptschadstoffparameter ist für alle Proben PFOS (ebenfalls für die als unbelastet eingestuften Flächen), was diese Proben und diesen Untersuchungsbereich von den anderen Untersuchungsbereichen unterscheidet. Fünf der belasteten Flächen liegen als eine Bewirtschaftungseinheit vor und sind räumlich durch Wege bzw. Grünbereiche von anderen Ackerflächen abgegrenzt. Ein Bereich direkt am Rhein mit zwei weiteren direkt nebeneinanderliegenden Flächen liegt inmitten eines größeren zusammenhängenden Ackerbereichs. Weiter im Süden ist eine weitere, einzeln innerhalb von unbelasteten Flächen liegende belastete Fläche vorzufinden. Im Untersuchungsbereich der Friesenheimer Insel sind keine Hot-Spot Flächen vorhanden.

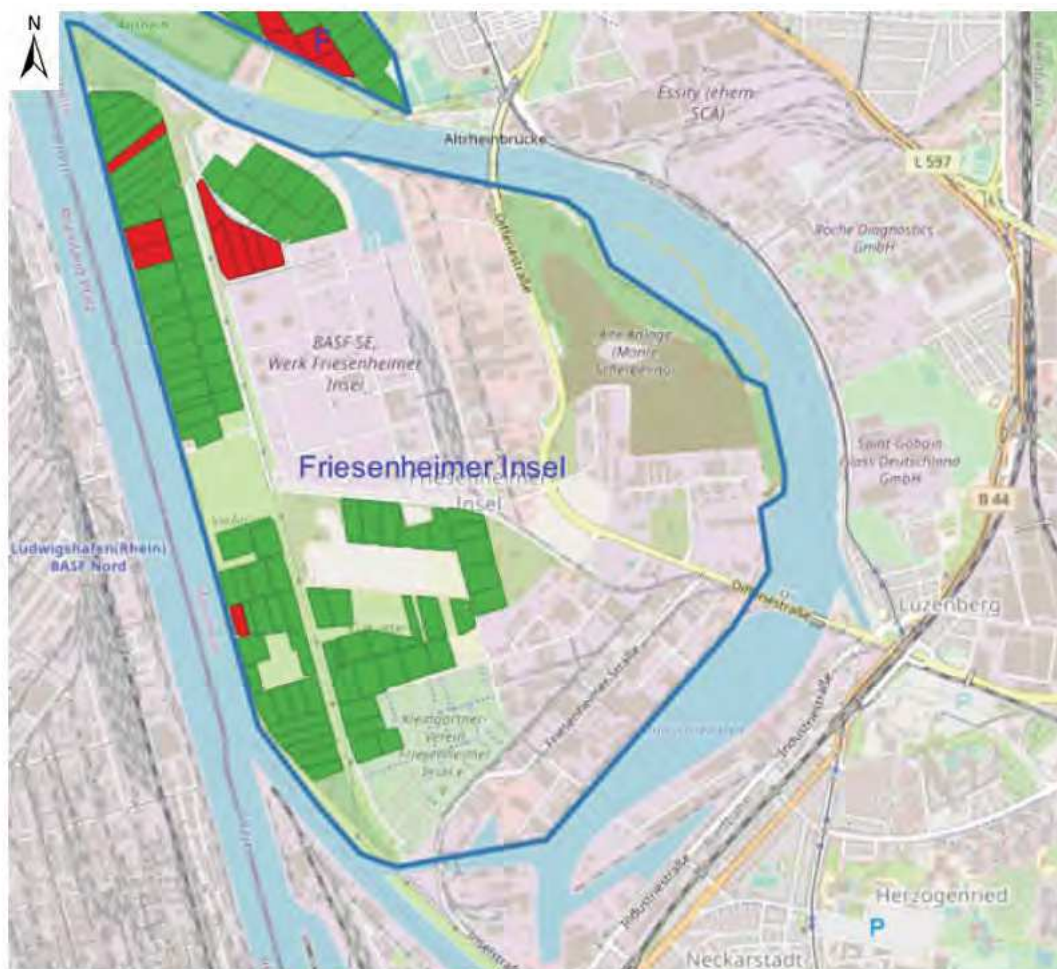


Abbildung 26 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich "Friesenheimer Insel"

9.1.3 Bereich A

Im zentralen mittleren Bereich A, der sich von Sandhofen bis zur Verbindungsstraße Klärwerk erstreckt, sind fast ausschließlich belastete Flächen mit einem hohen Flächenanteil vorhanden. Bei den wenigen unbelasteten Flächen handelt es sich teilweise um Wiesen oder Naturschutzflächen ohne landwirtschaftliche Nutzung. Dieser Bereich ist als ein zentraler Schadensbereich zu sehen.

