

Ermittlung und Minderung von Mikroplastik- und Schadstoffemissionen von Kunststoffrasen- Sportplätzen – MiMiK

Abschlussbericht



Quelle: eigene Aufnahme, Sportplatz VFL Sittensen

Konsortialführung



Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Str. 58-60
47229 Duisburg

**Dr. rer. nat. Carmen Wolf, M. Sc. Aline-Kathrin Andert,
Dr. rer. nat. Mike Wenzel*, Dr. rer. nat. Jochen Türk*,
M. Sc. Laura Pruin*, Dr. rer. nat. Christine Kube**

Tel.: 02065 418 209

E-Mail: wolf@iuta.de; mikroplastik@iuta.de

* die Mitarbeitenden haben Teile der Arbeiten durchgeführt, sind aber nicht mehr am IUTA beschäftigt

Kooperationspartner

Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH



Stiftstraße 12
30159 Hannover

Dr.- Ing. Dieter Grotehusmann

Tel.: 0511 70 139 - 13

E-Mail: grotehusmann@ifs-hannover.de

VfL Sittensen von 1904 e.V.



Scheeßeler Straße 1
27419 Sittensen

Egbert Haneke

Tel.: 04282 509991

E-Mail: vorstand@vfl-sittensen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	10
2	Einleitung.....	12
2.1	Mikroplastik – Definition und Auswirkungen.....	12
2.2	Kunststoffrasenplätze.....	14
2.2.1	Aufbau von Kunstrasen	14
2.2.2	Freisetzung von Kunstrasenflächen	15
2.2.2.1	Spurenstoffe	16
3	Forschungsziel	16
4	Material und Methoden	17
4.1	Auswahl der Sportanlagen	17
4.1.1	VFL Sittensen – Kunstrasenplatz Niedersachsen.....	17
4.1.2	Weitere Sportplätze	19
4.2	Probenahme, Probenvorbereitung und Analyse.....	20
4.2.1	Probenahme der Wasserproben für die Mikroplastikanalytik.....	20
4.2.1.1	VFL Sittensen	20
4.2.1.2	Probenahme andere Sportplätze	21
4.2.1.3	Probenahme der Wasserproben für die Schwermetall- und Spurenstoffanalytik....	24
4.2.1.4	Probenahmezeiträume, Wassermengen in Sittensen, Abflussverhältnisse / Entwässerung über die Kanalisation	24
4.2.1.4.1	Probenahmezeiträume	24
4.2.1.4.2	Wassermengen in Sittensen (Betrieb und hydraulische Auswertungen der Versuchsanlage Sittensen)	25
4.2.1.4.3	Abflussverhältnisse/Entwässerung über die Kanalisation	26
4.2.2	Bodenprobenahme	26
4.2.3	Luftprobenahme.....	29
4.2.4	Probenvorbereitung der Wasserproben	29
4.2.4.1	Korbsiebfilter	30
4.2.4.2	Planktonnetze.....	30
4.2.4.3	Bechergläser	30
4.2.5	Probenvorbereitung der Bodenproben.....	31
4.2.6	Probenvorbereitung der Luftproben.....	32
4.3	Analysemethoden	32
4.3.1	Bestimmung der Mikroplastikkonzentration mittels Gravimetrie	32
4.3.2	Bestimmung der Mikroplastikkonzentration mittels TED-GC-MS.....	32
4.3.3	Identifizierung und Quantifizierung der Polymere.....	35
4.3.4	Nachweis der Spurenstoffe und Elemente.....	36

5	Ergebnisse	39
5.1	Ergebnisse der Materialcharakterisierung	39
5.1.1	Faser/Filament.....	39
5.1.2	Naht	40
5.1.3	Teppich	41
5.1.4	Beschichtung	42
5.1.5	Laufbahn-Granulat	44
5.1.6	Naturmaterial-Infill.....	44
5.1.7	Filtersubstrat	46
5.1.8	Granulat-Gemisch.....	46
5.1.9	Gummigranulat	46
5.2	Ergebnisse der Untersuchungen der verschiedenen Probenmatrices.....	48
5.2.1	Wasserproben	48
5.2.1.1	Mikroplastik.....	49
5.2.1.2	Spurenstoffe und Elemente.....	51
5.2.2	Bodenproben.....	55
5.2.3	Luftproben.....	57
6	Diskussion.....	59
6.1	Bewertung der Ergebnisse	59
6.1.1	Vergleich der Mikroplastikemission der verschiedenen Abläufe beim VFL Sittensen..	59
6.1.2	Vergleich der Mikroplastikemission zwischen den Standorten	60
6.1.2.1	Einfluss technischer und standortspezifischer Faktoren für die Reduzierung der Mikroplastik Emission.....	61
6.1.2.2	Hauptaustragspfade von Mikroplastik und Einfluss der Standortbedingungen	62
6.1.3	Bewertung der Spurenstoffemission.....	63
6.2	Abweichungen vom Antrag und ergänzende Bewertung	66
6.2.1	Bewertung der Effizienz einer modernen Aufbereitungsanlage in Abhängigkeit von der Partikelgrößenverteilung.....	66
6.2.2	Einschränkungen bei der Standortauswahl und Probenanzahl	66
6.2.3	Durchführung der Luftmessungen	66
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Alt- und Neuanlagen	68
8	Trouble Shooting und sonstige Hinweise	69
8.1	Überflutung des Probenahmekellers	69
8.2	Datenerfassung und Füllstandsmessung.....	70
8.3	Störstoffe und Materialeintrag nach Systeminstallation	70
8.4	Ungleichmäßiger Wasserabfluss und Füllvolumina	70
8.5	Niederschlagsabhängige Probenverfügbarkeit	70

8.6	Erfassung der Niederschlagsmenge auf Kunstrasenplätzen im Zusammenhang mit Infillverlusten.....	70
8.7	Zusammenfassung.....	71
9	Öffentlichkeitsarbeit.....	71
9.1	Vorträge.....	71
9.2	Poster	71
10	Literatur.....	72
11	Anlage.....	78
11.1	Auswertungen der Wasserstände und Abflüsse Sittensen	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau eines Kunststoffrasen-Systems. Quelle: eigene Abbildung	14
Abbildung 2:	Fotos vom Bau des Probenahmekellers	17
Abbildung 3:	Beprobte Flächen und Probenahmekeller der Sportanlagen VFL Sittensen (Datengrundlage: Geobasisdaten Niedersachsen). KR = Kunstrasen, LB = Laufbahn. Behandelt = mit Filtrationseinheit, unbehandelt = ohne Filtrationseinheit.....	18
Abbildung 4:	Ablaufrinne der beprobten Flächen der Sportanlagen VFL Sittensen. Links die Ablaufrinne der Laufbahn, rechts die Ablaufrinne des Kunstrasenfeldes.....	19
Abbildung 5:	Foto des besichtigten Hockeyplatzes. Hier wird kein Infill benutzt. Quelle: eigene Aufnahme.	20
Abbildung 6:	Probenahmekeller mit Edelstahlbehälter zur Sammlung der Wasserproben, Sittensen	21
Abbildung 7:	Wasserprobenahme mittels Filtration. Links: 10 µm Korbfilter Mitte: Wasserzähler und Rotationspumpe Rechts: zur Sammlung verwendeter Edelstahlbehälter.....	21
Abbildung 8:	„Granulatfällor“ nach Anderson (https://saltex.eu/sv/granulatfallor-dagvattenbrunnar ; Zugriff 26.10.2025).	22
Abbildung 9:	Fotos der einzelnen Probenahmen von links nach rechts: Hessen 1, Hessen 2, NRW 2 Ablaufrinne mit Gully, Netz und Becherglas im Gully der Ablaufrinne (die Probenahme in NRW 3 und NRW 4 erfolgte nach demselben Prinzip). Quelle: eigene Aufnahmen	22
Abbildung 10:	Fotos des Auffangkorbes und des Gullys vom Kunstrasenplatz NRW 3.....	23
Abbildung 11:	Foto eines angebrachten Planktonnetzes an den Drainage Auslauf des Sportplatzes Sittensen	23
Abbildung 12:	Auswertung der Abflussbeiwerte für die einzelnen beprobten Flächen VfL Sittensen (17 Zeiträume von Februar 2023 bis August 2025)	26
Abbildung 13:	Fotos der Böden in 4 Metern Entfernung zum Spielfeldrand in NRW 4 (li) und Sittensen (re). Die Pfeile kennzeichnen Mikroplastikpartikel. In NRW 4 konnte das Infill-Material identifiziert werden; in Sittensen war es vor allem das Material der Laufbahn.	27
Abbildung 14:	Foto der Bodenprobenahme in 4 m Entfernung zum Spielfeldrand des Sportplatzes NRW 2; zu sehen ist der Split Tube Sampler.	27
Abbildung 15:	eingezeichnete Flächen der Bodenprobenahme beim VFL Sittensen. X1 kurz nach Inbetriebnahme des Sportplatzes, X2 = zweite Probenahme 2025. X3 = Fotos des Bodens zwischen den beiden Kunstrasenflächen, 3 m von der Laufbahn entfernt. Quelle des Luftbildes: Geobasisdaten Niedersachsen	28
Abbildung 16:	PM ₁₀ -Sammlung am Sportplatz Sittensen mit einem Kleinfiltergerät der Marke Comde Derenda.	29
Abbildung 17:	Fotos der Planktonnetze nach der Beprobung.....	30
Abbildung 18:	Foto des Becherglases nach der 2 Probenahme ohne Planktonnetz von Sportplatz NRW 2	31
Abbildung 19:	Prinzip der TED-GC-MS Analyse.....	33
Abbildung 20:	Materialien aus Kunststoffrasensystemen aus Sittensen und das Gummigranulat eines weiteren Sportplatzes.	35
Abbildung 21:	Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 55 der Marker von PE bei einer Pyrolysetemperatur von 500 °C. Es wurden 70 µg der Faser gemessen.....	39
Abbildung 22:	Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 105, 150 und 122 der Marker von PET bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 113 µg der Naht gemessen.	40

Abbildung 23:	Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 111 der Marker von PP bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 106 µg des Teppichs gemessen.	41
Abbildung 24:	Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 89, 103 und 101 der Marker von PUR bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 59 µg der Beschichtung gemessen. ..	43
Abbildung 25:	Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 135 des Markers von EPDM bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 108 µg des Laufbahn-Materials gemessen.	44
Abbildung 26:	Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 138, 150 und 135 der Marker von Kork bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 88 µg von dem Naturmaterial-Infill gemessen.	45
Abbildung 27:	Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 135 des Markers von EPDM bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 92 µg von dem Granulat-Gemisch gemessen.	46
Abbildung 28:	Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 104 und 158 des Markers von SBR bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 98 µg des Gummigranulates gemessen.	47
Abbildung 29:	Menge Infill in den untersuchten Bodenproben, blaue Säulen in 4 m Entfernung zum Kunstrasenplatz, orange Säulen in 8 m Entfernung zum Kunstrasenplatz.	56
Abbildung 30:	Foto des angrenzenden Bodens von Kunstrasenplatz NRW 3, eigene Aufnahme	56
Abbildung 31:	REM-Aufnahmen eines unbelegten (links) und des beaufschlagten Filters(rechts) im direkten Vergleich.	57
Abbildung 32:	REM-Aufnahmen eines Partikels der möglicherweise ein Bruchstück des Kunstrasens darstellt.	58
Abbildung 33:	Lichtmikroskopische Aufnahme des Partikels aus Abbildung 32 (links) sowie dieselbe Probenstelle nach der Raman-Spektroskopie (rechts). Das Partikel ist nicht mehr vorhanden.	58
Abbildung 34:	Mikroplastikkonzentration in µg/L (Bestimmung mittels TE-GC-MS) für die vier verschiedenen Abläufe des VFL Sittensen.	60
Abbildung 35:	Infill Konzentration der 3 Sportplätze aus NRW (Masse gravimetrisch bestimmt).	61
Abbildung 36:	Fläche neben der Laufbahn des VFL Sittensen (li), Boden in unmittelbarer Nähe der Laufbahn (re)	61
Abbildung 37:	Fotos des Kunstrasenplatzes des Standortes NRW 4	62
Abbildung 38:	Fotos des Probenahmekellers nach einer Überflutung. Der Keller war bis etwa 1,50 m Höhe komplett mit Wasser gefüllt.	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung ausgewählter Daten aus der Konsortialstudie des Fraunhofer- Institut Umsicht (Bertling et al., 2018), Daten sind gerundet, Sport- und Spielplätze fett hervorgehoben	13
Tabelle 2:	Beprobte Teilflächen der Sportanlage des VfL Sittensen	19
Tabelle 3:	Weitere Sportanlagen	20
Tabelle 4:	Details der Wasserprobenahme, LB = Laufbahn, KU = Kunstrasen unbehandelt, KB = Kunstrasen behandelt, D = Drainage. Die Werte aus Hessen und NRW wurden auf Basis der Regendaten der Wetterstationen in der Nähe der Sportplätze abgeschätzt.	24
Tabelle 5:	Abflüsse und Abflussverhältnisse Sportanlage VfL Sittensen	25
Tabelle 6:	Probenahmezeitpunkte der Bodenprobenahme	28
Tabelle 7:	Verwendete GC-MS Parameter bei der Analyse mittels TED-GC-MS.	34
Tabelle 8:	Verwendete TGA-Parameter bei der Analyse mittels TED-GC-MS.	35
Tabelle 9:	Übersicht über die verwendeten (Referenz-)Materialien.	36
Tabelle 10:	Auflistung der zu analysierenden Substanzen mit Bestimmungsgrenze und Messunsicherheit (ermittelt im Unterauftrag).....	37
Tabelle 11:	Auflistung der zu analysierenden Substanzen mit Informationen zur eindeutigen Identifizierung.....	37
Tabelle 12:	PFAS mit Angaben zur analytischen Bestimmungsgrenze (SPE mit Faktor 100) und Messunsicherheit.	38
Tabelle 13:	Untersuchte Elemente mit Angaben zur analytischen Bestimmungsgrenze und Messunsicherheit, ermittelt für Fließ- und Oberflächengewässer, mittels ICP-MS....	38
Tabelle 14:	Übersicht der für die Quantifizierung der Faser verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	40
Tabelle 15:	Übersicht der für die Quantifizierung der Naht verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	41
Tabelle 16:	Übersicht der für die Quantifizierung der Teppich verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	42
Tabelle 17:	Übersicht der für die Quantifizierung der Beschichtung verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	43
Tabelle 18:	Übersicht der für die Quantifizierung des Laufbahn-Materials verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeit und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	44
Tabelle 19:	Übersicht der für die Quantifizierung des Kork-Infills verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	45
Tabelle 20:	Übersicht der für die Quantifizierung des Gummi-Granulates verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.	47
Tabelle 21:	Ergebnisse der Mikroplastikanalysen mittels TED-GC-MS und gravimetrisch, Probenahme über Kaskadenfiltration/ 1. Messserie, Alle Proben wurden in Sittensen genommen.....	49

Tabelle 22:	Bestimmungsgrenzen für die einzelnen Polymere für die TED-GC-MS-Analysen, ermittelt für die Werte der 1. Messserie.....	49
Tabelle 23:	Ergebnisse der Mikroplastikanalysen mittels TED-GC-MS und gravimetrisch, Probenahme über Kaskadenfiltration oder Planktonnetze / 2. Messserie. Alle Proben mit einer LR-Nummer sind in Sittensen genommen worden. Die beiden Proben aus Hessen sind zu besserer Unterscheidung ohne LR-Nummer angegeben worden,	50
Tabelle 24:	Bestimmungsgrenzen für die einzelnen Polymere für die TED-GC-MS-Analysen, ermittelt für die Werte der Tabelle 23 / 2. Messserie.....	50
Tabelle 25:	Ergebnisse der Mikroplastikanalyse mittels Gravimetrie. Bezogen wurden die Werte auf die berechnete abgeflossene Regenmenge für den beprobten Gully.	51
Tabelle 26:	PAK-Ergebnisse ausgewählter Proben	51
Tabelle 27:	PFAS-Ergebnisse ausgewählter Proben	52
Tabelle 28:	PFAS-Ergebnisse ausgewählter Proben	53
Tabelle 29:	PFAS-Ergebnisse ausgewählter Proben	53
Tabelle 30:	Element-Ergebnisse ausgewählter Proben (analysiert ICP/MS)	54
Tabelle 31:	<i>Element-Ergebnisse ausgewählter Proben (analysiert ICP/MS)</i>	55
Tabelle 32:	Auszug der Grenzwerte für PAK, PFC und Metalle gemäß TrinkwV.....	64
Tabelle 33:	Auszug der Grenzwerte für Metalle gemäß Grundwasserverordnung, GrwV.	65
Tabelle 34:	Auszug der Grenzwerte für PAK, PFC und Metalle gemäß Oberflächengewässerverordnung, OGewV; Werte der UQN (Umweltqualitätsnorm), Anhang 8.....	65

1 Zusammenfassung

Kunstrasensysteme stehen zunehmend im Fokus der Umweltforschung, da sie als potenziell bedeutende Quelle für Mikroplastikemissionen gelten. Neben der Freisetzung von polymerbasierten Partikeln können aus den verwendeten Materialien auch Spurenstoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sowie Metalle freigesetzt werden. Es herrscht große Unsicherheit darüber, welche Mengen Plastikpartikel von den Kunstrasenplätzen freigesetzt werden, ob die Freisetzung von der Nutzungsart und -intensität oder vom Alter des Platzes abhängig ist und über welche Austragspfade die Partikel emittiert werden.

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war daher, die Frachten von Mikroplastik und gewässerrelevanten Spurenstoffen darunter PAKs und Schwermetalle, die aus Kunststoffrasen-Systemen in die Umwelt freigesetzt werden können, zu ermitteln.

Der Fokus lag sowohl auf modernen Sportplätzen wie er beim VfL Sittensen verfügbar ist, als auch auf unterschiedlichen Altanlagen. Der Sportplatz des VfL Sittensen wurde ausgewählt, weil er über technische Minderungsmaßnahmen, eine Filtration partikulärer Schadstofffrachten, für Teilflächen des Kunstrasenplatzes verfügt. Es wurden vier Ablaufvarianten untersucht: Kunstrasen unbehandelt, Kunstrasen behandelt (mit Filtersubstrat), Laufbahn behandelt (mit Filtersubstrat) sowie die Drainage. Die behandelten Abläufe waren mit einem speziellen Filtersubstrat ausgestattet, das der Rückhaltung von Mikropartikeln und Spurenstoffen diene.

Die weiteren Kunstrasenplätze lagen in Hessen und Nordrhein-Westfalen. Bei diesen Plätzen wurden Drainageproben (Hessen) sowie Proben aus den Gullys der Ablaufrinnen entnommen oder die Drainage beprobt welche direkt in die Umwelt entwässerte.

An die örtlichen Gegebenheiten der einzelnen zur Untersuchung ausgewählten Kunstrasenplätze wurden angepasste Probenahmesysteme (Kaskadenfiltration, Sedimentationskästen, Planktonnetze in Anlehnung nach Anderson, Bechergläser) für die repräsentative Beprobung der Wasserpfade ausgewählt, eingesetzt und optimiert. Parallel dazu wurden für die typischen in Kunstrasensystemen eingesetzten Materialien (Teppich, Nähte, Fasern, Infill) mit Hilfe der thermischen Extraktion und Desorption gekoppelt mit Gaschromatographie und Massenspektrometrie (TED-GC/MS) spezifische Pyrolyseprodukte ermittelt und in einer Materialcharakterisierung zusammengefasst. Zusätzlich erfolgten die Bestimmungen von PAK, PFAS und Metallen nach einschlägigen DIN-Methoden in ausgewählten Proben durch nach DIN EN ISO 17025:2018¹ akkreditierte Untersuchungsstellen.

Neben Wasserproben zur Bestimmung der Mikroplastik- und Schadstofffracht wurden an ausgewählten Plätzen auch Bodenproben genommen und untersucht. Die Probenahme erfolgte adäquat wie beim UBA-Vorhaben Hintergrundwerte für PFAS und (Mikro)Kunststoffe – bundesweite Beprobung von landwirtschaftlich genutzten Böden (FKZ 3720 72 288 0).

Zur Überprüfung des Transportes von Fasern oder kleinsten Partikeln durch die Luft wurde in Sittensen PM10 Messung durchgeführt.

Die Proben wurden zur Bestimmung der Mikroplastikfracht entweder nach aufwändiger Probenvorbereitung am TED-GC-MS untersucht. Bei bereits optisch erkennbaren und damit großen Mengen an Fasern oder Infill, sind diese Materialien händisch aussortiert und gewogen worden.

¹ DIN EN ISO 17025:2018: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

Ergebnisse

In fast allen wässrigen Proben und Bodenproben waren Partikel und/oder Fasern, die eindeutig auf den Austrag aus dem Kunstrasensystem zurückgeführt werden können, nachweisbar. In der Luftprobe des VFL Sittensen konnte kein Mikroplastik nachgewiesen werden.

Die gemessenen Konzentrationen des freigesetzten Infills in den wässrigen Matrices am Referenzstandort Sittensen waren etwa um den Faktor 1000 geringer als an den untersuchten Standorten in NRW. Für die nordrhein-westfälischen Plätze konnte ein Zusammenhang zwischen der Infill-Freisetzung, dem Alter der Kunstrasenflächen sowie der Niederschlagsmenge festgestellt werden. Insbesondere bei Starkregenereignissen wurde ein deutlich erhöhter Austrag von Infill beobachtet. Für die Freisetzung von Fasern ließ sich hingegen keine signifikante Korrelation mit dem Alter der Plätze oder den Niederschlagsmengen nachweisen.

In Sittensen zeigte sich, dass die behandelten Abläufe keine nachweisbaren Materialeinträge mehr aufwiesen. Im Verlauf des Projekts wurde in der Drainage ein Anstieg der Infill-Konzentration festgestellt, während im unbehandelten Kunstrasenablauf vermehrt Fasern detektiert wurden.

Die Konzentrationen der PAK lagen in allen Proben unterhalb der Nachweisgrenzen. Schwermetalle – insbesondere Zink – wurden in allen Proben nachgewiesen, blieben jedoch deutlich unterhalb der geltenden Grenzwerte. PFAS wurden an sämtlichen Standorten in niedrigen Konzentrationen detektiert. Die mit Filtersubstrat ausgestatteten Abläufe in Sittensen zeigten darüber hinaus eine merkliche Reduktion der Konzentration einiger Metalle (Eisen und Zink). Für die organischen Spurenstoffe (PFAS) gab es keine Zusammenhänge oder Abhängigkeiten von der Ausstattung und vom Alter der Kunstrasenplätze.