Die PFAS Gesamtkonzentrationen im Bodeneluat der belasteten Flächen liegen zwischen 0,45 µg/l und 11,94 µg/l. Als Hauptschadstoffe treten die, für das Gesamtgebiet relevanten PFAS Einzelparameter PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA auf. Im Untersuchungsbereich A sind insgesamt zwei Hot-Spot Flächen mit einer Gesamtfläche von rd. 4,0 ha vorhanden. In Anbetracht der lokalen Grundwasserfließrichtung ist zu anzunehmen, dass sich die PFAS-Kontamination des Grundwassers, verstärkt ausgehend von den Hot-Spot Flächen, in absehbarer Zukunft auch in den bisher geringer verunreinigten Beregnungsbrunnen wiederfinden lassen wird.



Abbildung 27 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich A: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet. Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert

9.1.4 Bereich B

Im Bereich B sind insbesondere in der südlichen Hälfte des Untersuchungsbereichs viele belasteten Flächen vorhanden. Nach Norden hin nehmen die unbelasteten Flächen zu. Zwei Brunnen im südlichen Teil sind ebenfalls als belastet eingestuft.

Die PFAS Gesamtsummen im Bodeneluat der belasteten Flächen liegen zwischen 0,45 µg/l und 11,94 µg/l. Als Hauptschadstoffe treten die für das Gesamtgebiet relevanten PFAS-Einzelparameter PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA auf. Im Untersuchungsbereich B sind insgesamt drei Hot-Spot Flächen mit einer Gesamtfläche von rd. 4,1 ha vorhanden.



Abbildung 28 *Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich B: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet. Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert*

9.1.5 Bereich C

Im Bereich C sind viele belastete Flächen vorhanden. Insbesondere im westlichen Teil des Bereichs sind Flächenansammlungen von belasteten Flächen vorzufinden.

Die PFAS-Gesamtsummen im Bodeneluat der belasteten Flächen liegen zwischen 0,28 µg/l und 30,52 µg/l. Als Hauptschadstoffe treten die für das Gesamtgebiet relevanten PFAS Einzelparameter PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA auf. Im Bereich sind insgesamt 15 Hot-Spot Flächen mit einer Gesamtfläche von rd. 21,8 ha vorhanden.



Abbildung 29 Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich C: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet. Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert

9.1.6 Bereich D

Im Bereich D sind mehrere zusammenhängende Bereiche belasteter Flächen neben belasteten Einzelflächen vorhanden. Insgesamt existieren aber deutlich mehr unbelastete als belastete Flächen. Anmerkung: Für diesen Bereich gibt es keine regelmäßigen Grundwassermessungen aus Beregnungsbrunnen. Im Jahr 2017 wurde ein Betriebsbrunnen einer Gärtnerei einer am westlichen Rand des Untersuchungsbereichs D beprobt und PFAS mit einer Konzentration von 0,166 µg/l (QS 0,01) analysiert.

Die PFAS-Gesamtsummen im Bodeneluat der belasteten Flächen liegen zwischen 0,35 µg/l und 32,79 µg/l. Als Hauptschadstoffe treten die für das Gesamtgebiet relevanten PFAS-Einzelparameter PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA auf. Im Untersuchungsbereich D sind insgesamt sieben Hot-Spot Flächen mit einer Gesamtfläche von rd. 8,4 ha vorhanden.



Abbildung 30 *Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich D: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet). Beregnungsbrunnen mit QS kleiner 1 mit gelbem Punkt markiert*

Der Bereich E, der östlich des Erdenwerks und südlich der Coleman-Kaserne liegt, weist fast nur belastete Flächen auf. Insgesamt sind nur vier Flächen als unbelastet eingestuft. Dieser Bereich zählt neben Bereich A daher zu den am höchsten belasteten Flächenbereichen.

[illegible]

Unser Zeichen: rh/senk - Datum: 12 September 2023

9.1.8 Bereich F

Der Untersuchungsbereich F, in dem sich die Flächen entlang des Rheins bzw. des Rheinhafenkanals befinden, weist große zusammenhängende Bereiche mit belasteten Flächen auf. Angrenzende belastete Flächen werden zumeist als ein Ackerschlag bewirtschaftet. Belastete (isolierte) Einzelflächen existieren in einer geringeren Anzahl.

Die PFAS-Gesamtsummen im Bodeneluat der belasteten Flächen liegen zwischen 0,20 µg/l und 29,64 µg/l. Als Hauptschadstoffe treten die für das Gesamtgebiet ebenfalls PFAS-Einzelparameter PFOA, PFHpA, PFHxA, PFPeA und PFNA auf. Im Untersuchungsbereich F sind insgesamt zwölf Hot-Spot Flächen mit einer Gesamtfläche von rd. 22,5 ha vorhanden.



Abbildung 32 *Einstufung in belastete Flächen und unbelastete Flächen (Gefahrenverdacht ausgeräumt) nach [R 5] im Bereich F: belastete Flächen sind rot gekennzeichnet; Hot-Spot Flächen (ebenfalls belastet) sind violett gekennzeichnet. Beregnungsbrunnen mit QS > 1 sind mit roten Punkten, kleiner 1 mit gelben Punkten markiert*

9.2 Überlegungen zur Priorisierung und zur Vorgehensstrategie

Zusammenfassend lassen die Auswertungen folgende Schlüsse zu: Die am höchsten belasteten Flächen (Hot-Spot-Flächen, 90% Perzentil der Gesamtsumme PFAS im Eluat) sind über das Untersuchungsgebiet verteilt. Es existieren 42 Hot-Spot Flächen mit einer Gesamtfläche von 66,1 ha. Lediglich die äußeren südlichen und nördlichen Randbereiche (Friesenheimer Insel und Nördliche Flächen an Landesgrenze Hessen) sind als größtenteils unbelastet einzustufen. Die wenigen belasteten Flächen auf der Friesenheimer Insel werden zwar wahrscheinlich zu einer PFAS-Verunreinigung des Grundwassers führen, in diesen Bereichen sind aber keine Grundwasserentnahmen bekannt, sodass sich eine geringere Dringlichkeit der Bearbeitung ergibt.

Im Zentrum des Untersuchungsgebietes existieren die am höchsten belasteten Flächencluster. Hierzu zählt insbesondere der Bereich C und etwas nachgestuft die Bereiche A, B, D, E und F. Bei einer bevorzugten Bearbeitung des Bereichs C (42,2 ha) mit den größten Belastungen und Konzentrationen von Hot-Spot Flächen würde das Zentrum der flächenhaften Belastungen gezielt angegangen. In diesen haben schon PFAS-Sickerwasserdurchbrüche in das Grundwasser stattgefunden und das Grundwasser weist hier schon erhöhte PFAS-Konzentrationen mit Überschreitungen der Quotientensumme 1 auf.

Es ist jedoch noch unklar, in welcher Abfolge und Intensität die PFAS-Sickerwasserdurchbrüche insgesamt aus den flächigen Belastungen in das Grundwasser stattfinden werden. Dies wird von der Quellstärke der Belastungen und der variierenden retardierenden Wirkung des Untergrundes je nach lokalem Schichtaufbau abhängen.

Es wird daher vorgeschlagen, vor einer endgültigen Festlegung von Priorisierungen in einem ersten Schritt Detailuntersuchungen auf exemplarischen Belastungsflächen durchzuführen. Diese haben das Ziel, die erforderlichen Daten zur Quellstärke und zur Sickerwasserprognose zu erfassen. Die Sickerwasserprognosen sollen dann auf die Fläche übertragen werden. In Abhängigkeit der Ergebnisse ist danach im Sinne der Detailuntersuchung eine flächenbezogene Gefährdungsanalyse durchzuführen und das anschließende Vorgehen festzulegen.

10 Bewertung und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Nach den Untersuchungsergebnissen ist daher davon auszugehen, dass bei den Flächen mit einer Überschreitung der GFS- oder/und der GOW-Werte am Ort der Probenahme sich diese Werte jetzt oder in absehbarer Zukunft auch am Ort der Beurteilung und im Grundwasser zeigen werden. Es sind rund 565 ha betroffen. Für diese Flächen besteht ein hinreichender Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung und es sind nach § 9 Absatz 2 BBodSchG weitere Sachverhaltsermittlungen (Detailuntersuchungen) durchzuführen.

Wegen der Überschreitungen der GFS und der QS im Grundwasser sowie der betroffenen Nutzungen (Eigenwasserversorgungen, landwirtschaftliche Bewässerung) ist außerdem eine schädliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit zu vermuten.