Bei den Bodenproben wurde ein Zusammenhang mit dem Alter der Plätze (Zunahme der Konzentration in den Proben) und mit der Entfernung zum Platz (Abnahme der Konzentration) festgestellt werden.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass am Standort Sittensen die geringsten Mikroplastikemissionen gemessen wurden. Die Ergebnisse an den übrigen Standorten weisen darauf hin, dass sowohl das Alter der Kunstrasenplätze als auch die Intensität von Niederschlagsereignissen einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Infill-Freisetzung haben. Besonders Starkregenereignisse führen zu einer signifikanten Erhöhung der Emissionen. Für die Freisetzung von Fasern konnte dagegen kein eindeutiger Zusammenhang mit den untersuchten Parametern festgestellt werden.

Es konnte auch gezeigt werden, dass die Freisetzung nicht über das Drainagesystem erfolgt. Die gemessenen Mikroplastikemissionen sind eher ein Problem des oberirdischen Austrags durch Rinnen- und Gullysysteme.

2 Einleitung

2.1 Mikroplastik – Definition und Auswirkungen

Als Kunststoff wird ein Material bezeichnet, dessen Grundbestandteile synthetisch oder halbsynthetisch erzeugte Polymere aus organischen Substanzen mit unterschiedlichen funktionellen Gruppen sind. Polymere bestehen aus Monomeren, die durch Polykondensation oder Polyaddition zu sich wiederholenden Struktureinheiten verbunden sind. Die makromolekulare Struktur bestimmt die mechanischen und thermischen Eigenschaften. Sie werden in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere unterteilt (Połowiński, 2002; Manas, et al., 2018).

Bei den Thermoplasten handelt es sich um lineare oder verzweigte Makromoleküle, die nicht miteinander vernetzt sind. Diese sind bei Raumtemperatur hart, erweichen aber bei Erwärmung, wodurch sie reversibel verformbar sind. Zu den Thermoplasten gehören amorphe Kunststoffe wie Polystyrol (PS) und Polymethylmethacrylat (PMMA) oder teilkristalline Kunststoffe wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP).

Duroplaste bestehen aus engmaschig vernetzten Makromolekülen, die ebenfalls bei Raumtemperatur hart sind. Anders als bei den Thermoplasten erweichen Duroplaste nicht bei hohen Temperaturen, sondern zersetzen sich. Zu den Duroplasten zählen unter anderem Silikone und Polyurethan (PUR).

Bei den Elastomeren handelt es sich um weitmaschig vernetzte Makromoleküle, die bei Raumtemperatur elastisch sind und bei tiefen Temperaturen spröde werden. In diese Kategorie lassen sich Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) und Ethylen-Propylen-Dien-Monomer-Kautschuk (EPDM) einordnen.

Aufgrund ihrer vielseitigen Materialeigenschaften und geringen Herstellungskosten werden Kunststoffe für unzählige Anwendungsmöglichkeiten eingesetzt (Plastics Europe, 2022). Mit dem verbreiteten Einsatz von Kunststoffen ist allerdings auch eine Emission in die Umwelt verbunden (Li, et al., 2021). Kunststoffe können gezielt in die Umwelt ausgebracht werden, zum Beispiel beim Einsatz von Mulchfolien in der Landwirtschaft oder als Fraßschutz bei Jungbäumen, als Bojen im Wasser, etc. Sie können aber auch ungezielt in die Umwelt gelangen, zum Beispiel durch Littering (Lechthaler, et al., 2020) oder durch den Zerfall von Kunststoffprodukten, bei dem nicht abbaubare Fragmente zurückbleiben und die Natur belasten. Aufgrund ihrer außergewöhnlichen Beständigkeit verbleiben Kunststoffe über Jahrhunderte hinweg in natürlichen Ökosystemen. Dies führt zu einer fortschreitenden Anreicherung von Kunststoffabfällen sowohl in aquatischen als auch in terrestrischen Lebensräumen (Hurley et al., 2020; Isangedighi et al., 2020; Islam et al., 2023).

Wenn die Kunststoffe in der Umwelt verbleiben, unterliegen sie verschiedenen physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen, welche abhängig von den äußeren Bedingungen und dem Kunststofftyp zu einer Fragmentierung in immer kleiner werdende Partikel bis hin zu sogenanntem Mikroplastik führen können (Pinlova & Nowack, 2023; Maddison, et al., 2023). Großes Mikroplastik weist eine Partikelgröße von 5 mm bis 1 mm auf, kleines Mikroplastik hat eine Größe von < 1 mm bis 1 µm und Nanoplastik < 1 µm. Des Weiteren kann zwischen primärem und sekundärem Mikroplastik unterschieden werden (Cole, et al., 2011; Lamichhane, et al., 2023). In die Kategorie primäres Mikroplastik fallen Plastikpartikel, die entweder für den direkten Gebrauch oder als Ausgangsstoff für andere Produkte hergestellt werden. Sekundäres Mikroplastik entsteht durch physikalische und chemische Fragmentierungsprozesse aus Makroplastik (> 5 mm).

Mikroplastikpartikel sind omnipräsent und wurden bereits in Seen abgelegener Bergregionen (Negrete Velasco, et al., 2020), in Wüsten (Abbasi, et al., 2021) sowie in den Polarregionen der Arktis und Antarktis (Pakhomova, et al., 2022) identifiziert.

Aufgrund ihrer Größe lassen sich Mikroplastikpartikel aus der Umwelt, insbesondere aus offenen Ökosystemen, wie Ozeanen oder Flüssen, nach dem heutigen Stand der Technik praktisch nicht entfernen, so dass ein Eintrag dieser Partikel in die Umwelt vermieden werden muss.

Nicht nur Mikroplastikpartikel selbst stellen ein Umweltproblem dar - auch zugesetzte Additive und enthaltene Monomere können sich verflüchtigen oder durch Auswaschung aus dem Kunststoff freigesetzt werden (Alabi, et al., 2019; Fries & Sühling, 2023; Bridson, et al., 2023). Darüber hinaus besitzen Kunststoffe die Fähigkeit, organische Schadstoffe aus der Umgebung zu adsorbieren und diese nach Aufnahme durch Organismen wieder freizusetzen (Wojnowska-Baryła et al., 2022; Li et al., 2023).

Um den Eintrag von (Mikro)Kunststoffen und damit verbundenen Spurenstoffen in die Umwelt wirksam zu minimieren, ist es unerlässlich, die relevanten Quellen zu identifizieren und gezielte Maßnahmen zur Emissionsminderung zu ergreifen.

In einer Studie des Fraunhofer-Instituts UMSICHT (Bertling et al., 2018) wurden potenzielle Quellen von Mikroplastikemissionen in Deutschland systematisch erfasst und hinsichtlich ihrer jährlichen Freisetzungsmengen quantifiziert. Neben dem Abrieb von Fahrzeugreifen, der Freisetzung bei der Abfallentsorgung, dem Abrieb bitumenhaltiger Asphaltbestandteile sowie dem Verlust industrieller Kunststoffpellets wurden auch Verwehungen von Kunststoffgranulaten von Sport- und Spielplätzen als relevante Emissionsquelle identifiziert. Letztere rangierten in der Studie als fünftgrößte Quelle für Mikroplastikeinträge in die Umwelt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenstellung ausgewählter Daten aus der Konsortialstudie des Fraunhofer- Institut Umsicht (Bertling et al., 2018), Daten sind gerundet, Sport- und Spielplätze fett hervorgehoben

Quelle	Emission / g/(cap a) ²
Reifenabrieb	1.230
Abfallentsorgung	300
Bitumenabrieb in den Asphalt	230
Pelletverluste	180
Verwehungen von Sport- und Spielplätzen	130 (97 von Fußballkunstrasenplätzen)
Baustellenfreisetzungen	120

Die Dimension der Umweltauswirkungen von Kunstrasenplätzen mit Mikroplastikemissionen von zirka 8.000 bis 11.000 Tonnen pro Jahr, die sich aus den Daten der Studie von Bertling et al. 2018 ergibt, ist erheblich. Die Forscher des Fraunhofer Institutes haben ihre Zahlen allerdings relativiert, da dieser Studie keine empirischen Daten zugrunde lagen, sondern die angegebenen Zahlen auf Basis von skandinavischen Studien hochgerechnet wurden (Bertling et al. 2018; Frühlingsdorf et al., 2019; Deutscher Bundestag 2020).

Andere Institutionen, wie die Gütegemeinschaft RAL und der Normungsausschuss DIN, nennen Werte zur Mikroplastikemission von Kunstrasenplätzen, die nur etwa einem Zehntel der Fraunhofer-Studie entsprechen (RAL Gütezeichen, 2019).

Nach Schätzungen der FIFA gehen aber 1 bis 4 Prozent des Infills jährlich verloren und können somit in die Umwelt gelangen. Ein Standard-Großspielfeld von 7000 m² benötigt ca. 30 Tonnen Gummigranulat, von dem nach der zuvor genannten Schätzung jährlich 0,3 bis 1,2 Tonnen / Platz in die Umwelt gelangen. Der entsprechende Anteil muss jedes Jahr ersetzt werden (FIFA, 2017). Bei mehr als 5000 Kunstrasenplätzen sind Mikroplastikemissionen von 1.500 bis 6.000 Tonnen pro Jahr möglich. Diese

² g/(cap a) = g pro capita (Person) und Jahr

Abschätzungen liegen somit in der Größenordnung der Fraunhofer Studie, was die Bedeutung von Kunstrasenplätze als Quelle für Mikroplastik unterstreicht.

2.2 Kunststoffrasenplätze

Kunststoffrasenplätze sind seit vielen Jahren ein integraler Bestandteil moderner Sportinfrastruktur. Insbesondere die witterungsunabhängige ganzjährige Nutzbarkeit, der geringe Pflegeaufwand, aber auch die kontinuierlich verbesserten Platzeigenschaften haben zu einer hohen Akzeptanz bei den Nutzern geführt (Fleming, et al., 2023).

2.2.1 Aufbau von Kunstrasen

Die Kunststoffrasen-Systeme werden im Allgemeinen aus vier Schichten aufgebaut, deren Materialien je nach Alter des Platzes variieren können **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** (Abbildung 1).

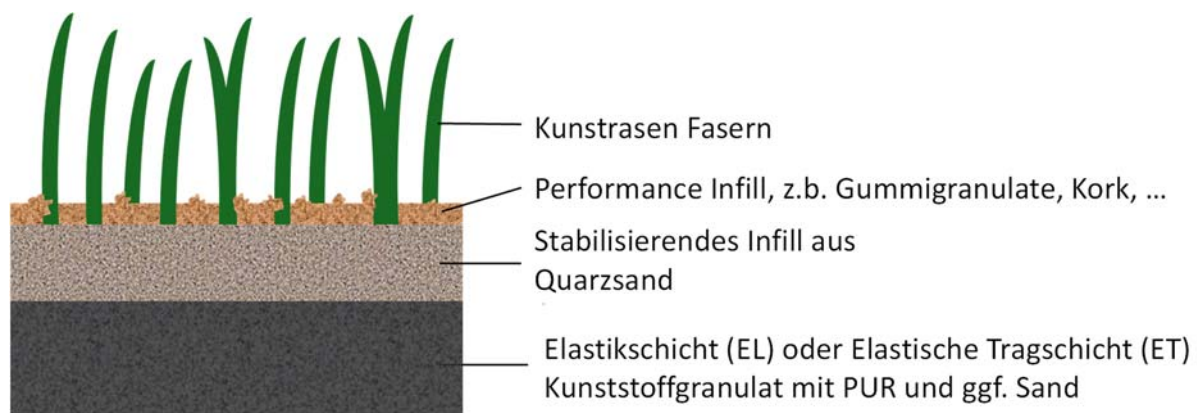


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Kunststoffrasen-Systems. Quelle: eigene Abbildung

Die oberste Schicht besteht aus synthetisch verarbeiteten Rasenfilamenten (in der Abbildung als Kunstrasen Fasern bezeichnet). Die Fasern aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyamid (PA) werden auf einem synthetischen Teppich getuftet und mit einer Beschichtung aus Latex oder Polyurethan (PUR) an der Rückseite fixiert. Die Teppichschicht hat einen begrenzten Einfluss auf die Roll- sowie Rücksprungeigenschaften des Balls des Spielfelds, da dessen Hauptfunktion darin besteht, eine stabile Basis für die Fasern bereitzustellen (Polytan GmbH, 2023). Üblicherweise werden die Faser-Filamente in zwei Arten unterteilt: fibrillierte und monofile Fasern. Monofilamente bestehen aus einzelnen Strängen, während die fibrillierten Fasern zuvor als Film aufgebaut sind, bevor sie geschnitten werden, um eine Wabenstruktur zu erzeugen. Im Vergleich mit der Teppichschicht beeinflussen die Eigenschaften der Fasern die Roll- sowie Rücksprungeigenschaften des Balls auf dem Spielfeld.

Für ein ungestörtes Ballrollverhalten und um vor Verletzungen zu schützen wird das sogenannte Performance-Infill eingebracht. Dessen Granulate können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Ursprünglich wurden für die Herstellung überwiegend Elastomere verwendet, aber auch recyceltes SBR aus Altreifen oder auch thermoplastische Elastomere (TPE) oder EPDM sind möglich. Aufgrund des Verbotes der Nutzung von Infill-Materialien aus Gummi in der EU ab 2031 sind in den letzten Jahren natürliche Füllmaterialien aus Kork, geschredderten Olivenkernen, Holz oder Sand vermehrt eingesetzt worden (van den Beuken, et al., 2023; Armada, et al., 2022).

Auf die Performance-Infill-Schicht folgt das stabilisierende Infill. Die Füllschicht sitzt in der Wurzelzone der Fasern und besteht aus Quarzsand. Der Sand beschwert den Rasenbelag, um ihn gegen Bewegung

und Verschiebung zu sichern. Darüber hinaus stabilisiert er die Fasern und schützt das Trägergewebe (Polytan GmbH, 2023).

Die unterste Lage ist die elastifizierende Schicht. Nach DIN 18035-7 sind derzeit die Elastikschicht (EL) oder die elastische Tragschicht (ET) für den Neubau von Kunststoffrasenplätzen zugelassen. Beide werden im Ortseinbauverfahren³ (in-situ-Verfahren) eingebaut und bestehen meist aus ELT-Granulat mit PUR als Bindemittel. Die EL kommt ohne mineralische Zuschläge aus und wird auf eine wasserdurchlässige Asphalttragschicht gebaut. Dahingegen enthält die ET Kiessand und ersetzt bei Bedarf einen Drainasphalt⁴. Durch den gleichmäßigen Kraftabbau sorgt die elastifizierende Schicht für gleichbleibende Spieleigenschaften und dient dem Schutz der Spieler (Polytan GmbH, 2023). In Kombination sorgt dieser Schichtaufbau für die Dämpfung und Weichheit des Kunststoffrasen-Systems (Stadionwelt, 2023).

Um die Aufrechterhaltung des Spielbetriebes zu sichern, wird ebenfalls die Entwässerung von Sportflächen geregelt. Die Vorgaben zur Wasserdurchlässigkeit der Schichten sind in der DIN 18035-7 angegeben. Es wird zwischen vertikaler und horizontaler Entwässerung unterschieden (Bertling, et al., 2021). Vertikal versickert das Wasser auf dem Platz durch die Schichten zur Drainage und zum Grundwasser. Neben dem Platz dienen Naturrasenflächen sowie Schächte und Rinnen ebenfalls der vertikalen Entwässerung von Niederschlägen. Schächte, Rinnen und Gullys dienen aber auch der horizontalen Entwässerung, indem sie Niederschläge von versiegelten Flächen erfassen und ableiten. Das erfasste Wasser wird über Schmutz- oder Regenwasserkanäle über Kläranlagen oder im ländlichen Raum über Gräben direkt in den Vorfluter geleitet.

2.2.2 Freisetzung von Kunststoffpartikeln

Doch mit dem Einsatz von Kunststoffen als Oberflächenbelag besteht die Gefahr der Freisetzung von Kunststoffpartikeln sowie von aus den eingesetzten Materialien stammenden Schadstoffen in die Umwelt. Dabei kann es zur Emission von sekundärem Mikroplastik durch Faserabrieb als auch von primärem Mikroplastik durch das Infill-Granulat kommen. Diese Partikel gelangen insbesondere bei Niederschlagsereignissen in den Wasserkreislauf oder werden in die angrenzenden Bodenbereiche der Sportanlagen eingetragen, wodurch lokale Umweltkompartimente belastet werden.

Eine weitere Freisetzung erfolgt über die Anhaftung von Plastikpartikeln und Fasern, die an der Kleidung der Spielenden haften bleiben und dadurch in die nähere Umgebung beim Verlassen des Platzes „verschleppt“ werden oder über die Wäsche in die Kläranlagen gelangen. Neben diesem Aspekt ist ebenfalls von einem Abrieb von Mikroplastikpartikeln von den „Rasenfilamenten“ auszugehen, welche in der Literatur kaum beachtet werden. In einer Studie von de Hann et al. 2023 konnte gezeigt werden, dass auch Rasenfilamente aus Kunststoffrasen-Systemen in die Umwelt getragen werden. Inwieweit luftgetragene Partikel durch Aufwirbelungen beim Spielbetrieb oder der Regeneration des Spielfeldes eine Rolle spielen, ist derzeit unbekannt.

Spezifische Daten über den Verlust an Granulaten durch Luftströmungen, durch Regen (an der Oberfläche des Platzes), durch das Entwässerungssystem oder durch die Nutzenden wurden weder eindeutig noch einheitlich erfasst. Unbestritten ist, dass durch Kunstrasenplätze Mikroplastik in die Umwelt gelangt. Es herrscht aber eine große Unsicherheit über die freiwerdenden Mengen, über Form und Größe der Plastikpartikel und vor allem über den Einfluss auf die Freisetzung selbst. Es ist ungeklärt, ob die Freisetzung von der Nutzungsart und -intensität oder vom Alter des Platzes abhängig

³ Ein Fußballplatz-Ortseinbauverfahren ([in-situ-Verfahren](#)) ist eine Methode zum Bau von Sportplätzen, bei der die Belagsschichten direkt vor Ort gemischt und verlegt werden.

⁴ Drainasphalt setzt sich aus einer Gesteinsmischung mit sehr geringem Sandanteil zusammen. Die enthaltenen Steine verkeilen sich gegeneinander und werden an ihren Berührungspunkten und -flächen durch [polymermodifiziertes Bitumen](#) als Bindemittel verklebt. Quelle: <https://www.bauprofessor.de/drainasphalt/>

ist, über welche Austragspfade die Partikel hauptsächlich emittiert werden und ob Filtrationsanlagen den Austrag minimieren können.

Mit der Freisetzung von Kunststoffpartikeln ist eine Freisetzung anderer schädlicher Spurenstoffe verbunden, die in der Regel schon in den Rohmaterialien vorhanden sind (Burkhardt et al. 2025). Neben polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs), schwerflüchtigen organischen Verbindungen (SVOCs) spielen auch Schwermetalle und PFAS eine relevante Rolle. Die Belastung der Kunstrasenplätze mit diesen Stoffen als zusätzlicher Expositionspfad und damit zusätzliches Expositionsrisiko für den Menschen wurde in den letzten Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen weltweit untersucht (Bleyer, 2017; Canepari, et al., 2018; Diekmann, et al., 2019; Gomes, et al., 2021; Massey, et al., 2020; Schneider et al., 2020a, Schneider et al., 2020b). Die Schadstoffaufnahme kann dermal, oral oder inhalativ erfolgen. So können insbesondere Granulate entweder versehentlich oder absichtlich verschluckt (Cheng, et al., 2014), VOCs und SVOCs können verdampfen und eingeatmet (Diekmann, et al., 2019), während Schwermetalle und weitere organische Schadstoffe über die Haut aufgenommen werden können (Pronk, et al., 2020; Gomes, et al., 2021). In der Studie von Schneider et al. wurden für Infill-Materialien aus ELT (Gummigranulat aus Altreifen) keine erhöhten gesundheitlichen Risiken beobachtet. Es ist jedoch ungeklärt, ob diese Ergebnisse auch auf andere Infill-Materialien übertragen werden können (Schneider et al., 2020c).

2.2.2.1 Spurenstoffe

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde im Jahr 2000 von der Europäischen Union eingeführt, um den Schutz und die nachhaltige Nutzung der Gewässer sicherzustellen. Ihr zentrales Ziel ist es, bis spätestens 2027 einen „guten ökologischen und chemischen Zustand“ aller Gewässer zu erreichen – dazu zählen Flüsse, Seen, Küstengewässer und das Grundwasser. Ziel der WRRL ist die Verbesserung der Qualität der Oberflächengewässer und des Grundwassers. Mikroplastik gewinnt auch in diesem Kontext immer mehr an Bedeutung, dennoch existieren zurzeit keine Grenzwerte für Mikroplastik. Anders ist es mit verschiedenen Spurenstoffen, deren Eintrag auch auf Kunstrasenplätze zurückgeführt werden kann. Dazu gehören PAKs, die aus dem Recycling von Altreifen für das Gummigranulat (Infill) stammen können, PFCs, die in Fasern oder in Beschichtungen eingesetzt wurden und verschiedene Metalle, die als Farbstoffe den verschiedenen Materialien zugesetzt wurden.

3 Forschungsziel

Ziel des Vorhabens war es, die Emissionen von Mikroplastik- und Spurenstoffen aus Kunststoffrasen-Systeme zu untersuchen und die Umweltrelevanz zu bewerten.

Im Mittelpunkt stand dabei die Bestimmung der Mikroplastik- sowie Spurenstoffbelastungen, die aus diesen Systemen freigesetzt werden können. Ein weiterer Schwerpunkt lag im Vergleich verschiedener Generationen von Kunstrasensystemen und Infill-Materialien, um Unterschiede im Emissionsverhalten zu identifizieren.

Darüber hinaus wurde der Einfluss regionaler Klima- und Witterungsbedingungen auf den Verlust von Mikroplastik untersucht, ebenso wie die Auswirkungen von Alterungsprozessen.

Zudem wurde die Wirksamkeit angewandter Reinigungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung und ihres Beitrags zur Emissionsminderung bewertet.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurden dann abschließend Handlungsempfehlungen für Minderungsmaßnahmen entwickelt, welche zu einer Reduzierung der Mikroplastik- und Spurenstoffeinträge aus Kunststoffrasen-Systemen beitragen sollen.

4 Material und Methoden

4.1 Auswahl der Sportanlagen

Um die oben aufgeführten Fragen beantworten zu können, wurden verschiedene Sportplätze ausgewählt und beprobt.

Der Fokus der Beprobung lag auf dem 2021 neu gebauten Kunstrasenplatz des Projektpartners VFL Sittensen, welcher zum Start des Projektes einen der modernsten Kunstrasenplätze in Deutschland darstellte. Das verwendete Infill-Material als auch das Rasenfilament des Platzes wurden dabei so gestaltet, dass ein Verlust in die Umwelt minimiert werden sollte. Der Sportplatz wurde somit als Referenzplatz ausgewählt und im Verlauf des Projektes mehrfach beprobt.

Die anderen Sportplätze wurden nach ihrem Alter und der Möglichkeit der Beprobung ausgewählt.

4.1.1 VFL Sittensen – Kunstrasenplatz Niedersachsen

Auf dem Kunstrasenplatz des VFL Sittensen wurde eigens für dieses Projekt ein Probenahmekeller gebaut in dem die Abläufe des Platzes und die Drainage beprobt werden konnten. In den Keller wurden etwa 1000 Liter fassende Metallbehälter eingebracht, welche das Wasser verschiedener Abläufe auffingen. So konnte über einen längeren Zeitraum das Wasser der Abläufe gesammelt werden.

Abbildung 2 zeigt den Bau des Probenahmekellers, welcher die Beprobung einzelner Abläufe ermöglichte.



Abbildung 2: Fotos vom Bau des Probenahmekellers

Des Weiteren wurde auf der Anlage eine Filteranlage installiert, welche den Ablauf einer Hälfte des Platzes behandelte, während die andere Hälfte des Ablaufs ungefiltert blieb (Abbildung 3). Kern der neuen Behandlungsanlage sind mit einem speziellen Filtersubstrat gefüllte Rinnen der Firma Hauraton, die am Rand des Platzes den Oberflächenabfluss von den Kunstrasenflächen auffangen und filtern. Die Installation dieses Kellers stellte für Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens eine hervorragende Möglichkeit dar, den Einsatz von Filtermaterialien im Ablaufsystem auf die Reduktion des Austrages von Mikroplastik und anderen Schadstoffen zu untersuchen. Dies ist an keinem anderen Standort möglich.

Durch die parallele Sammlung der Abläufe mit und ohne Filterung lassen sich so Aussagen zur Reinigungsleistung der dargestellten Behandlungsanlage ableiten. Die wiederholte Beprobung des

Sportplatzes im Verlauf der Projektlaufzeit ermöglichte es zudem, ggf. auftretende Änderungen der Filterleistung zu erfassen, falls diese durch den Eintrag größerer Mengen Infill und Fremdstoffen wie z. B. Laub beeinträchtigt werden sollte.

In Abbildung 3 ist ein Luftbild der Sportanlage des VFL Sittensen zu sehen, auf der die einzelnen Abschnitte des Platzes eingezeichnet sind. Des Weiteren sind die Flächen markiert, von denen Wasser (Regenwasser) in den Probenahmekeller geleitet und gesammelt wurde. Abbildung 4 zeigt ein Foto der Ablaufrinnen, über die das Regenwasser in den Probenahmekeller gelangte.

Die Flächen, von denen im Probenahmekeller Abflüsse beprobt wurden, sind in Tabelle 2 mit den entsprechenden Flächenangaben aufgelistet.



Abbildung 3: *Beprobte Flächen und Probenahmekeller der Sportanlagen VFL Sittensen (Datengrundlage: Geobasisdaten Niedersachsen). KR = Kunstrasen, LB = Laufbahn. Behandelt = mit Filtrationseinheit, unbehandelt = ohne Filtrationseinheit*

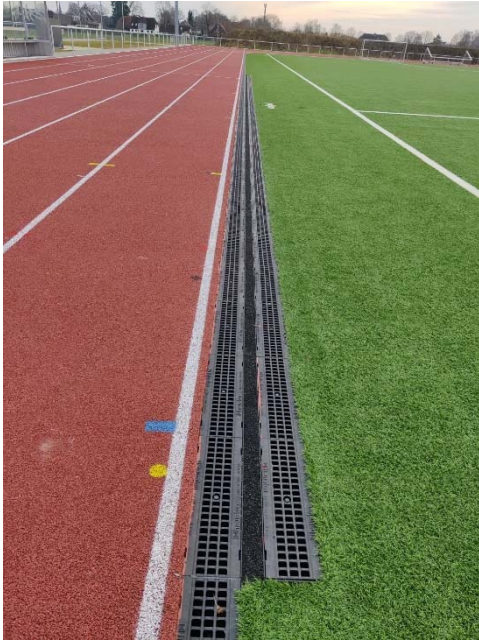


Abbildung 4: Ablaufrinne der beprobten Flächen der Sportanlagen VfL Sittensen. Links die Ablaufrinne der Laufbahn, rechts die Ablaufrinne des Kunstrasenfeldes.

Tabelle 2: Beprobte Teilflächen der Sportanlage des VfL Sittensen

Teilfläche	Größe
Kunstrasenplatz mit Filtration (KR, behandelt)	370 m ²
Kunstrasenplatz ohne Filtration (KR, unbehandelt)	370 m ²
Laufbahn mit Filtration (LB, behandelt)	73 m ²
Laufbahn ohne Filtration (LB, unbehandelt)*	73 m ²
Drainage	7.884 m ²

*Die Laufbahn ohne Filtration (LB, unbehandelt) wurde im Rahmen des Projektes nicht beprobt, da nur 4 Behälter im Keller Platz hatten, um das Wasser aufzufangen. Da der Fokus des Projektes auf Kunstrasen lag, wurde entschieden, diesen Strang nicht zu beproben

4.1.2 Weitere Sportplätze

Alle weiteren Sportplätze sind in der folgenden Tabelle 3 mit den wesentlichen Eigenschaften zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 3: Weitere Sportanlagen

Sportanlage	Bemerkungen*
NRW 1 (nur Bodenproben 2023)	Alter: 14 Jahre, nur Bodenprobenahme, keine Möglichkeit zur Entnahme von Wasserproben
Hessen 1 (2024)	Alter: 5 Jahre, neuer Sportplatz, Infill aus Kork, Beprobung der Drainage, welche in einen Bach entwässert
Hessen 2 (2024)	Alter: 3 Jahre, neuer Sportplatz, Infill aus Sand, Beprobung der Drainage, welche in den angrenzenden Bach entwässert
NRW 2 (Februar 2025, Mai 2025)	Alter: 5-6 Jahre, Infill aus Altreifen, Beprobung der Ablaufrinne in Höhe der Mittelfeldlinie
NRW 3 (Februar 2025, Mai 2025)	Alter: 13 Jahre, Infill aus Altreifen, Beprobung der Ablaufrinne in Höhe der Mittelfeldlinie
NRW 4 (Februar 2025, Mai 2025)	Alter 11 Jahre, Infill aus Altreifen, Beprobung der Ablaufrinne in Höhe der Mittelfeldlinie
Hockeyplatz	Diese Plätze haben kurze Fasern und werden ohne Infill bespielt (Abbildung 5). Die Rasenfasern sind kürzer, dicker und anders gearbeitet (gecurled). Der Rasen wird regelmäßig bewässert, um das Spielverhalten zu erzeugen. Da kein Infill verwendet wird, wurde auf eine Probenahme verzichtet.

* Alter= Alter des Platzes bei der Beprobung



Abbildung 5: Foto des besichtigten Hockeyplatzes. Hier wird kein Infill benutzt. Quelle: eigene Aufnahme.

4.2 Probennahme, Probenvorbereitung und Analyse

4.2.1 Probennahme der Wasserproben für die Mikroplastikanalytik

Für die Probennahme der Wasserproben wurden zwei verschiedene Vorgehen etabliert.

Während an dem Standort des VFL Sittensen ausreichende Mengen an Wasser zunächst in Edelstahlbehältern über mehrere Wochen gesammelt werden konnten, waren an den anderen Standorten Probennahme zu etablieren, welche an vorhandene Entwässerungssysteme angeschlossen werden konnte.

4.2.1.1 VFL Sittensen

Die Abflüsse der beprobten Teilflächen wurden, wie oben beschrieben, in Edelstahlbehältern aufgefangen, die im Probenahmekeller aufgestellt waren (Abbildung 6). Über eine Füllstandsmessung in den Behältern konnte die Zuflussmenge erfasst werden. Da es zu Beginn des Projektes immer wieder zum Überlaufen des Behälters mit dem Abfluss der Drainage gekommen ist, wurde im Laufe des Projektes eine Tauchpumpe in diesen Behälter installiert, welche bei Erreichen eines bestimmten Wasserstandes automatisch entleert wurde.



Abbildung 6: Probenahmezellen mit Edelstahlbehältern zur Sammlung der Wasserproben, Sittensen

Die Probenahme aus den Edelstahlbehältern erfolgte mit einer von Funck et al. (2020) entwickelten Kaskadenfiltration. Die Kaskadenfiltration besteht im Wesentlichen aus einer Rotationspumpe, einem Wasserzähler sowie Korbsiebfiltern in eisernen Filtergehäusen (Abbildung 7). Die Rotationspumpe wurde mit Hilfe eines Panzerschlauchs aus Edelstahl an den Auslass des Edelstahlbehälters angeschlossen. Nach dem Starten der Pumpe drückt diese das Wasser durch die Filter. Es wurde ein 10 µm Korbfilter als Filterstufe eingesetzt. Der Filter hat eine Höhe von 19,5 cm und einen Durchmesser von 8 cm bei einer Oberfläche von 485 cm². Nach der Beprobung eines Behälters erfolgt der Austausch des Korbsiebfilters.



Abbildung 7: Wasserprobenahme mittels Filtration. Links: 10 µm Korbfilter Mitte: Wasserzähler und Rotationspumpe Rechts: zur Sammlung verwendeter Edelstahlbehälter.

Der Sportplatz wurde im Zeitraum von 2023 bis 2025 insgesamt 8 mal beprobt.

Am Sportplatz in Sittensen fließt ein Bach vorbei. Dieser sollte durch den Einsatz eines Sedimentationskastens auf einen potenziellen Eintrag von Mikroplastik hin untersucht werden. Leider wurde der Kasten von unbefugten Personen aus dem Wasser entfernt und auseinandergelassen, so dass keine Proben zur Analyse vorlagen.

4.2.1.2 Probenahme andere Sportplätze

Aufgrund der unterschiedlichen Standortbedingungen war es eine große Herausforderung, eine vergleichbare Probenahme für die anderen Standorte zu entwickeln. Es konnte an keinem der anderen Standorte auf adäquate Möglichkeiten, wie in Sittensen, zurückgegriffen werden.

Die Probenahme musste so gestaltet werden, dass diese für mehrere Wochen im Feld verbleiben konnte, ohne den Spielbetrieb zu stören. Zudem musste sichergestellt werden, dass die Probenahme zu keiner Verstopfung der Abflüsse oder zu einem Wasserstau führen würde. Dazu bot sich, wie bereits im Antrag formuliert, eine Probenahme mit einfachen Sammelgefäßen mit Maschensieben (nach Anderson et al., 2018, vgl. Abbildung 8) an. Da der Hauptfokus dieses Vorhabens in der Quantifizierung der Freisetzung von (Mikro)Plastik lag, wurden für die Probenahme Planktonnetze eingesetzt, welche an die Entwässerungen angebracht werden konnten. Die verwendeten Planktonnetze haben eine Porengröße von 10 µm, dies bedeutet, dass Feststoffe größer 10 µm zurückgehalten wurden. Wo es möglich war, wurden die Maschensiebe in 2L Bechergläsern in die Auffangkörbe der Gullys ausgebracht. Bei dieser Art der Probenahme konnte zusätzlich eine Wasserprobe für die Schwermetall- und Spurenstoffanalytik genommen werden.



Abbildung 8: „Granulatfällor“ nach Anderson (<https://saltex.eu/sv/granulatfallor-dagvattenbrunnar>; Zugriff 26.10.2025).

Die folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Möglichkeiten zum Anbringen der Planktonnetze in den Entwässerungswegen verschiedener Sportplätze.



Abbildung 9: Fotos der einzelnen Probenahmen von links nach rechts: Hessen 1, Hessen 2, NRW 2 Ablaufrinne mit Gully, Netz und Becherglas im Gully der Ablaufrinne (die Probenahme in NRW 3 und NRW 4 erfolgte nach demselben Prinzip). Quelle: eigene Aufnahmen

Wie in Abbildung 9 zu sehen, konnten an den Standorten Hessen 1 und Hessen 2 nur die Entwässerungswegen mit Planktonnetzen beprobt werden. In Hessen 1 wurde das Drainagerohr des Sportplatzes beprobt, welches das Wasser direkt in den Bach einleitet. In Hessen 2 wurde ebenfalls

das Drainagerohr beprobt, welches das Wasser vom Sportplatz direkt in einen Wassergraben eines angrenzenden Feldes einleitet.

An den Standorten in NRW gibt es Entwässerungsrinnen und damit Gullys, welche in die Kanalisation entwässern. Die Planktonnetze sind mit Bechergläsern in die Auffangkörbe der Gullys gestellt worden (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10). Damit wurden neben dem Mikroplastik zeitgleich Wasserproben für die Spurenstoffanalytik gesammelt. Die Probenahme erfolgte in den Gullys der Ablaufrinnen der Sportplätze jeweils in Höhe der Mittelfeldlinie. Auf den folgenden Fotos ist ein Auffangkorb und der Gully des Sportplatzes NRW 3, in dem die Auffangbehälter eingesetzt werden, zu sehen. Wie auf den Fotos ersichtlich, ist der untere Teil der Körbe nicht geöffnet. Die Entwässerung erfolgt über Schlitze die ca. 10 cm oberhalb des Korbbodens kreisförmig angeordnet sind. Im unteren Teil der Auffangkörbe sammeln sich neben dem ausgetragenen Granulat (Infill) vor allem Blätter. Die aufgefangene Menge in den Netzen oder in den Bechergläsern ist daher nicht der Menge gleichzusetzen, welche in die Kanalisation eingeleitet wird. Wenn die Auffangkörbe regelmäßig gereinigt werden, ist die Menge Granulat (Infill), die in die Kanalisation gelangt geringer als die Menge, die im Rahmen des Vorhabens ermittelt wurde. Bei der Probenahme wurde allerdings auch festgestellt, dass nicht alle Gullys mit Auffangkörben ausgestattet sind. Für diese Gullys entspricht das ermittelte Ergebnis direkt der eingeleiteten Menge an Granulat (Infill). Alle Materialien, die in den Auffangkörben nicht absinken, wie zum Beispiel Kunstrasenfasern, werden direkt in die Kanalisation geleitet.



Abbildung 10: Fotos des Auffangkorbes und des Gullys vom Kunstrasenplatz NRW 3

Um die Probenahme mit den Planktonnetzen mit der Kaskadenfiltration aus Sittensen zu vergleichen, wurden die Planktonnetze ebenfalls in Sittensen an den Auslass der Abläufe im Probenahmekeller angebracht und untersucht (Abbildung 11).



Abbildung 11: Foto eines angebrachten Planktonnetzes an den Drainage Auslauf des Sportplatzes Sittensen

4.2.1.3 Probenahme der Wasserproben für die Schwermetall- und Spurenstoffanalytik

Für die Analyse der Schwermetall-, PAK und PFAS-Konzentration wurde in Sittensen aus den Edelstahlbehältern jeweils 2 Liter Wasser in einer Glasflasche entnommen. An den Sportplätzen in NRW konnten in den Abflüssen der Sportplätze 2 Liter Bechergläser zur Probensammlung ausgebracht werden. Die hierin gesammelte Probe wurden dann auf die o.a. Schadstoffe hin analysiert.

4.2.1.4 Probenahmezeiträume, Wassermengen in Sittensen, Abflussverhältnisse / Entwässerung über die Kanalisation

4.2.1.4.1 Probenahmezeiträume

In der folgenden Tabelle sind die Probenahmezeiträume an den einzelnen Standorten dargestellt. Am Standort Sittensen wurden, wie geplant, mehrere Probenahmekampagnen durchgeführt, wobei es aufgrund von Überflutungen im Probenahmekeller immer wieder zu Verzögerungen kam (siehe Kapitel Trouble Shooting und sonstige Hinweise).

Tabelle 4: Details der Wasserprobenahme, LB = Laufbahn, KU = Kunstrasen unbehandelt, KB = Kunstrasen behandelt, D = Drainage. Die Werte aus Hessen und NRW wurden auf Basis der Regendaten der Wetterstationen in der Nähe der Sportplätze abgeschätzt.

Standort	Zeitraum	Probenahme Zeitpunkt	Volumen [L]	Probenahmeort	Bemerkung
Sittensen	23.03.2023	23.3.2023	522, 227, 92, 314	LB, KU, KB, D	Kaskadenfiltration
Sittensen	23.03.2023-14.06.2023	14.06.2023	862, 121, 77, 257	LB, KU, KB, D	Kaskadenfiltration
Sittensen	29.09.2023-22.11.2023	22.11.2023	878, 905, 64	LB, KU, KB	Kaskadenfiltration
Sittensen	23.11.2023-06.02.2024	06.02.2024	861, 175, 17, 498	LB, KU, KB, D	Kaskadenfiltration
Sittensen	06.02.2024-20.02.2024	20.02.2024	842, 868, 295	LB, KU, KB	Kaskadenfiltration
Sittensen	23.11.2024-06.02.2025	06.02.2025	2, 2, 2, 524	LB, KU, KB, D	PAK, Planktonnetz (D)
Sittensen	20.02.2025-21.05.2025	21.05.2025	5,8, 0,8, 247	KU, KB, D	PFAS, Planktonnetz (KB)
Sittensen	21.05.2025-11.06.2025	11.06.2025	0,8, 247	KU, D	Planktonnetz
Hessen 1	27.06.2024-19.08.2024	19.08.2024	568	D	Planktonnetz
Hessen 2	19.08.2024-02.09.2024	02.09.2024	41	D	Planktonnetz
NRW 2	14.04.2025-30.04.2025	30.04.2025	2,4	KU	Planktonnetz
NRW 2	27.05.2025-03.06.2025	03.06.2025	1*	KU	Becherglas
NRW 3	16.04.2025-06.05.2025	06.05.2025	2,3	KU	Planktonnetz
NRW 4	14.04.2025-06.05.2025	06.05.2025	2,6	KU	Planktonnetz
NRW 4	27.05.2025-20.06.2025	20.06.2025	2,9	KU	Becherglas

* lokales Starkregenereignis am Sportplatz wurde von den Wetterstationen nicht erfasst, daher ist die Wassermenge eher eine Unterschätzung

4.2.1.4.2 Wassermengen in Sittensen (Betrieb und hydraulische Auswertungen der Versuchsanlage Sittensen)

Die Versuchsanlage beim VfL Sittensen wurde von Februar 2023 bis August 2025 betreut. In diesem Zeitraum kam es mehrfach zu Überflutungen des Probenahmekellers (08.08.2023, 21.12.2023, 07.08.2024, 18.07.2025) aufgrund von stärkeren Regenfällen in Verbindung mit Stromausfall bzw. Ausfall der Tauchpumpen, die den Probenahmekeller entwässern. Bei diesen Überflutungen liefen die Edelstahlbehälter voll und die Proben waren nicht mehr den einzelnen Entnahmeorten zuzuordnen.

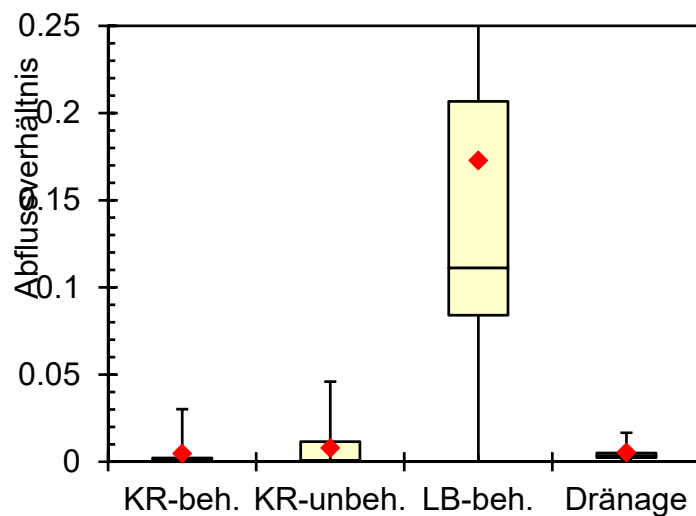
Die starken Regenfälle im Winter 2023/2024 führten dazu, dass von Dezember 2023 bis März 2024 die Drainage des Kunstrasenplatzes permanent lief. Eine Zuordnung der Drainagewassermenge zu den Niederschlagshöhen ist daher nicht mehr möglich. Es wird ein zu hoher Grundwasserstand vermutet, so dass permanent über die Drainage Grundwasser abgeführt wurde.

Die Auswertung der Wasserstände in den einzelnen Edelstahlbehältern und die daraus berechnete Wassermenge ist in der Anlage A zum Bericht zusammengestellt. Eigene Niederschlagsmessungen wurden nicht zusätzlich vorgenommen. Es wurden die Daten von zwei DWD-Stationen in ca. 10 km Entfernung (Heeslingen-Wiersdorf und Königsmoor) verwendet. Mit dem Mittelwert aus beiden Niederschlagsstationen und den Abflüssen der jeweiligen Teilflächen wurden die Abflussverhältnisse (Quotienten aus Abflusshöhe und Niederschlagshöhe) berechnet und in Tabelle 5 zusammengestellt. In Abbildung 12 sind die Abflussverhältnisse statistisch ausgewertet.