Eine gleichzeitige Durchführung von getrennten Detailuntersuchungen für die belasteten Einzelflächen ist wegen der Größe der Belastung nicht zielführend und wegen der sich überlagernden Schadstofffahnen im Grundwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mit verhältnismäßigem Aufwand durchführbar.

Es wird deshalb eine integrale Detailuntersuchung (DU) empfohlen. Eine Priorisierung von Untersuchungsbereichen wäre zwar prinzipiell anhand der Belastungsgrade möglich, es fehlen aber noch Daten, die eine solche priorisierte Bearbeitung sicher begründen lassen würden. Es ist noch unklar, in welcher Abfolge und Intensität die PFAS-Sickerwasserdurchbrüche insgesamt aus den flächigen Belastungen in das Grundwasser stattfinden werden. Es fehlen zu diesen Sickerwasserprognosen noch Daten.

Es wird vorgeschlagen, diese Daten mit Detailuntersuchungen von exemplarischen Flächen durchzuführen. Anschließend sollten die Prognosen in Abhängigkeit der Belastungsgrade und Untergrundverhältnisse auf die Gesamtfläche skaliert werden.

Für die Auswahl exemplarisch zu untersuchender Flächen bieten sich die 12 Belastungsflächen an, bei denen im Rahmen der Orientierenden Untersuchung schon in den Jahren 2017/2018 vertiefenden technische Untersuchungen stattfanden:

- BB7,
- GE 62,
- E 50,
- HF 02,
- WI,
- Gr,
- Mi,
- BB (BB02),
- BI,
- FÖW 1,
- FÖW 2,
- NAW.

Elf dieser zwölf Flächen sind bei der vorliegenden Auswertung als Hot-Spot Flächen definiert worden. Einzig die Fläche HF02 fällt nicht in diese Kategorie.

11 Zusammenfassung

In Mannheim - Sandhofen findet seit dem Jahr 2015 wegen des Verdachts einer PFAS-Belastung der Ackerflächen eine Orientierende Untersuchung des Bodens und des Grundwassers statt. Wegen der flickenteppichartigen Verteilung der Belastung bestand für das Gesamtgebiet ein Gefahrenverdacht. Inzwischen ist im Frühjahr 2023 das komplette Untersuchungsgebiet mit rund 1.380 ha beprobt. Bei rund 41 % der untersuchten Fläche wurde eine PFAS-Belastung mit Überschreitung der GFS- und teilweise der GOW-Werte am Ort der Probenahme festgestellt.

Zum Abschluss der Erkundungen war eine integrale Beurteilung der flächenhaften schädlichen Bodenveränderung, die sich aus den Einzelflächenkonglomeraten zusammensetzt, durchzuführen. Nach der Auswertung der Untersuchungsergebnisse besteht für die belasteten Flächen ein hinreichender Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung und es sind nach § 9 Absatz 2 BBodSchG weitere Sachverhaltsermittlungen (Detailuntersuchungen) durchzuführen. Wegen der Überschreitungen der GFS und der QS im Grundwasser sowie der betroffenen Nutzungen (Eigenwasserversorgungen, landwirtschaftliche Bewässerung) ist eine lokale schädliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit bereits eingetreten.

Nach der integralen Auswertung lassen sich die äußeren südlichen und nördlichen Randbereiche (Friesenheimer Insel und Nördliche Flächen an Landesgrenze Hessen) als größtenteils unbelastet einzustufen. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes existieren die am höchsten belasteten Flächencluster. Hierzu zählt der Bereich C und etwas nachgestuft die Bereiche A, B, D, E und F.

Eine Priorisierung von Untersuchungsbereichen wäre zwar prinzipiell anhand der Belastungsgrade möglich, es ist aber noch unklar, in welcher Abfolge und Intensität die PFAS-Sickerwasserdurchbrüche aus den flächigen Belastungen in das Grundwasser stattfinden werden. Zu diesen Sickerwasserprognosen fehlen noch Daten.

Es wird vorgeschlagen, diese Daten mit Detailuntersuchungen von exemplarischen Flächen zu erfassen und danach die Prognosen auf die Gesamtfläche zu skalieren. Für die Auswahl exemplarisch zu untersuchender Flächen bieten sich die 12 Belastungsflächen an, bei denen schon in den Jahren 2017/2018 vertiefenden technische Untersuchungen stattfanden.