Tabelle 5: Abflüsse und Abflussverhältnisse Sportanlage VfL Sittensen

Zeitraum		Niederschlag	Abflüsse				Abflussverhältnis			
von	bis	Mittelwert	KR behandelt	KR unbehandelt	LB behandelt	Drainage	KR behandelt	KR unbehandelt	LB behandelt	Drainage
		[mm]	[m ³]				[-]			
15.02.2023	23.03.2023	87,8	0,06	0,07	3,76	11,50	0,002	0,002	0,586	0,017
24.03.2023	14.06.2023	121,1	0,00	0,03	1,51	11,50	0,000	0,001	0,170	0,012
15.06.2023	04.08.2023	253,5	0,14	2,19	1,51	10,06	0,001	0,023	0,081	0,005
17.08.2023	19.10.2023	131,0	0,00	0,00	0,93	2,81	0,000	0,000	0,097	0,003
19.10.2023	22.11.2023	151,3	0,14	1,23	1,23	1,64	0,002	0,022	0,111	0,001
22.11.2023	09.01.2024	240,6	1,51	1,09	1,23		0,017	0,012	0,070	
09.01.2024	06.02.2024	69,1	0,02	0,27	1,23		0,001	0,011	0,244	
06.02.2024	20.02.2024	68,3	0,41	1,16	2,26		0,016	0,046	0,451	
20.02.2024	15.05.2024	153,0	0,00	0,00	1,23	25,70	0,000	0,000	0,110	
15.05.2024	09.07.2024	193,3	0,00	0,00	1,23	3,28	0,000	0,000	0,087	0,002
09.07.2024	20.08.2024	110,3	1,23	0,11	1,23		0,030	0,003	0,152	
20.08.2024	29.10.2024	190,2	0,06	0,00	1,64	7,53	0,001	0,000	0,118	0,005
29.10.2024	10.12.2024	106,1	0,00	0,03	0,99	7,97				
10.12.2024	06.02.2025	93,4	0,00	0,00	0,00	1,64	0,000	0,000	0,000	0,002
07.02.2025	21.05.2025	50,5	0,00	0,00	1,16	1,37	0,000	0,000	0,315	0,003
22.05.2025	11.06.2025	92,0	0,00	0,00	0,00	2,33	0,000	0,000	0,000	0,003
12.06.2025	14.08.2025	154,3								

4.2.1.4.3 Abflussverhältnisse/Entwässerung über die Kanalisation



Abflussverhältnis	KR-beh.	KR-unbeh.	LB-beh.	Dränage
Mittelwert	0,005	0,008	0,173	0,005
Standardabweichung	0,009	0,013	0,164	0,005
Median	0,001	0,001	0,111	0,003
Unteres Quartil	0,000	0,000	0,084	0,002
Oberes Quartil	0,002	0,011	0,207	0,005
Minimum	0,000	0,000	0,000	0,001
Maximum	0,030	0,046	0,586	0,017

Abbildung 12: Auswertung der Abflussbeiwerte für die einzelnen beprobten Flächen VfL Sittensen (17 Zeiträume von Februar 2023 bis August 2025)

Wie zu erwarten, sind die Abflüsse von der Oberfläche der Kunstrasenfläche in die Kanalisation sehr gering. Weniger als 1 % (Abflussverhältnis < 0,01) des Niederschlages fließt über die Kanalisation ab. Der weitaus größte Teil versickert direkt in Richtung Grundwasser. Der etwas geringere Abflussanteil der Kunstrasenfläche mit Behandlung (KR-beh.) im Vergleich zur unbehandelten Kunstrasenfläche (KR-unbeh.) ist sicher auf den Wasserrückhalt im Substrat der Rinnen zurückzuführen. Von der Laufbahn (LB-beh.) gelangen im Mittel rd. 17 % des Niederschlages zum Abfluss, wobei Maximalwerte von knapp 60 % ermittelt wurden.

4.2.2 Bodenprobennahme

Während der Begehung der Sportplätze konnten in unmittelbarer Nähe zum Spielfeldrand zahlreiche Infill-Partikel auf den Böden sichtbar identifiziert werden (Abbildung 13). Aufgrund dieser Beobachtung wurde die Entscheidung getroffen, an möglichst vielen Standorten neben den Wasserproben auch Bodenproben zu entnehmen, um damit auch diesen Austragspfad untersuchen zu können. Daher wurden in Sittensen, NRW 1, NRW 2 und NRW 4 Bodenproben entnommen und auf deren Mikroplastikgehalt analysiert.



Abbildung 13: Fotos der Böden in 4 Metern Entfernung zum Spielfeldrand in NRW 4 (li) und Sittensen (re). Die Pfeile kennzeichnen Mikroplastikpartikel. In NRW 4 konnte das Infill-Material identifiziert werden; in Sittensen war es vor allem das Material der Laufbahn.



Abbildung 14: Foto der Bodenprobenahme in 4 m Entfernung zum Spielfeldrand des Sportplatzes NRW 2; zu sehen ist der Split Tube Sampler.

Für die Bodenprobenahme wurde der Oberboden (0-10 cm) auf den angrenzenden Grünflächen beprobt. Dazu wurden Mischproben (1 – 2 kg) nach ca. 4 Meter Entfernung vom Spielfeldrand und nach ca. 8 Metern entnommen, um eine Aussage über die Konzentration in Abhängigkeit von der Entfernung zum Spielfeld treffen zu können. Für die Probenahme wurde ein Split-Tube-Sampler oder ein Pürkhauer-Bohrstab verwendet. Der Split-Tube-Sampler wurde gewählt, da im Rahmen eines Projekts des Umweltbundesamtes (FKZ 3720 72 288 0), in dem an 600 Hintergrundstandorten in Deutschland Bodenproben von Acker- und Grünlandflächen auf PFAS und Mikroplastik genommen wurden, ein Split-Tube-Sampler zum Einsatz kam. Dadurch sollte die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Projekten gewährleistet werden.

Der Pürkhauer-Bohrstab, der ebenfalls eingesetzt wurde, weist im Vergleich zum Split-Tube-Sampler einen deutlich geringeren Durchmesser auf (1,3 cm gegenüber 5,3 cm). Um eine vergleichbare Gesamtprobenmasse zu erreichen, war daher die Entnahme einer größeren Anzahl von Teilproben erforderlich. Der Einfluss auf die Ergebnisse sollte durch das etwas abweichende Probenahmeequipment vernachlässigbar sein. In der folgenden Tabelle 6 sind die Zeitpunkte der Bodenprobenahme dargestellt.

Tabelle 6: Probenahmezeitpunkte der Bodenprobenahme

Standort	Probenahme Zeitpunkt	Menge Boden 4 m in kg	Menge Boden 8 m in kg	Probenahmeort	Bemerkung
NRW 1	30.03.2023	940	1106	Grünfläche neben dem Sportplatz	Pürkhauer
Sittensen 1	14.06.2023	1410	1395	Grünfläche zwischen Kunstrasenplatz und Laufbahn	Pürkhauer
Sittensen 2	06.02.2025	2017	2205	Grünfläche hinter dem Tor des Kleinen Sportplatzes	Split-Tube-Sampler
NRW 2	22.05.2025	1375	1519	Grünfläche hinter dem Tor des Sportplatzes	Split-Tube-Sampler
NRW 4	06.05.2025	1495	1200	Grünfläche hinter dem Tor des Sportplatzes	Split-Tube-Sampler

In der folgenden Abbildung 15 sind die Orte der Bodenprobeentnahme beim VFL Sittensen eingezeichnet. In der Fläche X1 wurde am 14.06.2023 Probe genommen, in der Fläche X2 wurde am 06.02.2025 Proben genommen. X3 = Standort der Fotos (06.02.2025).



Abbildung 15: eingezeichnete Flächen der Bodenprobenahme beim VFL Sittensen. X1 kurz nach Inbetriebnahme des Sportplatzes, X2 = zweite Probenahme 2025. X3 = Fotos des Bodens zwischen den beiden Kunstrasenflächen, 3 m von der Laufbahn entfernt. Quelle des Luftbildes: Geobasisdaten Niedersachsen

4.2.3 Luftprobenahme

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ebenfalls die Fragestellung untersucht, ob Mikroplastikpartikel aus Kunstrasenbelägen während des regulären Spielbetriebs in die Umgebungsluft freigesetzt und somit potenziell inhalativ aufgenommen werden können. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde eine Luftprobenahme am Sportplatz in Sittensen durchgeführt. Die Probenahme erfolgte im Zeitraum vom 06.02.2025 bis zum 20.02.2025 und diente der exemplarischen Erfassung von luftgetragenen Partikeln im unmittelbaren Umfeld eines Kunstrasenplatzes.

Die Feinstaubprobenahme wurde mit einem Kleinfiltergerät der Firma Comde Derenda durchgeführt (vgl. Abbildung 16), das für die Erfassung von PM_{10} -Fraktionen geeignet ist. Die Proben wurden auf einem Quarzfaserfilter gesammelt. Um eine ausreichende Probenmasse für die spätere Analytik sicherzustellen, wurde der Filter über einen Zeitraum von 14 aufeinanderfolgenden Tagen kontinuierlich belegt.



Abbildung 16: PM_{10} -Sammlung am Sportplatz Sittensen mit einem Kleinfiltergerät der Marke Comde Derenda.

4.2.4 Probenvorbereitung der Wasserproben

Für die Bestimmung der Schwermetalle wurden die Wässer filtriert und angesäuert. So sind die Proben i.d.R. bis zu 6 Monaten stabil. Der Nachweis der PAKs erfolgte im Unterauftrag durch ein akkreditiertes Labor, die PFAS wurden im IUTA bestimmt.

Für die Bestimmung der Mikroplastikkonzentration direkt aus dem Wasser erfolgte die Probenahme über Korbfilter, Planktonnetze oder direkt in Bechergläser. Die Probenvorbereitung und Analytik erfolgte im IUTA.

4.2.4.1 Korbsiebfilter

Der Korbsiebfilter wurde in ein 800 mL Becherglas mit einer Tween 80/Wasserlösung (1 g/L) gestellt. An der Korbsiebfilteroberfläche anhaftende Partikel wurden mit einem Mikrospatel mechanisch von der Oberfläche gelöst und anschließend der komplette Filter mit Hilfe eines Ultraschallbads gereinigt. Die Partikel konnten so vollständig von der Oberfläche gelöst und anschließend mit Hilfe einer Nutsche auf einem 5 µm PTFE-Filter abgeschieden werden. Diese Prozedur wurde so oft wiederholt, bis keine Partikel mehr am Korbsiebfilter zurückblieben. Anschließend wurden die Partikel mit Ethanol vom PTFE-Filter gelöst, in eine Petrischale überführt und das Ethanol verdampft. Nach der Trocknung wurde das Gewicht der Probe notiert sowie Partikel, die optisch größer als 5 mm waren, aussortiert und ebenfalls gewogen. Zur Homogenisierung und der Gewinnung von repräsentativen Teilproben wurde die Probe in einem Achat-Mörser zerkleinert und Aliquote mit der TED-GC-MS analysiert.

4.2.4.2 Planktonnetze

Die Planktonnetze wurden an den Sportplätzen ausgebracht und für einen gewissen Zeitraum, meist 2-3 Wochen, je nach Niederschlagsbedingung dort belassen. In Abbildung 17 sind Fotos der Planktonnetze am Ende des Probenahmezeitraums aufgeführt. Nach dieser Zeit wurden die Netze im Labor aufbereitet. In einem ersten Schritt wurden grobe Partikel, wie Blätter, Zigarettenstummel, Kaugummis, Spinnenweben oder ähnliches aus den Netzen entfernt. Anschließend wurden die Netze getrocknet und dann mechanisch gesäubert, indem die Oberflächen gegeneinander gerieben wurden. Zusätzlich wurden sie mit VE-Wasser⁵ gespült, um weitere Partikel entfernen zu können. Die Flüssigkeit wurde aufgefangen, filtriert und analysiert.



Abbildung 17: Fotos der Planktonnetze nach der Beprobung

4.2.4.3 Bechergläser

In den in den Bechergläsern aufgefangenen Wasserproben wurden zum Teil sehr hohe Anteile des Infills wiedergefunden. Diese Mengen des Infills und der Fasern sind zusätzlich gravimetrisch bestimmt worden.

⁵ VE-Wasser = vollentsalztes Wasser



Abbildung 18: Foto des Becherglases nach der 2. Probenahme ohne Planktonnetz von Sportplatz NRW 2

4.2.5 Probenvorbereitung der Bodenproben

Basierend auf einem Vorgehen, welches im Rahmen des Projektes iMulch (EFRE 0801177 – www.imulch.eu) entwickelt wurde, wurden die Proben zunächst luftgetrocknet und über ein 5 mm Metallsieb zur Entfernung größerer Pflanzenreste, Steine sowie Makroplastik gesiebt. Danach erfolgte eine Dichtentrennung, d.h. leichte Mikroplastikpartikel schwimmen bei dieser Methode auf und können so von der Matrix abgetrennt werden. Dazu wurden

- zum einen die gesamte Probe (ca. 800 g) und
- zum anderen nur eine Teilprobe von 150 g der homogenisierten Probe

mit einer gesättigten Natriumiodid-Lösung (Dichte ca. $1,8 \text{ g/cm}^3$) aufgeschlämmt und in einen Scheidetrichter überführt.

Nach 24 Stunden wurde die untere Phase verworfen, da die leichteren Mikroplastikpartikel aufschwammen, während schwerere Matrixbestandteile absanken. Die obere Phase wurde in eine Filtrationsvorrichtung überführt und mithilfe einer Nutsche durch einen $5 \mu\text{m}$ PTFE-Filter filtriert. Die Rückstände im Scheidetrichter sowie auf dem Filter wurden anschließend mit deionisiertem Wasser und Tween-Lösung nachgespült, um alle Partikel zu entfernen.

Im nächsten Schritt erfolgte die Zersetzung der organischen Matrix durch einen Fenton-Aufschluss. Dabei wurde der Rückstand in ein 2-L Becherglas gegeben und mit 30 mL Eisen(II)sulfat-heptahydrat (14 g/L) als Katalysator befeuchtet. Es folgte die langsame Zugabe von 5 mL 30% Wasserstoffperoxid, damit die einsetzende exotherme Reaktion kontrolliert ablief. Die Temperatur wurde kontinuierlich überwacht; bei Überschreitung von 50°C wurde die Zugabe verlangsamt. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis die Matrix vollständig zersetzt war oder keine sichtbaren Bestandteile mehr vorhanden waren. Das Gemisch wurde anschließend 10 Minuten bei Raumtemperatur abgekühlt. Danach wurde die Lösung tröpfchenweise mit konzentrierter Schwefelsäure versetzt, bis sie von orange-trüb nach gelblich-klar wechselte. Dabei werden ggf. ausgefallene Eisensalze wieder aufgelöst. Diese würden den anschließenden Nachweis an der TED-GC-MS stören. Zur Neutralisation wurden 50 mL Tween-Lösung hinzugefügt, und die Lösung wurde erneut durch einen $5 \mu\text{m}$ PTFE-Filter filtriert. Die Rückstände im Becherglas sowie auf dem Filter wurden mit Tween-Lösung und deionisiertem Wasser nachgespült.

Schließlich wurden die Partikel mit Ethanol vom Filter gewaschen, in Petrischalen eingedampft und nach der Trocknung gewogen.

In den Bodenproben waren optisch so viele Infill-Partikel zu erkennen, dass eine Analyse mittels TED-GC-MS nicht möglich war (Überladung des Systems). Daher wurden nach der Dichteseparation zunächst alle Infill-Partikel und Fasern mit einer Pinzette von den Bodenpartikeln abgetrennt (Auswahl erfolgte optisch und anhand der Elastizität der Partikel) und anschließend gewogen.

4.2.6 Probenvorbereitung der Luftproben

Die PM₁₀-Filterprobe wurde nach der Probenahme in einer Glaspetrischale gelagert und luftdicht verschlossen. Am IUTA wurde der Filter dann in einem klimatisierten Wägeraum ausgelegt und für 36 h equilibriert. Anschließend wurde das Gewicht der gesammelten Staubmasse gravimetrisch bestimmt.

Da nur eine geringe Menge an Kunstrasenpartikeln auf dieser Probe erwartet wurde, konnte eine chemische Analyse mittels TED GC-MS aufgrund der Nachweisgrenze und dem Aerosolhintergrund nicht durchgeführt werden. Alternativ dazu wurde eine spektroskopische Analyse einzelner Partikel mittels korrelativer Mikroskopie am RISE-Mikroskop (Rasterelektronenmikroskop mit gekoppelter Raman Spektroskopie, TESCAN CLARA RISE) durchgeführt. Die Filterprobe wurde hierzu auf einem speziellen Filterhalter, der es gestattet, den gesamten Filter in das Gerät einzuschleusen, untersucht.

4.3 Analysemethoden

4.3.1 Bestimmung der Mikroplastikkonzentration mittels Gravimetrie

Bei der Untersuchung der Feldproben zeigte sich, dass Kunststoffpartikel bereits durch optische Sichtung eindeutig identifiziert werden konnten. Dies betraf insbesondere die grobe Fraktion der Planktonnetzproben, die Bodenproben der Siebfraktionen >5 mm sowie < 5 mm bis >1 mm sowie das Infill-Material aus den Bechergläsern.

Aus diesen Proben wurden die sichtbaren Kunststoffpartikel manuell ausgesondert und ihre Gesamtmasse gravimetrisch bestimmt. Auf eine weiterführende Analyse mittels thermischer Desorption gekoppelt mit Gaschromatographie-Massenspektrometrie (TED-GC-MS) wurde verzichtet, da die hohe Partikelanzahl eine solche Untersuchung nicht praktikabel erscheinen ließ und das Gerät überladen hätte.

Für die Bodenproben des Standorts NRW 2 wurde aus der Gesamtprobe das optisch und haptisch erkennbare Infill-Material manuell separiert und ebenfalls gravimetrisch quantifiziert. Trotz sorgfältiger Arbeitsweise kann nicht ausgeschlossen werden, dass nicht alle Mikroplastikpartikel vollständig erfasst wurden oder das natürliche Bodenbestandteile irrtümlich als Infill-Material identifiziert und mitentfernt wurden. Diese Unsicherheiten können sowohl zu einer Unter- als auch zu einer Überschätzung der tatsächlichen Kunststoffanteile führen.

Die Aussortierung der Gesamtprobe nahm mehrere Tage in Anspruch, daher wurde bei den weiteren Proben Sittensen 2 und NRW 4 entschieden, nur eine Teilprobe (1,3 g) zu untersuchen und dann auf die Gesamtmasse hochzurechnen, um eine quantitative Abschätzung der Kunststoffkonzentration in der entsprechenden Fraktion zu ermöglichen.

4.3.2 Bestimmung der Mikroplastikkonzentration mittels TED-GC-MS

Die Mikroplastikbestimmung erfolgt mittels TED-GC-MS (Thermal Extraction and Desorption - Gas Chromatography - Mass Spectrometry), wobei sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen über die in der Probe enthaltenen Polymere getroffen werden können (Duemichen et al., 2019).

Bei der TED-GC-MS erfolgt eine indirekte Überführung der Pyrolyse-Produkte in das GC-MS. Dabei wird die Probe zunächst in einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) bei 600 °C pyrolysiert und die dort entstehenden Pyrolyseprodukte auf einer Extraktionsphase (PDMS-Stirrbar-Twister) sorbiert. Die Pyrolyseprodukte werden für die Injektion in das GC-MS thermisch von der Extraktionsphase desorbiert und bei 120 °C in einem Kaltaufgabesystem fokussiert, gaschromatographisch getrennt und massenspektrometrisch detektiert. Dieser Aufbau erlaubt die Analyse größerer Probenmengen ohne das Risiko einer Überladung der Trennsäule der GC. Dadurch können niedrige Nachweisgrenzen für eine massenbezogene Mikroplastikbestimmung erreicht werden (vgl. Abbildung 19).

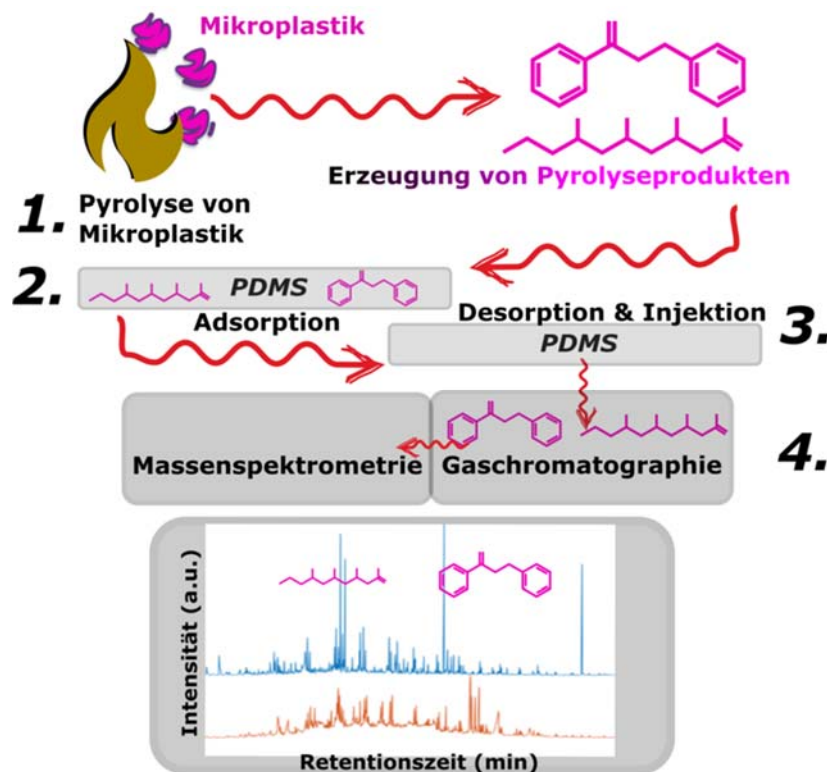


Abbildung 19: Prinzip der TED-GC-MS Analyse.

Ein zentraler Aspekt der Mikroplastikanalytik ist die Probenvorbereitung, deren Ziel die weitgehende Reduzierung matrixgebundener Bestandteile ist, da diese das Analyseergebnis maßgeblich beeinflussen können. Auch thermoanalytische Verfahren unterliegen Matrixeinflüssen, die sich in Retentionszeitverschiebungen, Signalsuppressionen oder der Generierung polymerähnlicher Signale äußern. Organische Bestandteile wie Fette oder Wachse können beispielsweise spektrale Signaturen erzeugen, die Polyethylen (PE) ähneln und so zu falsch-positiven Befunden oder einer Überschätzung der PE-Konzentration führen (Kittner et al. 2022).

Daraus folgt, dass eine sorgfältig angepasste Probenvorbereitung unerlässlich ist, um Matrixeffekte zu minimieren. Abhängig von der Matrix und den eingesetzten Analyseverfahren können unterschiedliche oder kombinierte Aufbereitungsschritte erforderlich sein. Zur Abtrennung anorganischer Komponenten wird in der Regel eine Dichtentrennung verwendet (Thomas et al. 2020), welche am IUTA mit Natrium-Iodid durchgeführt wird. Zur Reduktion organischer Matrixbestandteile kommen ergänzend Oxidationsverfahren mit Enzymen, Wasserstoffperoxid und/oder Fenton-Reagenz zum Einsatz (Löder et al. 2017; Hurley et al. 2018).

Aufbauend auf Literaturdaten und eigenen Arbeiten zur Untersuchung von Mikroplastik in Böden, Kläranlagen oder in Wasserproben wurde eine analytische Methode am TED-GC-MS für die im Projekt

anfallenden Proben erarbeitet. Informationen zu den verwendeten Geräten (TGA und GC-MS) und den angewandten Parametern sind in der

Tabelle 7 und Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 7: *Verwendete GC-MS Parameter bei der Analyse mittels TED-GC-MS.*

Parameter	Information
Adsorption	
Modell (Interface)	Adsorptionseinheit (TDU 3.5+) Gerstel GmbH & Co KG, Mülheim an der Ruhr, Deutschland
Adsorbens	Twister®; Material: Polydimethylsiloxan; Gerstel GmbH & Co KG, Mülheim an der Ruhr, Deutschland
Temperaturen (Interface / Übergang zum Adsorbens)	50 °C auf 200 °C mit 40 °C/min, Haltezeit 5 min
Thermische Desorption	
Modell	Desorptionseinheit (TDU 3.5+) Gerstel GmbH & Co KG, Mülheim an der Ruhr, Deutschland
Temperaturprogramm Modus	50 °C bis 200 °C / isotherm bei 200 °C für 5 min Splitless
Kryofokussierung und Injektion	
Modell	Kaltaufgabesystem CIS 4 Gerstel GmbH & Co KG, Mülheim an der Ruhr, Deutschland
Modus Temperaturprogramm	Solvent Vent -100 °C bis 270 °C; Heizrate 12 °C/s; isotherm bei 270 °C für 10 min
Gaschromatograph	
Modell	GC7890; Agilent, Santa Clara, Kalifornien, USA
Säule	HP-5MS (30 m × 250 µm × 0,25 µm)
Flussrate (Helium)	1 mL/min
Temperaturprogramm	40 °C bis 300 °C Isotherm bei 40° für 1 min Isotherm bei 300 °C für 4 min
Massenspektrometer	
Modell	5977B GC/MSD; Agilent, Santa Clara, Kalifornien, USA
Temperaturen	Interface: 300 °C Ionenquelle: 230 °C Quadrupol: 150 °C
Ionisation Messmodus	Elektronenstoßionisation, 70 eV Scanmodus, m/z 35 bis 450

Tabelle 8: Verwendete TGA-Parameter bei der Analyse mittels TED-GC-MS.

Parameter	Information
Modell	TGA 2, Mettler Toledo GmbH, Gießen, Deutschland
Spülgas (Stickstoff N ₂)	20 mL/min N ₂
Gesamtfluss (Stickstoff N ₂)	50 ml/min N ₂
Hezbereich und Heizrate (Temperaturprogramm)	200 bis 500 °C (Temperaturprogramm: Isotherm bei 200°C für 2 min, 200 bis 500°C bei 10°C/min; Isotherm 500°C für 6 min)
Probentiegel	Material: Aluminiumoxid; V = 600 µl; Mettler Toledo GmbH, Gießen, Deutschland

4.3.3 Identifizierung und Quantifizierung der Polymere

Um die im Kunstrasen verbauten Materialien eindeutig in den späteren Proben identifizieren zu können, wurden in einem ersten Schritt die unterschiedlichen Stoffe eines Kunststoffrasenbelags mit der TED-GC-MS untersucht, um spezifische Pyrolyseprodukte und Retentionszeiten für diese Stoffe zu identifizieren.

Zu den Materialien zählte eine schwarze Teppichschicht, eine farblose Beschichtung am Teppichrücken sowie eine grünlich gefärbte Naht. Des Weiteren wurden vier Faserarten analysiert, die sich optisch unterschieden: hellgrün-glatt, dunkelgrün-glatt, hellgrün-texturiert und dunkelgrün-texturiert. Zusätzlich wurde das rötliche Material der Laufbahn, das Naturmaterial-Infill, ein Granulatgemisch aus Naturmaterialien und Kunststoff sowie das Filtersubstrat untersucht. Die Materialien wurden vom VFL Sittensen zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurde das Infill von den weiteren beprobten Sportplätzen für mögliche Vergleichsuntersuchungen gesammelt.



Abbildung 20: Materialien aus Kunststoffrasensystemen aus Sittensen und das Gummigranulat eines weiteren Sportplatzes.

Vor der Analyse mit der TED-GC-MS wurde über eine Internetsuche sowie durch Rücksprache mit den Herstellern die eingesetzten Polymere in den Werkstoffen recherchiert. Zur Quantifizierung wurden für jedes Polymer ein Pyrolyseprodukt und Fragment-Ion gewählt, welche möglichst nicht durch Matrix gestört und überlagert wurde. Die ausgewählten charakteristischen Marker wurden dann mit der Literatur verglichen. Zusätzlich wurden zur Qualifizierung ebenfalls die im Massenspektrum erkennbaren Ionen-Verhältnisse der einzelnen Pyrolyseprodukte herangezogen. Mit Hilfe bekannter (Referenz-)Materialien (Tabelle 9) wurden Kalibrierungen erstellt, auf deren Basis die Quantifizierung der Polymere erfolgte. Für die Stoffe Naturmaterial-Infill und EPDM konnten keine Referenzmaterialien beschafft werden. Für diese Stoffe wurden die zur Verfügung gestellten Granulate für die Kalibrierung verwendet.

Tabelle 9: Übersicht über die verwendeten (Referenz-)Materialien.

Kunststoff	(Referenz)Material	Hersteller
PE	BAM-P210, ID 015	
PET	BAM-P206, ID 003,	Bundesanstalt für
PP	BAM-P208, ID 015	Materialforschung und -
PS	BAM-P202, ID 048	prüfung, Berlin, Deutschland
SBR	ID 006	
PUR	PU binder arom 1C	BASF, Ludwigshafen, Deutschland
	PU binder arom 2C	
	TPU ester 312µm	
	TPU ether 312µm	
	PU foam	
	TPU ester ali	
	TPU ether ali	

Zur Qualitätssicherung wurden nach jeder Messung Systemblindwerte aufgenommen, um mögliche Verschleppungen zu erkennen und ggf. in der Auswertung berücksichtigen zu können. Zudem wurden Qualitätssicherungsproben (Qualitätskontrollproben) bei jeder Messsequenz analysiert und eigene Prozessblindwerte ermittelt. Für die Qualitätskontrollproben wurden die nachzuweisenden Polymere in einer zur Kalibrierung passenden Menge eingewogen und nachgewiesen. Die Wiederfindung der Polymere durfte um ca. ± 30 % schwanken, erst dann wurden die Proben analysiert. Diese Qualitätskontrollproben stellen sicher, dass das Messsystem für den Nachweis der Polymere empfindlich genug ist. Matrixeinflüsse wurden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Neben Systemblindwerten wurden auch Laborblindwerte ermittelt.

4.3.4 Nachweis der Spurenstoffe und Elemente

Der Nachweis der Spurenstoffe erfolgte direkt aus den an den einzelnen Messstellen genommenen Wasserproben. Für die PAKs und PFAS erfolgte vor dem analytischen Nachweis eine Festphasenextraktion, d.h. die Analyten wurden dadurch in den Untersuchungsproben angereichert.

Der Nachweis der PAK erfolgte nach DIN 38407-39:2011 mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie im Unterauftrag durch ein akkreditiertes Labor. Die Bestimmungsgrenze lag bei 0,01 mg/L pro Komponente (Tabelle 10). Die erweiterte Messunsicherheit (MU) schwankte zwischen 13 und 25% pro Komponente. Sie wurde nach DIN ISO 11352:2013 als erweiterte, kombinierte Unsicherheit mit $k=2$ (95 %) ohne Probenahme angegeben.

Tabelle 10: Auflistung der zu analysierenden Substanzen mit Bestimmungsgrenze und Messunsicherheit (ermittelt im Unterauftrag).

Substanz	BG/ $\mu\text{g/L}$	Mu/%
Naphthalin	< 0,01	25
Acenaphthylen	< 0,01	20
Acenaphthen	< 0,01	20
Fluoren	< 0,01	20
Phenanthren	< 0,01	25
Anthracen	< 0,01	20
Fluoranthren	< 0,01	20
Pyren	< 0,01	25
Benzo(a)anthracen	< 0,01	20
Chrysen	< 0,01	20
Benzo(b)fluoranthren	< 0,01	23
Benzo(k)fluoranthren	< 0,01	20
Benzo(a)pyren	< 0,01	20
Dibenzo(a,h)anthracen	< 0,01	20
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,01	13
Benzo(ghi)perylen	< 0,01	17
Summe 16 EPA PAK	< 0,15	35

IUTA ist für die Untersuchung von PFAS und Elementen (Metallen) aus Ab- und Fließgewässern durch die DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage D-PL-19759-01-00⁶ festgelegten Umfang.

Die Bestimmung von Per- und Polyfluorierten Kohlenwasserstoffen (PFAS) in Wasserproben wurde mittels HPLC-MS/MS durchgeführt. Die Grundlage ist die DIN 38407-42:2011 und die daraus im IUTA etablierte und validierte Methode zur Bestimmung von PFAS aus Wasser mittels Festphasenextraktion. Für die Bestimmung ausgewählter PFAS nach europäischer Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wurde die Festphasenextraktion nach DIN 38407-42:2011 auf einen Anreicherungsfaktor von 1000 erweitert und so am IUTA validiert.

Folgende Substanzen wurden dabei nachgewiesen:

Tabelle 11: Auflistung der zu analysierenden Substanzen mit Informationen zur eindeutigen Identifizierung.

Substanz	Kürzel	CAS-Nr.	Summenformel	Molgewicht g/mol
Perfluorbutansäure	PFBA	375-22-4	C ₄ H ₀ F ₇	214,04
Perfluorpentansäure	PFPeA	2706-90-3	C ₅ H ₀ F ₉	264,05
Perfluorhexansäure	PFHxA	307-24-4	C ₆ H ₀ F ₁₁	314,05
Perfluorheptansäure	PFHpA	375-85-9	C ₇ H ₀ F ₁₃	364,06
Perfluoroctansäure	PFOA	335-67-1	C ₈ H ₀ F ₁₅	414,07
Perfluornonansäure	PFNA	375-95-1	C ₉ H ₀ F ₁₇	464,08
Perfluordekansäure	PFDA	335-76-2	C ₁₀ H ₀ F ₁₉	514,08
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	375-73-5	C ₄ H ₀ F ₉ S	300,10
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	355-46-4	C ₆ H ₀ F ₁₃ S	400,11
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	1763-23-1	C ₈ H ₀ F ₁₇ S	500,13
6:2-Fluortelomersulfonsäure	H4-PFOS	27619-97-2	C ₈ H ₅ O ₃ F ₁₃ S	428,17

⁶ <https://www.iuta.de/D-PL-19759-01-00.pdf>

Im Rahmen der Validierung 2025 wurden folgende Bestimmungsgrenzen und Messunsicherheiten ermittelt.

Tabelle 12: *PFAS mit Angaben zur analytischen Bestimmungsgrenze (SPE⁷ mit Faktor 100) und Messunsicherheit.*

Substanz	BG ng/L	BG nach SPE ₁₀₀ ng/L	Messunsicherheit ohne Probenahme %	Messunsicherheit mit Probenahme %
PFBA	116	1,2	61	65
PFPeA	147	1,5	65	69
PFHxA	186	1,7	54	59
PFHpA	152	1,5	64	68
PFOA	376	3,8	60	64
PFNA	697	7,0	63	67
PFDA	547	5,5	61	65
PFBS	217	2,2	71	75
PFHxS	275	2,8	54	59
PFOS	755	7,6	75	79
H4-PFOS	270	2,7	60	64

Die erweiterte Messunsicherheit (MU) wurde nach DIN ISO 11352:2013 als erweiterte, kombinierte Unsicherheit mit k=2 (95 %) ermittelt. Der Unsicherheitsbeitrag der Probenahme wurde ebenfalls berücksichtigt.

Die Bestimmung der Elemente erfolgte nach Filtration (0,45µm-Filter) und ansäuern der Proben mit Salpetersäure mit einem Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) nach DIN EN ISO 17294-2:2017.

Tabelle 13: *Untersuchte Elemente mit Angaben zur analytischen Bestimmungsgrenze und Messunsicherheit, ermittelt für Fließ- und Oberflächengewässer, mittels ICP-MS.*

Elemente	Bestimmungsgrenze [µg/L]	Erweiterte Messunsicherheit für Oberflächen- und Fließgewässer MU [%]
Cadmium (Cd)	< 0,02	< 30
Chrom (Cr)	< 0,2	< 30
Kupfer (Cu)	< 0,2	< 30
Eisen (Fe)	< 10	< 30
Nickel (Ni)	< 0,2	< 30
Blei (Pb)	< 0,1	< 30
Zink (Zn)	< 2	< 30

Die erweiterte Messunsicherheit (MU) wurde nach DIN ISO 11352:2013 als erweiterte, kombinierte Unsicherheit mit k=2 (95 %) ermittelt. Der Unsicherheitsbeitrag der Probenahme wurde nicht berücksichtigt.

⁷ Solid Phase Extraction/Festphasenextraktion

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Materialcharakterisierung

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der Materialcharakterisierung, die Markermoleküle, Fragmentionen und Retentionszeiten der einzelnen Kunstrasenbestandteile dargestellt, welche dann für die Messungen mit der TED-GC-MS verwendet wurden.

Die Arbeiten zur Materialcharakterisierung wurden im Rahmen einer Masterarbeit (Pruin 2023) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind im Folgenden dargestellt.

5.1.1 Faser/Filament

Die Fasern der Kunststoffrasenbeläge werden aus Polyethylen gefertigt (Polytan, 2023). Informationen zu möglichen Materialabweichungen im Hinblick auf die optisch unterscheidbaren Fasern wurden nicht genannt. Zur Materialcharakterisierung wurde eine hellgrüne, glatte Faser verwendet. Der Abgleich der Chromatogramme mit denen von PE-Referenzmaterialien aus der internen Datenbank bestätigt das Polymer als Werkstoff der Rasenfilamente. Die Abbildung 21 zeigt Fragmentionen bei einer Einwaage von 70 µg. Darin ist die für PE typische Tripletts-Struktur der Peaks zu erkennen. Bei der Pyrolyse kommt es zu zufälligen Kettenabbrüchen durch die ein Muster aus gesättigten, einfach ungesättigten und zweifach ungesättigten Kohlenwasserstoffen mit der gleichen Anzahl an Kohlenstoffatomen entsteht (Rizzarelli, et al., 2016). Für die Auswertung eignen sich nur die Dialkene, da Alkene und Alkane ebenfalls in thermischen Zersetzungsprodukten von Umweltmatrices wie Fettsäuren oder Lipiden vorkommen können (Dümichen, et al., 2017).

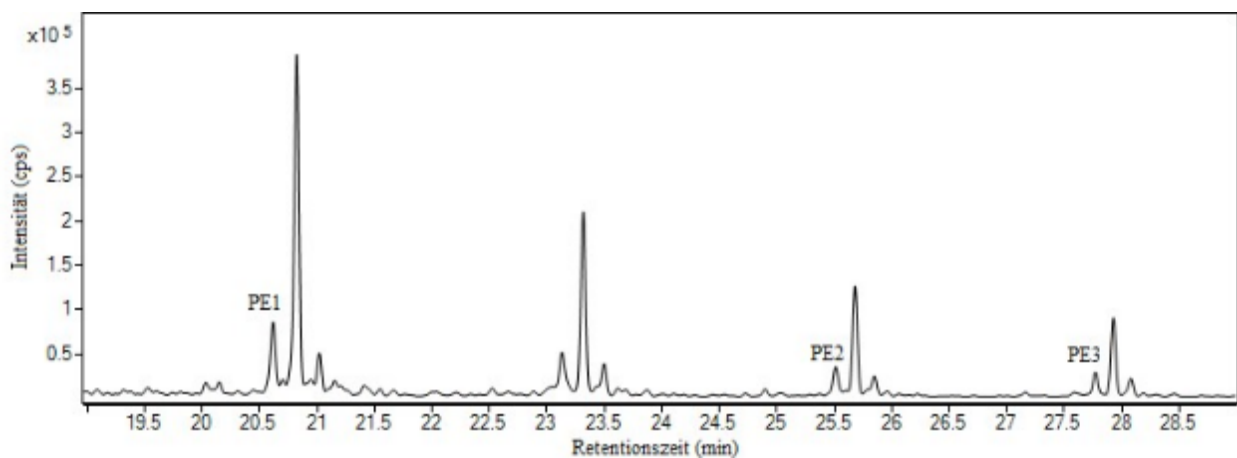


Abbildung 21: Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 55 der Marker von PE bei einer Pyrolysetemperatur von 500 °C. Es wurden 70 µg der Faser gemessen.

Der Tabelle 14 sind die ausgewählten Markermoleküle samt Retentionszeiten und charakteristischen Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen. Da das Signal des Markers 1,14-Pentadecadiene zu der Retentionszeit 23,1 min teilweise überlagert vorlag, wurde dieser aufgrund von möglichen Interferenzen nicht berücksichtigt.

Tabelle 14: Übersicht der für die Quantifizierung der Faser verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentionen m/z	Ionenverhältnisse
Faser	PE	1,13-Tetradecadiene	PE1	20,6	55, 81, 95, 109	100 : 69 : 44 : 21
		1,15-Hexadecadiene	PE2	25,5	55, 81, 95, 109	100 : 61 : 39 : 21
		1,16-Heptadecadiene	PE3	27,7	55, 81, 95, 109	100 : 63 : 43 : 23

5.1.2 Naht

Über eine online Recherche konnten keine Informationen zu dem Werkstoff der Teppichnaht von Kunststoffrasenbelägen gewonnen werden. Der Abgleich der Chromatogramme, mit denen von Referenzmaterialien aus der internen Datenbank zeigten, dass das Polymer PET als Werkstoff der Naht dient. Die Abbildung 22 zeigt die extrahierten Ionenchromatogramme ($m/z = 105, 150$ & 122) der untersuchten Massenspuren der Fragmentionen bei einer Einwaage von $113 \mu\text{g}$. Bei der Pyrolyse von Carbonsäureestern wie PET entstehen durch den Wasserstofftransfer Vinylester sowie Säuregruppen (Dümichen, et al., 2017). In den Chromatogrammen ist neben zwei Estern auch die markante Struktur der Benzoesäure zu erkennen. Die Interaktion des polaren Pyrolyseprodukts mit der genutzten unpolaren GC-Säule führt zu einem schlechten Trennverhalten. Dadurch entsteht ein Fronting des Peaks.

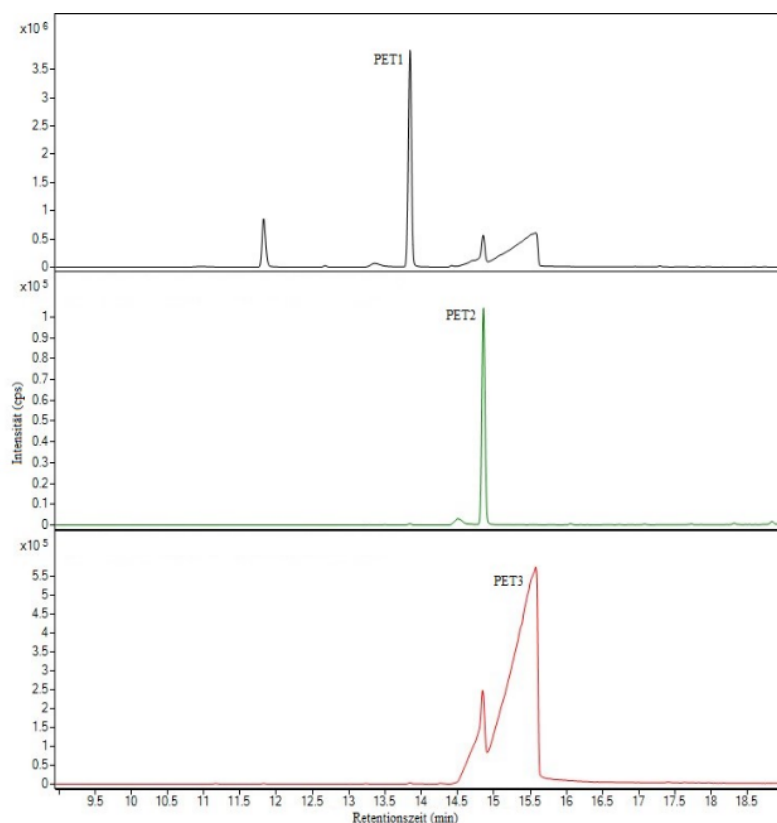


Abbildung 22: Extrahierte Ionenchromatogramme von $m/z 105, 150$ und 122 der Marker von PET bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C . Es wurden $113 \mu\text{g}$ der Naht gemessen.

Der Tabelle 15 sind die ausgewählten Markermoleküle samt Retentionszeiten und charakteristischen Massenspuren der Fragmentationen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen.

Tabelle 15: Übersicht der für die Quantifizierung der Naht verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentationen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentationen m/z	Ionenverhältnisse
Naht	PET	Vinylbenzoat	PET1	13,8	105, 77, 51	100 : 48 : 13
		Ethylbenzoat	PET2	14,8	150, 105, 77, 122	20 : 100 : 41 : 38
		Benzoesäure	PET3	15,2	122, 105, 77, 51	94 : 100 : 62 : 23

5.1.3 Teppich

Laut persönlicher Kommunikation mit dem Hersteller wird der Teppich der Kunststoffrasenbeläge aus Polypropylen gefertigt (Söll, 2021). Der Abgleich der Chromatogramme mit denen von PP-Referenzmaterialien aus der internen Datenbank bestätigt das Polymer als Werkstoff des Teppichs. Die Abbildung 23 zeigt die extrahierten Ionenchromatogramme ($m/z = 111$) der untersuchten Massenspuren der Fragmentationen bei einer Einwaage von 106 μg . Als Zersetzungsprodukte entstehen Alkane, Alkene und Dialkene. Aufgrund der verzweigten Struktur des PP werden bei der Pyrolyse Isomere gebildet. Die Anzahl möglicher Diastereoisomere steigt mit der Höhe der analysierten Oligomere (Soják, et al., 2006). Diese sind spezifisch für PP.

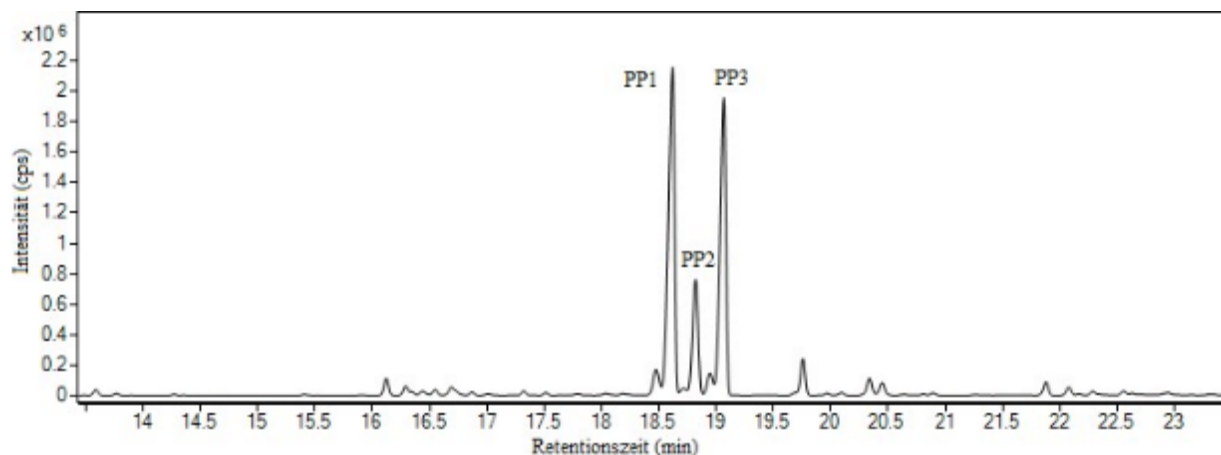


Abbildung 23: Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 111 der Marker von PP bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 106 μg des Teppichs gemessen.

Der Tabelle 16 sind die ausgewählten Markermoleküle samt Retentionszeiten und charakteristischen Massenspuren der Fragmentationen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen. Für die Auswertung wurden die Peaks mit den höheren Intensitäten integriert.

Tabelle 16: Übersicht der für die Quantifizierung der Teppich verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentionen m/z	Ionenverhältnisse
Teppich	PP	2,4,6,8-Tetramethyl-1-undecene (Isomer 1)	PP1	18,6	111, 69, 154, 210	49 : 100 : 8 : 1
		2,4,6,8-Tetramethyl-1-undecene (Isomer 2)	PP2	18,8	111, 69, 154, 210	49 : 100 : 9 : 1
		2,4,6,8-Tetramethyl-1-undecene (Isomer 3)	PP3	19,0	111, 69, 154, 210	47 : 100 : 14 : 1

5.1.4 Beschichtung

Laut Herstellerangaben wird für die Rückenbeschichtung von Kunststoffrasensystemen Polyurethan eingesetzt (Polytan, 2023). Der Abgleich der Chromatogramme mit denen von PUR-Referenzmaterialien aus der internen Datenbank identifiziert das Polymer als Werkstoff der Beschichtung nicht eindeutig. Dies kann an der Vielzahl der verschiedenen Polyurethane liegen, die sich je nach Vernetzungsgrad und zur Synthese eingesetzten Stoffe unterscheiden. Die Abbildung 24 zeigt die extrahierten Ionenchromatogramme ($m/z = 89, 103 \text{ \& } 101$) der untersuchten Massenspuren der Fragmentionen bei einer Einwaage von $59 \mu\text{g}$. Durch die Spaltung der Urethanbindung während der Pyrolyse wird Polypropylenglycol abgebaut (Zakharyan & Maksimov, 2022). Dadurch werden 1,1'-Oxydi-2-propanol und das Isomer 2-(2-Hydroxypropoxy)-1-propanol freigesetzt (Jiang, et al., 2018). Einen direkten Zusammenhang zwischen PUR und dem dritten Marker, 1,1-Dipropoxypropan, ist in der Literatur nicht existent. Jedoch wurde der Stoff bereits in Plastiktüten aus LDPE nachgewiesen (Htway, et al., 2020).

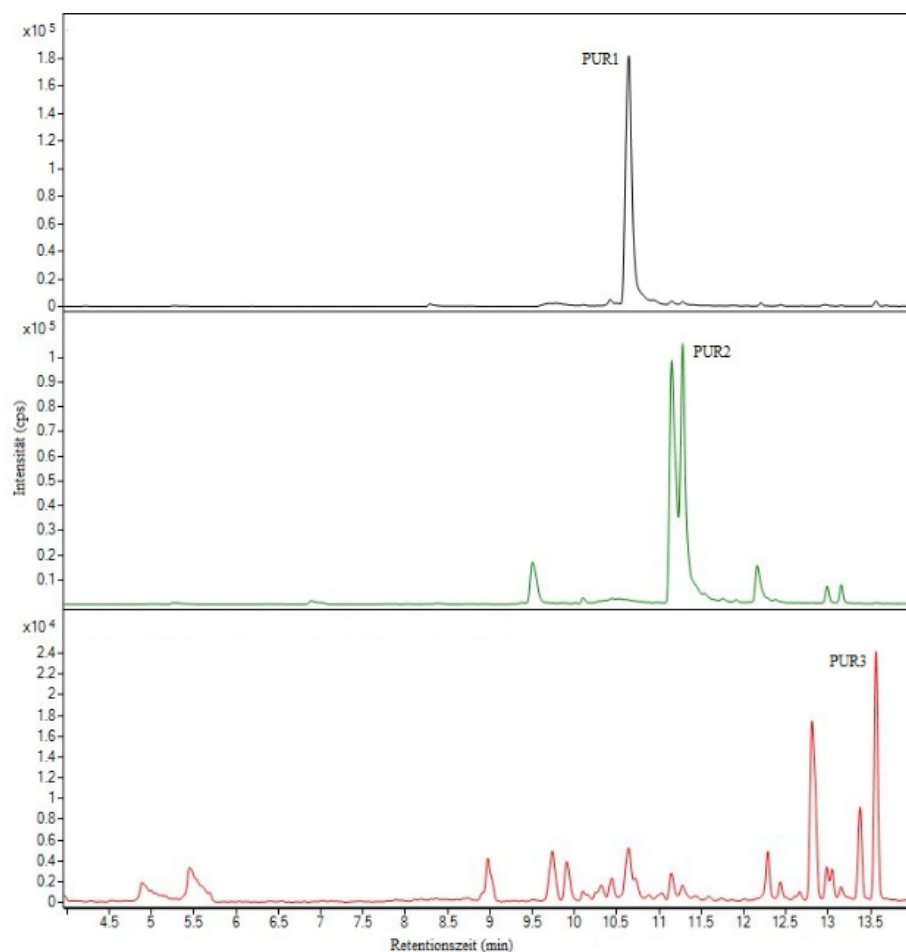


Abbildung 24: Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 89, 103 und 101 der Marker von PUR bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 59 µg der Beschichtung gemessen.

Der Tabelle 17 sind die ausgewählten Markermoleküle samt Retentionszeiten und charakteristischen Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen.

Tabelle 17: Übersicht der für die Quantifizierung der Beschichtung verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentionen m/z	Ionenverhältnisse
Beschichtung	PUR	1,1'-Oxydi-2-propanol	PUR1	10,6	89, 45, 59, 42	74 : 100 : 63 : 56
		2-(2-Hydroxypropoxy)-1-propanol	PUR2	11,2	103, 59, 45, 41	31 : 100 : 25 : 17
		1,1-Dipropoxypropan	PUR3	13,5	101, 59, 43, 89	82 : 100 : 68 : 14

5.1.5 Laufbahn-Granulat

Laut Herstellerangaben besteht die Deckschicht des Laufbahnbelages aus EPDM-Granulaten (Polytan, 2023). Ein Abgleich der Chromatogramme mit denen aus der internen Datenbank war aufgrund des fehlenden EPDM-Referenzmaterials nicht möglich. Stattdessen wurde auf einen Vergleich der Chromatogramme und Massenspektren von EPDM aus der Literatur zurückgegriffen (Tsuge, et al., 2011). Die dort aufgelisteten Pyrolyseprodukte konnten in dem vorliegenden Material entweder nicht identifiziert oder nicht linear kalibriert werden. Daher erfolgte die Auswahl eines geeigneten Peaks manuell. Die Abbildung 25 zeigt das extrahierte Ionenchromatogramm ($m/z = 135$) der untersuchten Massenspur des Fragmentions bei einer Einwaage von 108 μg . Benzothiazol und die Derivate werden in der Industrie als Additiv eingesetzt, um die Vulkanisation des Kautschuks zu beschleunigen. Der betrachtete Marker verbleibt im polymeren Netzwerk als Endgruppe, die mit dem Kautschuk verbunden ist (Brunella, et al., 2022).

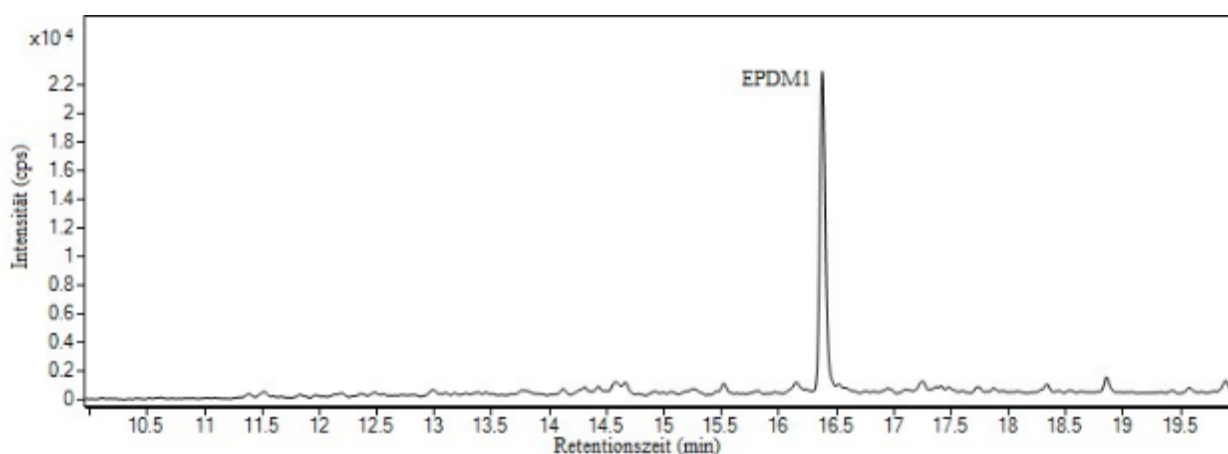


Abbildung 25: Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 135 des Markers von EPDM bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 108 μg des Laufbahn-Materials gemessen.

Der Tabelle 18 ist das ausgewählte Markermolekül samt Retentionszeit und charakteristischen Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen.

Tabelle 18: Übersicht der für die Quantifizierung des Laufbahn-Materials verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeit und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentionen m/z	Ionenverhältnisse
Laufbahn	EPDM	Benzothiazol	EPDM1	16,3	135, 108, 69, 82	100 : 33 : 30 : 18

5.1.6 Naturmaterial-Infill

Das vorliegende Infill-Granulat aus Sittensen ist aus dem Naturprodukt Kork gefertigt (Polytan, 2023). Ein Abgleich der Chromatogramme mit denen aus der internen Datenbank war aufgrund des fehlenden Kork-Referenzmaterials nicht möglich. Stattdessen wurde auf einen Vergleich der Chromatogramme und Massenspektren von Lignin und Holzpulver aus der Literatur zurückgegriffen (Tsuge, et al., 2011). Die Abbildung 26 zeigt die extrahierten Ionenchromatogramme ($m/z = 138, 150$ & 135) der untersuchten Massenspuren der Fragmentionen bei einer Einwaage von 88 μg . Der in den anderen beiden Naturmaterialien identifizierte Marker 2-Methoxy-4-vinylphenol wurde bereits in Korkgranulaten, die zum Verfüllen von Kunststoffrasenflächen zum Einsatz kommen, detektiert

(Heisterkamp, et al., 2022). Die Synonyme der ausgewählten Moleküle lauten 4-Methylguaiacol für Kork1 sowie 4-Vinylguaiacol für Kork2/3. Beide wurden als Hauptverbindungen, die durch den thermischen Abbau von Kork entstehen, identifiziert (Costa, et al., 2022).

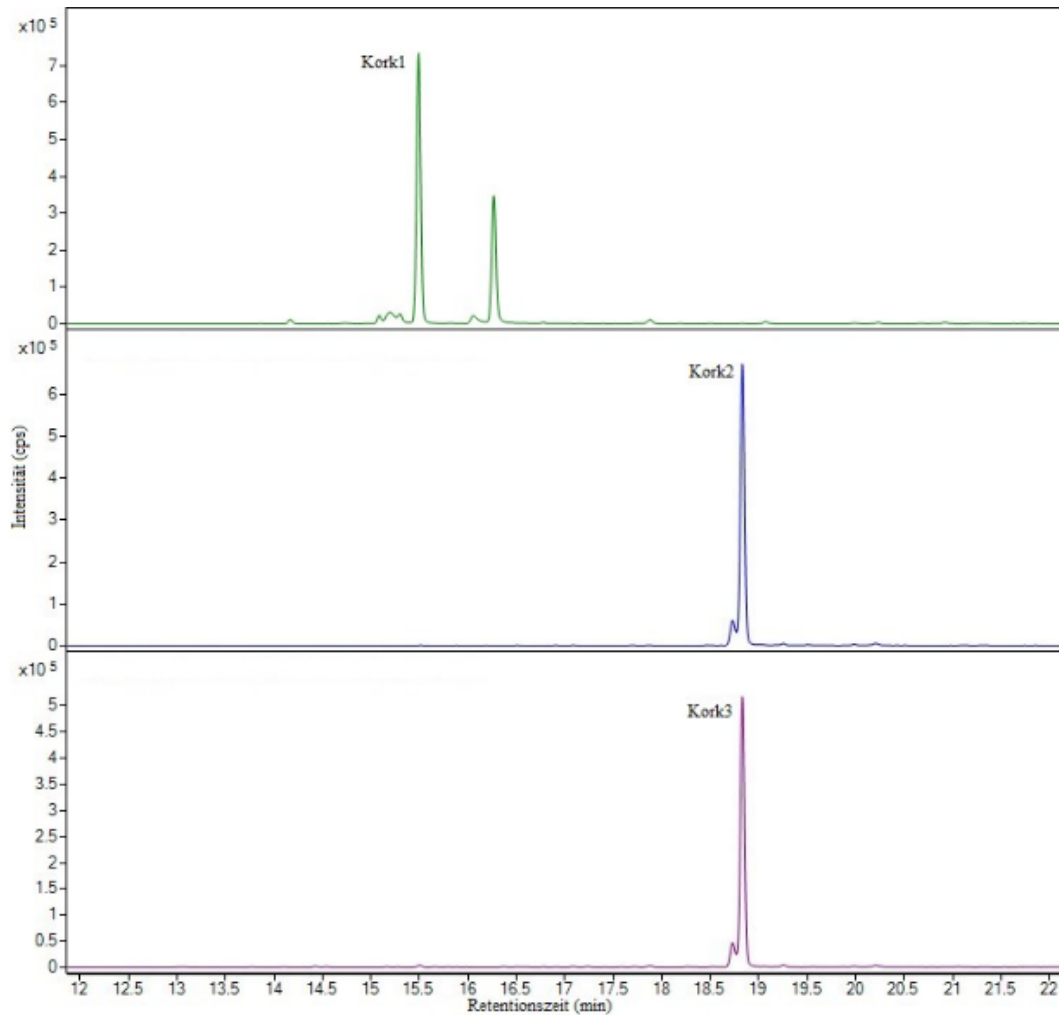


Abbildung 26: Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 138, 150 und 135 der Marker von Kork bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C. Es wurden 88 μg von dem Naturmaterial-Infill gemessen.

Der Tabelle 19 sind die ausgewählten Markermoleküle samt Retentionszeiten und charakteristischen Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen.

Tabelle 19: Übersicht der für die Quantifizierung des Kork-Infills verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentionen m/z	Ionenverhältnisse
Naturmaterial Infill	Kork	2-Methoxy-4-methylphenol	Kork1	15,4	138, 123, 95	100 : 87 : 22
		2-Methoxy-4-vinylphenol	Kork2	18,8	150, 135, 107, 77	100 : 77 : 24 : 21
		2-Methoxy-4-vinylphenol	Kork3	18,8	135, 150, 107, 77	77 : 100 : 24 : 21

5.1.7 Filtersubstrat

Bei dem Filtersubstrat handelt es sich um das Produkt Carbotec60 der Firma HAURATON GmbH, welches in den technischen Informationen mit spezieller Sieblinie und hohem reaktiven Karbonatgehalt deklariert wurde (HAURATON, 2023). Das Deutsche Institut für Bautechnik bestätigt den mineralischen Ursprung des Materials in dessen Zulassungsbescheid (DIBt, 2023). Informationen zu polymeren Inhaltsstoffen wurden nicht gefunden. Zum Ausschluss von Blindwerten aus diesem Material erfolgte die Untersuchung auf Mikroplastik. In den Chromatogrammen des Substrats wurden keine Polymere identifiziert. Des Weiteren konnten keine für das Material spezifischen Signale erkannt werden.

5.1.8 Granulat-Gemisch

In dem vorliegenden Infill-Gemisch beträgt der Anteil an Naturmaterialien, hier Hanf und Kreide, 70% und der Anteil an synthetischem Kunststoff, in diesem Fall EPDM, 30% (Polytan, 2023).

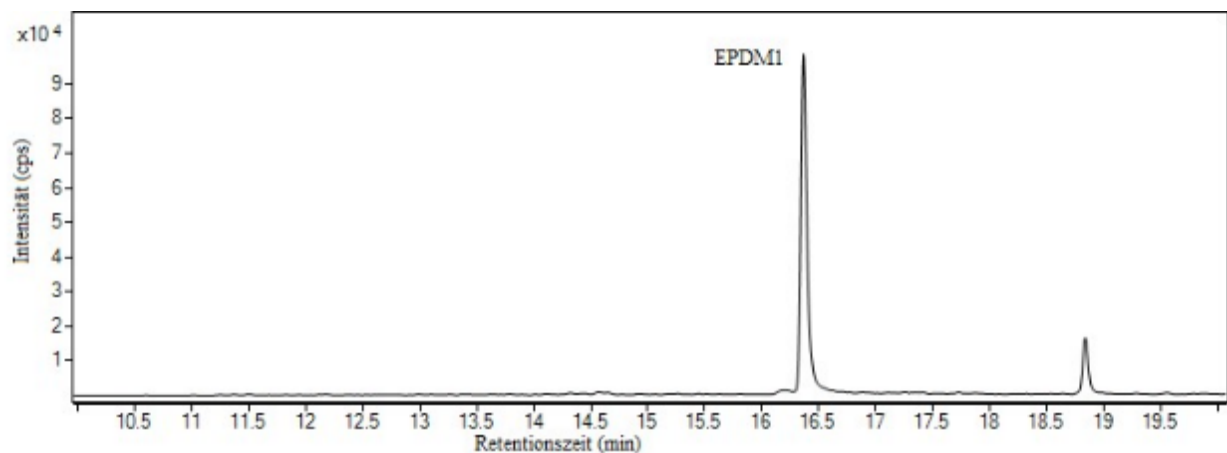


Abbildung 27: Extrahiertes Ionenchromatogramm von m/z 135 des Markers von EPDM bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C . Es wurden $92\ \mu\text{g}$ von dem Granulat-Gemisch gemessen.

Ein Abgleich der Chromatogramme mit denen aus der internen Datenbank war aufgrund der fehlenden Referenzmaterialien der einzelnen Komponenten nicht möglich. Stattdessen erfolgte ein Vergleich der Chromatogramme und Massenspektren von EPDM, Lignin und Holzpulver aus der Literatur (Tsuge, et al., 2011). Die zuvor für das Kork-Infill gewählten Marker eigneten sich aufgrund der geringen Intensität der Signale nicht zur Auswertung. Dafür konnte der Marker des Laufbahnmaterials auch in diesem Granulat detektiert werden. Die Abbildung 27 zeigt das extrahierte Ionenchromatogramm ($m/z = 135$) der untersuchten Massenspur des Fragmentions. Weitere materialspezifische Signale konnten nicht erkannt oder kalibriert werden. Der Tabelle 18 (unter Material EPDM) ist das ausgewählte Markermolekül samt Retentionszeit und charakteristischen Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen.

5.1.9 Gummigranulat

Über eine online Recherche konnten keine Informationen zu dem Werkstoff des Granulates gewonnen werden. Aufgrund des Alters des Kunststoffrasen-Platzes, von dem das Granulat gesammelt wurde, lässt sich ein SBR-Infill vermuten.

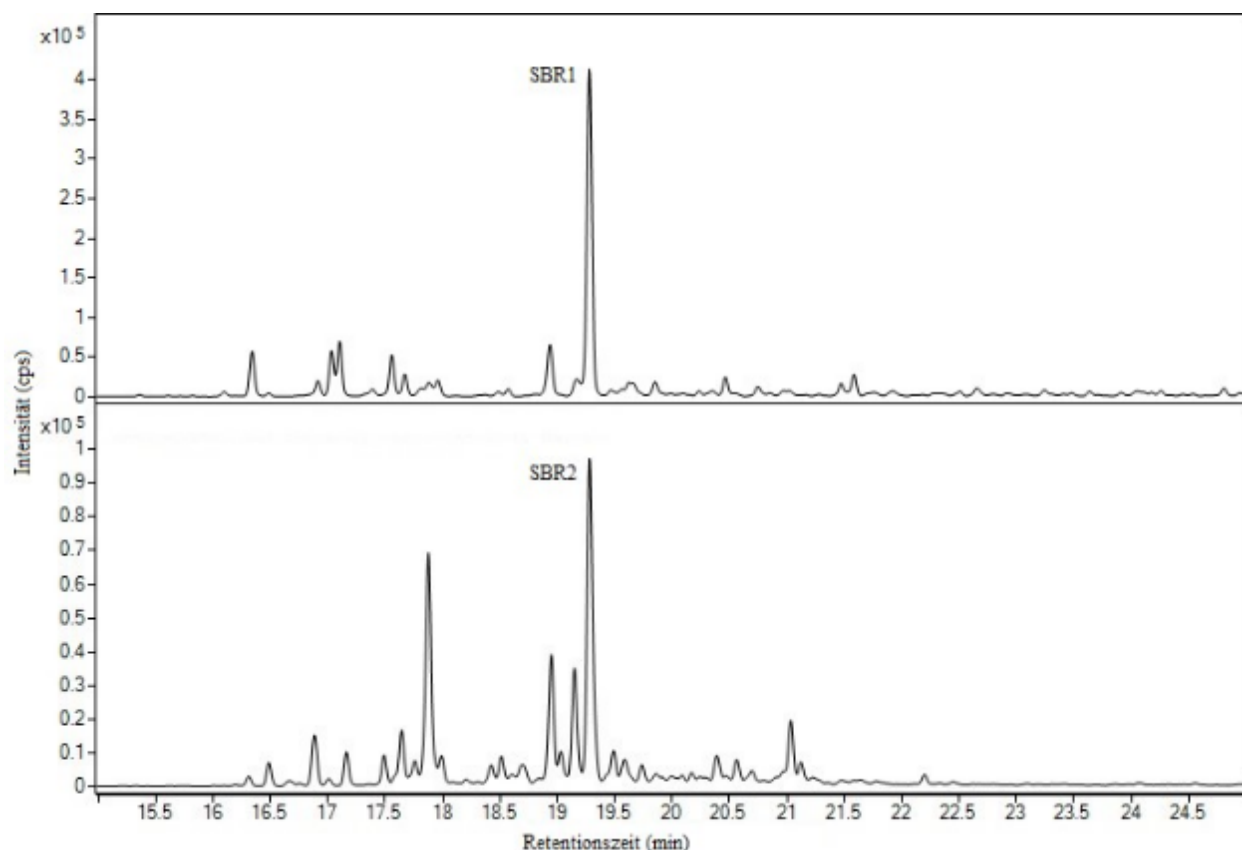


Abbildung 28: Extrahierte Ionenchromatogramme von m/z 104 und 158 des Markers von SBR bei einer Pyrolysetemperatur von 500°C . Es wurden $98\ \mu\text{g}$ des Gummigranulates gemessen.

Der Abgleich der Chromatogramme mit denen von SBR-Referenzmaterialien aus der internen Datenbank bestätigte das Polymer als Werkstoff des Granulates. Die Abbildung 28 zeigt die extrahierten Ionenchromatogramme ($m/z = 104$ & 158) der untersuchten Massenspuren der Fragmentionen bei einer Einwaage von $98\ \mu\text{g}$. Der ausgewählte Marker wurde in der Literatur schon als spezifisches Abbauprodukt des Polymers angegeben und wird unter TED-GC-MS Anwendern zur Quantifizierung genutzt (Eisentraut, et al., 2018). Der Tabelle 20 sind die ausgewählten Markermoleküle samt Retentionszeiten und charakteristischen Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse zu entnehmen. Die der Kalibration zugrunde gelegten Massen wurden unterstrichen.

Tabelle 20: Übersicht der für die Quantifizierung des Gummi-Granulates verwendeten Marker mit Ausgangswerkstoff, Abkürzung, Retentionszeiten und Massenspuren der Fragmentionen sowie die Ionenverhältnisse.

Material	Werkstoff	Marker	Abkürzung	Retentionszeit (min)	Fragmentionen m/z	Ionenverhältnisse
Gummi-Infill	SBR	Benzene, 3-cyclohexen-1-yl	SBR1	19,2	<u>104</u> , <u>158</u> , <u>129</u> , <u>115</u>	100 : 23 : 7 : 8
		Benzene, 3-cyclohexen-1-yl	SBR2	19,2	<u>158</u> , <u>104</u> , <u>129</u> , <u>115</u>	23 : 100 : 7 : 8

5.2 Ergebnisse der Untersuchungen der verschiedenen Probenmatrices

5.2.1 Wasserproben

Eine zentrale Schwierigkeit bei der Darstellung und Interpretation der Ergebnisse bestand in den unterschiedlichen Bezugsgrößen der erhobenen Wasserproben. Diese Unterschiede ergaben sich im Wesentlichen aus den standortspezifischen Probennahmesystemen und den hydrologischen Rahmenbedingungen.

Am Standort Sittensen konnte aufgrund des dort eingesetzten Probenahmekellers über einen längeren Zeitraum (mehrere Wochen) eine große Wassermenge von mehreren Litern gesammelt und anschließend analysiert werden. An den übrigen Standorten war eine derart kontinuierliche Sammlung nur eingeschränkt möglich, sodass die jeweils aufgefangenen Wasservolumina zwischen maximal 1 und 2 Litern lagen.

Zudem konnte nicht an allen Standorten ein Becherglas zur Sammlung des ablaufenden Wassers installiert werden. Um dennoch eine Abschätzung der gesamten Niederschlagsmengen während des jeweiligen Probenahmezeitraums vorzunehmen, wurden meteorologische Daten benachbarter Wetterstationen herangezogen. Dabei wurden für die Standorte in Nordrhein-Westfalen die Stationen Duisburg-Baerl und Düsseldorf, sowie für die Standorte in Hessen die Stationen Idstein, Bad Camberg und Montabaur berücksichtigt. Die ermittelten Niederschlagsmengen wurden auf die Fläche eines typischen Kunstrasenplatzes bezogen, wobei angenommen wurde, dass 18 Entwässerungsgullys pro Spielfeld vorhanden sind. Auf Basis der Daten aus Sittensen konnte zudem abgeschätzt werden, dass nur ein sehr geringer Anteil des Niederschlagswassers oberflächlich abgeführt wird: etwa 0,01 % des gesamten Regenwassers gelangt in die Gullys, während rund 1 % über die Drainage abgeleitet wird. Der überwiegende Teil infiltriert durch den Kunstrasen in den Untergrund und trägt somit zur Grundwasserneubildung bei. Unter diesen Annahmen wurden die abfließenden Wassermengen für die übrigen Standorte hochgerechnet.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist ferner zu berücksichtigen, dass die Probenahme standortbezogen an unterschiedlichen Punkten des Wasserpfades erfolgte. In Sittensen erfolgte die Probenahme an Wasser, das bereits mehrere Meter durch Ablaufrinnen und Rohrleitungen geflossen war. Im Gegensatz dazu wurde an den Standorten NRW 2, NRW 3 und NRW 4 der direkte Oberflächenabfluss beprobt, was eine „Worst-Case“-Situation hinsichtlich des potenziellen Austrags von Kunststoffpartikeln darstellt. An den Standorten in Hessen wurde hingegen das Drainagewasser (Abfluss in benachbarte Bäche) untersucht, welches nicht direkt mit den Oberflächenabflüssen der nordrhein-westfälischen Standorte vergleichbar ist. Diese methodischen Unterschiede erschweren einen quantitativen Vergleich zwischen den Standorten, erlauben jedoch eine qualitative Bewertung der verschiedenen Austragspfade von Kunststoffpartikeln aus Kunstrasenbelägen.

Trotz der unvermeidbaren Unterschiede in der Probenahme und den Standortbedingungen liefern die erhobenen Daten wertvolle Hinweise auf die Mechanismen und Größenordnungen des Austrags von Kunststoffpartikeln aus Kunstrasenflächen in die Umwelt.

Die Proben aus NRW wiesen im Vergleich zu den Proben aus Sittensen sowie den hessischen Standorten bereits optisch eine deutlich höhere Belastung mit Infill-Materialien und Kunststofffasern auf. Aufgrund dieser hohen Partikeldichte war eine quantitative Bestimmung mittels Thermischer Desorption-Gaschromatographie-Massenspektrometrie (TED-GC-MS) nicht zweckmäßig. Die ausgetragenen Kunststoffmengen an den NRW-Standorten wurden nur gravimetrisch bestimmt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die Mikroplastikergebnisse, die mittels TED-GC-MS analysiert wurden, dargestellt. Anschließend folgen die gravimetrisch ermittelten Mikroplastikkonzentrationen aus den stärker belasteten Proben. Im weiteren Verlauf werden zudem die Ergebnisse zu den übrigen untersuchten Spurenstoffen und Elemente präsentiert.

5.2.1.1 Mikroplastik

Tabelle 21: *Ergebnisse der Mikroplastikanalysen mittels TED-GC-MS und gravimetrisch, Probenahme über Kaskadenfiltration/ 1. Messserie, Alle Proben wurden in Sittensen genommen.*

IUTA-Probennummern	Probe	Teppich und Teppichnaht / PP/PET c (µg/L)	Fasern/ PE c (µg/L)	Infill-Materialien / Kork, EPDM, SBR C (µg/L)
LR-20230327-157	KB1	< BG	160	250
LR-20230327-158	LB1	< BG	23	140
LR-20230327-159	KU1	4,0	< BG	2,3
LR-20230327-160	D1	0,73	31	< BG
LR-20230616-74	KB2	< BG	130	14
LR-20230616-75	LB2	1,2	10	1,2
LR-20230616-76	KU2	11	< BG	14
LR-20230616-77	D2	6,3	< BG	0,88

KB=Kunstrasen behandelt, KU=Kunstrasen unbehandelt, LB=Laufbahn behandelt, Drainage

Die Werte für PE konnten nur durch Aussortieren und Wiegen einzelner Fasern ermittelt werden. PS und PUR (Teppichrücken) konnte in keiner Probe detektiert werden.

Tabelle 22: *Bestimmungsgrenzen für die einzelnen Polymere für die TED-GC-MS-Analysen, ermittelt für die Werte der 1. Messserie*

	PP c (µg/L)	PE c (µg/L)	PET c (µg/L)	Kork c (µg/L)	EPDM c (µg/L)	SBR c (µg/L)
Bestimmungsgrenze	< 0,014	< 0,21	< 0,021	< 0,0014	< 0,24	< 0,007

Die Bestimmungsgrenzen beziehen sich ausschließlich auf die TED-GC-MS.

Die erste und folgende zweite Messserie unterscheidet sich nur durch neue Kalibrierungen am TED-GC-MS-Messsystem.

PS und PUR wurden in keiner Probe nachgewiesen.

Tabelle 23: Ergebnisse der Mikroplastikanalysen mittels TED-GC-MS und gravimetrisch, Probenahme über Kaskadenfiltration oder Planktonnetze / 2. Messserie. Alle Proben mit einer LR-Nummer sind in Sittensen genommen worden. Die beiden Proben aus Hessen sind zu besserer Unterscheidung ohne LR-Nummer angegeben worden,

IUTA-Probennummern	Probe	Teppich und Teppichnaht / PP/PET c (µg/L)	Fasern/ PE c (µg/L)	Infillmaterialien / Kork, EPDM, SBR C (µg/L)
LR-20231205-27	KB3	1,6	76	>3,0
LR-20231205-26	LB3	< BG	< BG	>0,36
LR-20231205-28	KU3	2,1	60	0,58
LR-20240228-3739	KB4	< BG	< BG	0,33
LR-20240228-3738	LB4	< BG	< BG	0,05
LR-20240228-3740	KU4	< BG	31	>3,3
LR-20240228-3741*	D4	< BG	< BG	3,5
LR-20240228-3744	KB5	< BG	< BG	0,03
LR-20240228-3743	LB5	< BG	< BG	>0,22
LR-20240228-3745	KU5	0,22	40	0,21
LR-20250214-48	D6	< BG	< BG	>45
LR-20250523-50	KB7	< BG	< BG	>2161
LR-20250612-45	KU8	< BG	480	>4500
LR-20250612-46	D8	< BG	< BG	>102
	Hessen 1	< BG	< BG	13
	Hessen 2	< BG	1,2	4,9

In der mit* gekennzeichneten Probe wurde ein großes rotes Stück Kunststoff aussortiert Da es weder von Farbe und Form plausibel zu den Kunstrasenbestandteilen zugeordnet werden konnte, wurde es bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Blau gekennzeichnet sind die beiden Proben KB7 und KU8. Die Menge an filtriertem Wasser zur Probengewinnung war sehr gering, so dass die Werte unplausibel hoch sind.

Alle mit dem > Zeichen angegebenen Ergebnisse (grau unterlegt) liegen außerhalb der Kalibrierung. Hier ist nur eine halbquantitative Aussage möglich. Dazu wurde der höchste Kalibrierpunkt zur Berechnung des angegebenen Ergebnisses benutzt und das >-Zeichen davorgesetzt.

Tabelle 24: Bestimmungsgrenzen für die einzelnen Polymere für die TED-GC-MS-Analysen, ermittelt für die Werte der Tabelle 23 / 2. Messserie

	PP c (µg/L)	PE c (µg/L)	PET c (µg/L)	Kork c (µg/L)	EPDM c (µg/L)	SBR c (µg/L)
Bestimmungsgrenze	< 0,24	< 1,24	< 0,01	< 0,01	< 0,4	< 0,09

Die Bestimmungsgrenzen beziehen sich ausschließlich auf die TED-GC-MS.

Während der ersten Probenahmen in Sittensen wurde festgestellt, dass die Drainage und Entwässerungsstränge des Kunststoffrasens sowie der Laufbahn mit vereinzelt Rasenfilamenten belastet waren. Vor der ersten Probenahme erfolgte keine explizite Reinigung der Rohrleitungen und Sammelbehälter, so dass Fasern möglicherweise bereits vor dem Beobachtungszeitraum eingetragen wurden. Die Behälter standen zudem offen im Probenahmekeller, wodurch luftgetragene Fasern während der Wartungsarbeiten oder der Probenahme ebenfalls eingetragen worden sein könnten. Obwohl PE-Fasern visuell in fünf Proben erkannt wurden, konnte PE mit der TED-GC-MS nicht nachgewiesen werden. Dies könnte auf die kurze Nutzungsdauer des Sportplatzes und damit geringe Faserabriebmengen zurückzuführen sein. Die höheren Konzentrationen der ersten Probenahme könnten mit der unzureichenden Reinigung vor Beobachtungsbeginn zusammenhängen.

Tabelle 25: Ergebnisse der Mikroplastikanalyse mittels Gravimetrie. Bezogen wurden die Werte auf die berechnete abgeflossene Regenmenge für den beprobten Gully.

Standorte	IUTA-Nummer	Faser mg/L	Infill mg/L	Bemerkung
NRW 2	LR-20250506-57	141	260	Planktonnetz, Gravimetrisch
NRW 2	LR-20250603-60	0	29.000	Becherglas, Gravimetrisch Lokales Starkregenereignis
NRW 3	LR-20250506-50	19	1.600	Planktonnetz, Gravimetrisch
NRW 4	LR-20250506-44	81	7.300	Planktonnetz, Gravimetrisch
NRW 4	LR-20250625-57	22	12.000	Becherglas, Gravimetrisch, lokales Starkregenereignis

Der Kunstrasenplatz NRW 4 zeigt den höchsten Infill Verlust während des Probenahmezeitraums, gefolgt von NRW 3 und NRW 2, wenn der Probenahmezeitraum ohne das Starkregenereignis berücksichtigt wird. Allerdings zeigte der Platz NRW 2 die höchsten Verluste an Fasern.

Generell lässt sich aus diesen Ergebnissen ableiten, dass der Infill Verlust mit dem Alter der Kunstrasenplätze steigt. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass Starkregenereignisse die Menge des freigesetzten Infills dramatisch erhöhen. Das Starkregenereignis war lokal so begrenzt, dass es nicht durch die Wetterstationen erfasst wurde, so dass die Regenmengen für den Sammelzeitraum, die herangezogen wurden, deutlich geringer sind, als sie am Sportplatz tatsächlich waren.

5.2.1.2 Spurenstoffe und Elemente

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Spurenstoff- und Elementanalytik für vier Kunstrasenplätze zusammengefasst. Bei den Plätzen aus Hessen konnte kein Wasser für die Analytik gesammelt werden, daher wurden nur die Kunstrasenplätze aus NRW und der Sportplatz des VFL Sittensen beprobt. Beim VFL Sittensen wurden allerdings alle vier Abläufe (Laufbahn behandelt, Kunstrasen behandelt und unbehandelt und Drainage) beprobt.

In *Tabelle 26* sind die Ergebnisse der PAK-Analyse zusammengefasst. In keiner Probe wurden Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze detektiert.

Tabelle 26: PAK-Ergebnisse ausgewählter Proben

Probenbezeichnung IUTA	PNe-Stelle	BaP	Summe Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(ghi)perylen und Indeno(1,2,3- cd)pyren	Summe EPA PAK	
				µg/L	
LR 20250207-020	Sittensen LB	< 0,010	n.n.	n.n.	n.n.
LR 20250207-021	Sittensen KU	< 0,010	n.n.	< 0,15	< 0,15
LR 20250207-022	Sittensen KB	< 0,010	n.n.	< 0,15	< 0,15
LR 20250207-023	Sittensen D	< 0,010	n.n.	< 0,15	< 0,15
LR-20250506-060	NRW 2	< 0,010	n.n.	n.n.	n.n.
LR-20250506-053	NRW 3	< 0,010	n.n.	< 0,15	< 0,15
LR-20250506-047	NRW 4	< 0,010	n.n.	< 0,15	< 0,15 (Naphthalin=0,010)
					(Phenanthren=0,010)

n.n. - nicht nachgewiesen. Die Ergebnisse aller Einzelkomponenten liegen unter der BG, so dass diese bei der Summenbildung dann nicht berücksichtigt werden.

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der PFAS-Analytik zusammengefasst. In Tabelle 27 und in Tabelle 28 sind die Ergebnisse für die verschiedenen Abläufe des VFL Sittensen von zwei Probenahmen dargestellt. In Tabelle 29 sind die Ergebnisse der Kunstrasenplätze aus NRW zusammengestellt. An allen Standorten konnten PFAS in den Proben nachgewiesen werden, auch wenn die Ergebnisse insgesamt als niedrig eingestuft werden konnten.

Tabelle 27: PFAS-Ergebnisse ausgewählter Proben

Probenbezeichnung		LR 20250207- 020	LR 20250207- 021	LR 20250207- 022	LR 20250207- 023
Probenahmestelle		Sittensen Laufbahn behandelt	Sittensen Kunstrasen behandelt	Sittensen Kunstrasen unbehandelt	Sittensen Drainage
	Einheit				
PFBA	ng/L	1,5	2,7	8,0	3,0
PFPeA	ng/L	2,9	2,3	11	1,2
PFHxA	ng/L	2,4	2,2	9,6	0,7
PFHpA	ng/L	0,41	0,51	1,9	0,23
PFOA	ng/L	0,25	0,31	1,1	0,34
PFNA	ng/L	0,11	0,14	0,56	0,099
PFDA	ng/L	< 0,045	0,074	0,18	< 0,045
PFBS	ng/L	0,10	0,31	1,3	0,18
PFHxS	ng/L	< 0,045	< 0,045	0,058	0,083
PFOS	ng/L	0,19	0,35	0,38	0,96
H4-PFOS	ng/L	0,050	< 0,045	0,045	< 0,045

Tabelle 28: PFAS-Ergebnisse ausgewählter Proben

Probenbezeichnung IUTA	LR 20250523-047	LR 20250523- 048	LR 20250523-049	
Probenahmestelle incl. Bemerkungen	Sittensen; Kunstrasen unbehandelt (ca. 2 L) Fundstücke: weißes Material wurde dem Wasser entnommen	Sittensen; Drainage	Sittensen; Kunstrasen behandelt; Fundstücke: eine Kunstrasen-Faser wurde dem Wasser entnommen	
	Einheit			
PFBA	ng/L	10	6,1	18
PFPeA	ng/L	44	6,5	22
PFHxA	ng/L	25	4,7	16
PFHpA	ng/L	3,4	1,5	4,3
PFOA	ng/L	2,1	0,96	2,4
PFNA	ng/L	1,1	0,45	1,9
PFDA	ng/L	0,66	0,19	0,77
PFBS	ng/L	0,99	0,50	3,4
PFHxS	ng/L	0,067	0,060	0,10
PFOS	ng/L	1,3	1,2	1,0
H4-PFOS	ng/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabelle 29: PFAS-Ergebnisse ausgewählter Proben

Probenbezeichnung IUTA	LR 20250603-060	LR 20250603-049	LR 20250625-057	
Probenahmestelle	NRW 2	NRW 3	NRW 4	
	Einheit			
PFBA	ng/L	2,7	6,2	92
PFPeA	ng/L	0,61	0,78	7,4
PFHxA	ng/L	0,66	1,5	6,5
PFHpA	ng/L	0,50	0,96	1,9
PFOA	ng/L	0,90	1,6	6,4
PFNA	ng/L	0,31	1,6	2,4
PFDA	ng/L	0,40	3,4	11
PFBS	ng/L	0,069	0,51	0,13
PFHxS	ng/L	0,028	< 0,04	0,16
PFOS	ng/L	1,1	2,2	3,5
H4-PFOS	ng/L	0,11	0,25	0,32

In den Tabelle 30 und *Tabelle 31* sind die Ergebnisse der Metallanalytik aufgeführt, für Sittensen und für die Kunstrasenplätze in NRW.

In Sittensen wurden die höchsten Konzentrationen in der Probe des unbehandelten Kunstrasens nachgewiesen, gefolgt von der Drainage. Im behandelten Kunstrasen war die Konzentration für alle untersuchten Metalle deutlich niedriger als in den anderen beiden Proben. Dies deutet darauf hin, dass das Filtrationssubstrat auch Metalle zurückhalten kann.

Tabelle 30: Element-Ergebnisse ausgewählter Proben (analysiert ICP/MS)

Probenbezeichnung IUTA	LR 20250523-047	LR 20250523- 048	LR 20250523-049	
Probenahmestelle incl. Bemerkungen	Sittensen; Kunstrasen unbehandelt (ca. 2 L) Fundstücke: weißes Material wurde dem Wasser entnommen	Sittensen; Drainage	Sittensen; Kunstrasen behandelt; Fundstücke: eine Kunstrasen-Faser wurde dem Wasser entnommen	
	Einheit			
Cadmium	µg/L	0,061	0,058	< 0,02
Nickel	µg/L	4,7	2,1	1,8
Blei	µg/L	2,7	2,9	0,67
Zink	µg/L	180	190	63
Chrom	µg/L	4,7	3,5	2,6
Kupfer	µg/L	12	9,3	4,8
Eisen	µg/L	600	490	110

Der Sportplatz des VFL Sittensen zeigt für die Metalle Chrom, Kupfer und Eisen höhere Werte als in den Sportplätzen aus NRW wiedergefunden wurde. Eine mögliche Erklärung wäre, dass das Alter des Platzes einen Einfluss hat und die Metalle vor allem im Neuzustand aus den Materialien ausgewaschen werden.

Allerdings zeigt der Sportplatz NRW 2 die niedrigsten Konzentrationen von allen vier untersuchten Sportplätzen, obwohl er von den vier Plätzen mit 5 Jahren, der zweit jüngste ist. Ob bauliche Unterschiede diese Konzentrationsunterschiede verursacht haben, kann nicht abschließend geklärt werden.

Tabelle 31: Element-Ergebnisse ausgewählter Proben (analysiert ICP/MS)

Probenbezeichnung IUTA		LR 20250603-060	LR 20250603-049	LR 20250625-057
Probenahmestelle		NRW 2	NRW 3	NRW 4
	Einheit			
Cadmium	µg/L	< 0,02	0,043	< 0,02
Nickel	µg/L	0,45	0,87	1,1
Blei	µg/L	0,5	2,3	1,7
Zink	µg/L	27	150	220
Chrom	µg/L	0,15	0,8	< 0,2
Kupfer	µg/L	2,4	5,0	3,5
Eisen	µg/L	16	160	470

Wie erwartet, konnten in allen untersuchten Proben PFAS und Elemente nachgewiesen werden. PAKs wurden nur vereinzelt und im Bereich der Bestimmungsgrenze detektiert.

Kalbe et al 2013 haben die Freisetzung von PAKs und Zink aus Kunstrasensystemen in Elutionsversuchen (Säulenversuche und 1 : 2 Schütteleuate) ermittelt. PAKs wurden dabei im Bereich von wenigen µg/L, Zink im unteren mg/l-Bereich detektiert. Die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Wässer liegen unter den von Kalbe ermittelten Daten.

PFAS werden bei der Herstellung von Faser eingesetzt, daher war eine Freisetzung zu erwarten. Die Summenwerte der detektierten 11 PFAS gemäß DIN 38407-42:2011 schwanken zwischen 7 und 120 ng/L ohne erkennbare Zusammenhänge zum Alter und zur Bauart der Plätze.

5.2.2 Bodenproben

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis der untersuchten Bodenproben dargestellt. Die Bodenproben wurden händisch aussortiert und der Infill- als auch der Faseranteil gravimetrisch bestimmt.

Dargestellt ist der Infill-Anteil in g/kg Boden für die einzelnen Probenahmeorte. Bei der Probenahme am Standort Sittensen 2 wurde kein Infill nachgewiesen. Der Standort der Probenahme lag weiter vom großen Kunstrasenplatz und von der Laufbahn entfernt als bei der erste Probenahme (vgl. Abbildung 15). Daher ist es nicht verwunderlich, dass im Vergleich zur ersten Probenahme kein Mikroplastik bestimmt werden konnte.

Die Ergebnisse zeigen für die älteren Kunstrasenplätze eine hohe Infill-Konzentration im Boden, welche mit der Entfernung zur Quelle abnimmt.

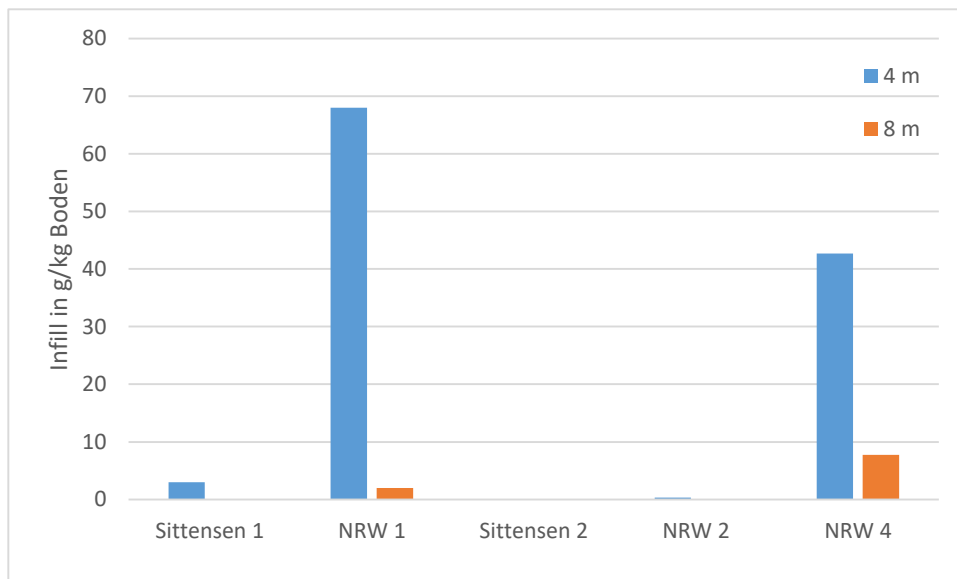


Abbildung 29: Menge Infill in den untersuchten Bodenproben, blaue Säulen in 4 m Entfernung zum Kunstrasenplatz, orange Säulen in 8 m Entfernung zum Kunstrasenplatz.

Am Standort NRW 3 konnten keine Probe genommen werden, da der Boden zu einen zu stark verdichtet und der Bewuchs mit Bäumen und Sträuchern eine Probenahme nicht erlaubte. Fotos des Bodens zeigen allerdings in 4 Meter Entfernung zum Tor eine extrem hohe Belastung mit Infill (vgl.

Abbildung 30), was die Aussage unterstreicht, dass das Alter des Platzes direkt mit der Konzentration des Infill-Materials im Boden korreliert. Dabei spielen zwei Faktoren eine Rolle 1) der längere Zeitraum, in dem sich Materialien angereichert haben können, 2) Verbesserte Strukturen auf dem Kunstrasenplatz selber (andere Halme, anders geformtes Infill). Aber auch bauliche Maßnahmen wie Ablaufgitter führen zu einem verringerten Austrag bei jüngeren Plätzen.



Abbildung 30: Foto des angrenzenden Bodens von Kunstrasenplatz NRW 3, eigene Aufnahme

5.2.3 Luftproben

Nach 14-tägiger Sammlung wurden 51 µg PM10 Staub auf dem Filter gesammelt. Der Filter wurde dann mit dem REM/RISE-Mikroskop untersucht. Die nachfolgende Abbildung 31 zeigt zunächst einen Vergleich eines unbelegten Filters mit dem beaufschlagten Filters. Die Belegung des Filtermaterials ist deutlich zu erkennen. Es sind einige größere Partikel im Bereich von mehreren Mikrometern zu erkennen.

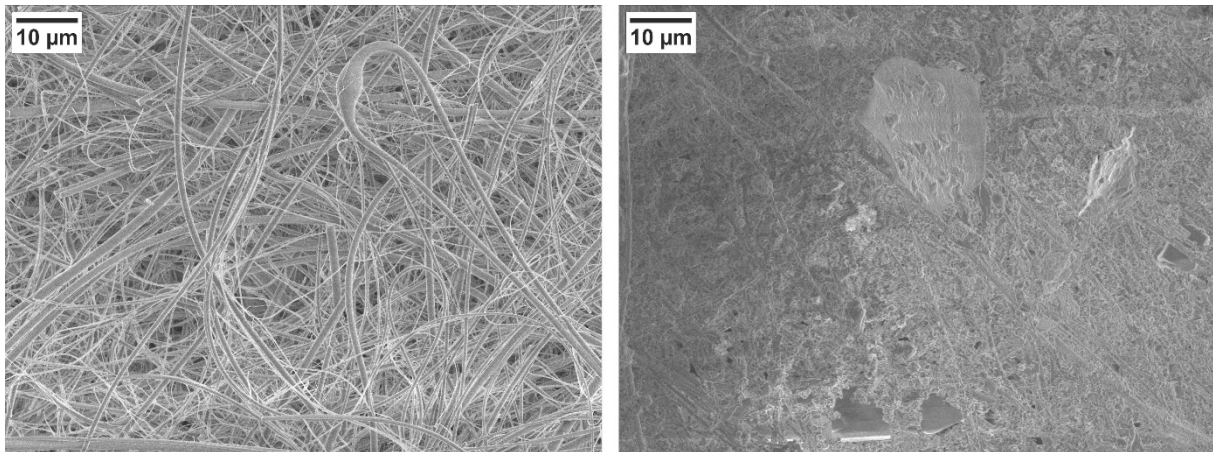


Abbildung 31: REM-Aufnahmen eines unbelegten (links) und des beaufschlagten Filters (rechts) im direkten Vergleich.

Der belegte Filter wurde anschließend im REM systematisch untersucht, um auffällige Partikel zu identifizieren. Auffällig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Morphologie auf mögliche Kunstrasenbruchstücke hindeutet. Abbildung 32 zeigt beispielhaft die REM-Aufnahme eines solchen Partikels. Nach der Identifikation wurden die Partikel zunächst mit dem Raman-Mikroskop lichtoptisch abgebildet (Abbildung 33, links), bevor im Raman-Modus versucht wurde, ein Spektrum zur Identifikation der chemischen Zusammensetzung zu erhalten. Hierfür wird ein fokussierter Laserstrahl auf das Partikel gerichtet und das emittierte Licht mithilfe eines Spektrometers auf den Ramanshift hin untersucht. Für die Untersuchung wurde mit der geringst-möglichen Laserleistung (0,1 mW) sowie einer möglichst kurzen Belichtungsdauer gearbeitet. Trotz dieser Einstellungen war es allerdings nicht möglich, die untersuchten Partikel zu identifizieren. Der Energieeintrag des Lasers war dennoch so groß, dass er dafür sorgte, dass sich die Position der Partikel während der Messung veränderte, siehe Abbildung 33 rechts. Dieses Verhalten zeigte sich bei allen untersuchten Partikeln, so dass es mit dieser Methode nicht möglich war, Polymerpartikel nachzuweisen. Aufgrund der schlechten Haftung der Partikel auf den Filterproben scheidet die RISE-Untersuchung zur Identifikation von Nanoplastik aus.

Die REM-Messungen zeigen, dass auf dem Filter weniger als 1% der Partikel potenziell Mikroplastikpartikel darstellen. Demzufolge wäre eine TED-GC-MS-Analyse aufgrund der Nachweisgrenze der Polymere nicht in der Lage gewesen, einen Nachweis zu erbringen, selbst bei einer vollständigen Analyse des Gesamtfilters. Aus diesem Grund wurde auf eine nachfolgende TED-GC-MS-Messung verzichtet.



Abbildung 32: REM-Aufnahmen eines Partikels der möglicherweise ein Bruchstück des Kunstrasens darstellt.

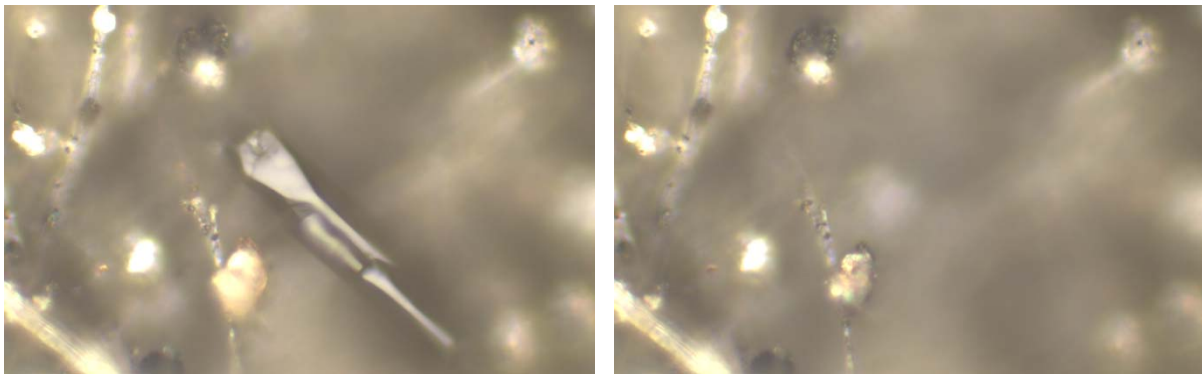


Abbildung 33: Lichtmikroskopische Aufnahme des Partikels aus Abbildung 32 (links) sowie dieselbe Probenstelle nach der Raman-Spektroskopie (rechts). Das Partikel ist nicht mehr vorhanden.

6 Diskussion

6.1 Bewertung der Ergebnisse

6.1.1 Vergleich der Mikroplastikemission der verschiedenen Abläufe beim VFL Sittensen

Abbildung 34 dokumentiert die gemessenen Mikroplastikkonzentrationen in den vier untersuchten Abläufen des VFL Sittensen über die Projektlaufzeit. In der ersten Probenahme unmittelbar nach Installation des Kunstrasens und des Probenahmekellers wurden für die Abläufe Kunstrasen behandelt (KB), Laufbahn behandelt (LB) und Drainage (D) erhöhte Konzentrationen sowohl von Fasern als auch von Infill-Material festgestellt. Diese Werte erschienen im Hinblick auf die behandelten Leitungssysteme plausibilitätsbedingt unwahrscheinlich und führten zu der Vermutung, dass Substanzen noch aus Bauphasen in den Leitungssystemen vorhanden waren. Nach der ersten Probenahme wurden die Rohrleitungen ausgespült und gereinigt. Im weiteren Verlauf der Probenahme zeigte sich bei Kunstrasen- und Laufbahn behandelt eine sukzessive Abnahme der Konzentrationen sowohl von Fasern als auch vom Infill-Material; ab der 4. Probenahme (KB) bzw. ab der 3. Probenahme (LB) konnten weder Fasern noch Infill nachgewiesen werden. Diese Beobachtungen unterstützen die Hypothese, dass die initialen Konzentrationen primär durch Bauaktivitäten bzw. Bauzustände verursacht waren.

In der Drainage konnte ab der zweiten Probenahme kein Fasernachweis mehr erfolgen; hingegen zeigte der Verlauf der Projektlaufzeit eine Zunahme der gemessenen Infill Menge, die in diesem Leitungssystem wieder auffiel.

Bezogen auf den Kunstrasen unbehandelt (KU) zeigte sich in den ersten beiden Probenahmen sowohl Infill als auch Material aus Teppich bzw. Teppichnaht. Ob diese Substanzen durch den Bau eingebracht wurden, konnte nicht abschließend geklärt werden. Ab der dritten Probenahme war jedoch kaum noch Material aus Teppich bzw. Teppichnaht nachweisbar; lediglich sehr geringe Mengen Infill wurden weiterhin detektiert. Ab diesem Zeitpunkt wurden wiederholt Fasern nachgewiesen.

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse darauf hin, dass mit zunehmendem zeitlichen Abstand von den Baumaßnahmen zur Platzerrichtung und den hierdurch begründeten erhöhten Anfangskonzentrationen, insbesondere in den gefilterten Abläufen (Kunstrasen und Laufbahn behandelt) keine Infill-Materialien oder Fasern mehr nachgewiesen werden konnten. Die Funktionalität des Filtersystems konnte damit belegt werden.

Insgesamt liegen die gemessenen Konzentrationen des Infills oder der Fasern deutlich unterhalb der Werte, die an Sportplätzen in NRW (eher ältere Sportplätze) nachgewiesen wurden (ca. Faktor 1000 geringer).

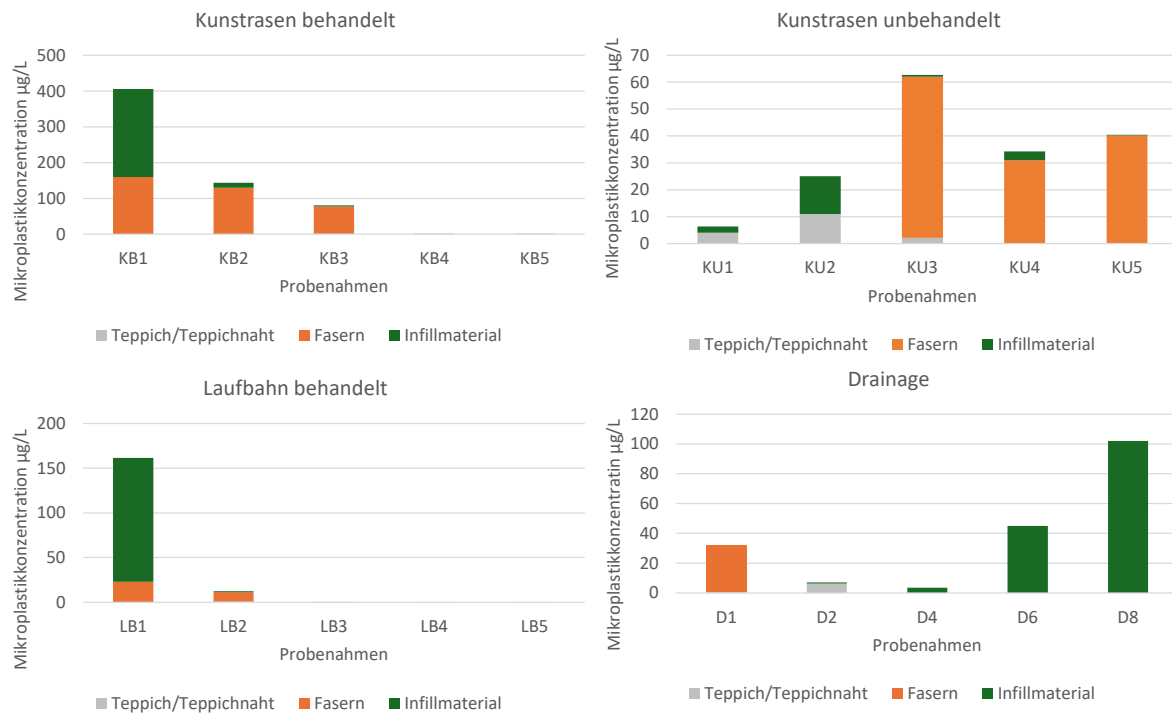


Abbildung 34: Mikroplastikkonzentration in µg/L (Bestimmung mittels TE-GC-MS) für die vier verschiedenen Abläufe des VFL Sittensen.

6.1.2 Vergleich der Mikroplastikemission zwischen den Standorten

Die Ergebnisse zeigen, dass der Sportplatz in Sittensen im Vergleich zu den Standorten in Hessen oder NRW einen deutlich geringeren Materialaustrag aufweist. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse muss jedoch der jeweilige Probenahmeort berücksichtigt werden, da dieser die erfassten Konzentrationen maßgeblich beeinflusst. Während in Sittensen ein Probenahmekeller zur Sammlung des ablaufenden Wassers installiert war, erfolgte die Beprobung an den NRW-Standorten direkt im Gully. In Hessen 1 und 2 wurden hingegen Drainageproben entnommen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Probenahmepunkte sind die Ergebnisse nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Die Werte aus Sittensen sowie den hessischen Standorten stellen am ehesten Emissionskonzentrationen dar, welche den regulären Austrag widerspiegeln. Die NRW-Standorte sind hingegen als „Worst-Case“-Szenarien zu bewerten, da dort die gemessene Masse nicht gleichzusetzen ist mit der Menge, welche direkt in die Kanalisation gelangt. Tatsächlich wird der überwiegende Teil des Infill-Materials in den Auffangsystemen (z. B. Sinkkästen, Sedimentationsbehälter) zurückgehalten, sofern diese regelmäßig gereinigt werden und keine Starkregenereignisse auftreten.

In Abbildung 35 ist der Infill- und Faserverlust der 3 Sportplätze aus NRW in mg/L dargestellt.

Zum einen ist deutlich erkennbar, dass Starkregenereignisse zu einem erhöhten Infill-Verlust führen. Darüber hinaus zeigt sich, dass der Infill-Verlust mit dem Alter des Platzes zusammenhängt und zudem durch ortsspezifische Gegebenheiten beeinflusst wird, insbesondere durch die auf dem Platz ausgebrachte Infill-Menge. Ein Zusammenhang mit der Faserfreisetzung konnte allerdings weder durch die Regenmengen noch durch das Alter der Plätze belegt werden. Ähnliche Ergebnisse wurden von Breitbarth et al. (2022) in ihrem Projekt InRePlast berichtet.

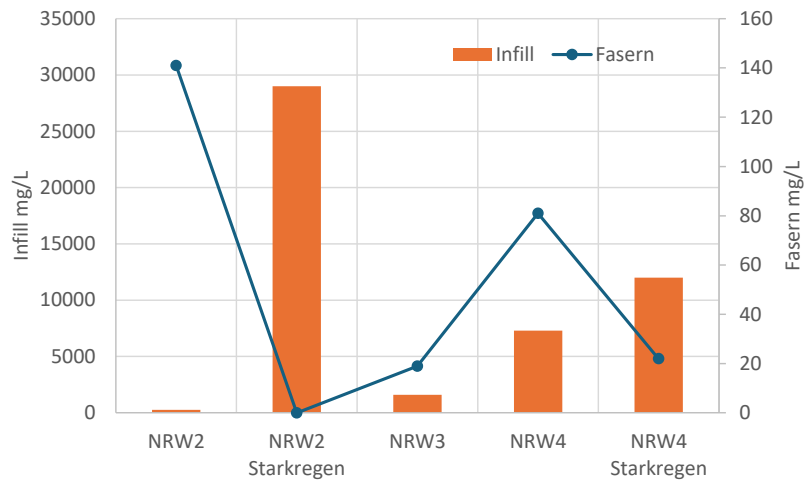


Abbildung 35: Infill Konzentration der 3 Sportplätze aus NRW (Masse gravimetrisch bestimmt)

6.1.2.1 Einfluss technischer und standortspezifischer Faktoren für die Reduzierung der Mikroplastik Emission

Die Ergebnisse aus Sittensen zeigen, dass der Einsatz von Filtersystemen grundsätzlich dazu beitragen kann, den Austrag von Mikroplastik zu reduzieren. Neben der Reduzierung des Mikroplastikaustrags deuten die Ergebnisse darauf hin, dass auch die Metallgehalte in dem behandelten Ablauf reduziert waren. Auf Grundlage der vorliegenden Daten konnte jedoch nicht abschließend bewertet werden, wie lange das verwendete Filtermaterial eine zufriedenstellende Rückhaltewirkung aufweist. Es ist davon auszugehen, dass die Effizienz der Filter im Laufe der Zeit durch Sedimentablagerungen und Alterung nachlässt.

Ein weiterer relevanter Einflussfaktor ist die Ausgestaltung der Sportanlage. In Sittensen wurde beobachtet, dass insbesondere die umlaufende Laufbahn eine erhebliche Freisetzung von Granulat begünstigt (vgl. Abbildung 36). Diese Partikel konnten jedoch nicht in den Auffangbehältern in entsprechender Menge wiedergefunden werden. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass ein Teil des freigesetzten Materials außerhalb der Entwässerungssysteme verteilt oder durch mechanische Verlagerung (z. B. an Schuhen oder Kleidung) abgetragen wurde. Wenn diese Materialien regelmäßig entfernt werden, kann der Eintrag in die Umwelt erheblich reduziert werden.



Abbildung 36: Fläche neben der Laufbahn des VFL Sittensen (li), Boden in unmittelbarer Nähe der Laufbahn (re)

Zudem wurde beobachtet, dass an den Standorten unterschiedlichste Mengen des Infill-Materials auf den Plätzen ausgebracht wird. Am Standort NRW 4 lag so viel Infill-Material auf dem Platz, dass kaum noch Fasern erkennbar waren. Von diesem Platz wurde auch von allen untersuchten Plätzen das meiste Infill freigesetzt (vgl. Abbildung 37). Hier kann durch Schulung des Personals Abhilfe geschaffen werden. Gleiches gilt für die Reinigung der Auffangbehälter im Ablauf. Bei der Probenahme waren nahezu alle Auffangbehälter mit Infill-Material, Fasern und anderen Verunreinigungen gefüllt und in einigen Abläufen fehlten die Auffangkörbe ganz. Dies führte dazu, dass die weiteren Materialien nicht aufgefangen werden, sondern direkt in die Kanalisation ausgewaschen werden. Eine Reinigung der Behälter reduziert die Menge des ausgetragenen Infills erheblich und sollte daher vor Ort regelmäßig durchgeführt werden. Die Emission der Fasern wird höchstwahrscheinlich nicht davon beeinflusst werden, da diese aufgrund ihres geringen Gewichtes nicht in den Behältern zurückgehalten werden.



Abbildung 37: Fotos des Kunstrasenplatzes des Standortes NRW 4

6.1.2.2 Hauptaustragspfade von Mikroplastik und Einfluss der Standortbedingungen

In den untersuchten Luftproben konnten keine Mikroplastikpartikel nachgewiesen werden. Dies weist darauf hin, dass der Hauptaustragspfad für Infill-Materialien und Mikroplastik über das Wasser sowie durch mechanische Verlagerung durch sporttreibende Personen erfolgt.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Sportplätze ist aufgrund unterschiedlicher Bezugseinheiten und Probenahmebedingungen eingeschränkt. Im Rahmen dieser Studie wurde der Austrag auf die gesammelte Wassermenge bezogen, um eine einheitliche Bewertungsgrundlage zu schaffen. Die Anzahl der Spielveranstaltungen sowie die Nutzungsintensität der Plätze wurden dabei nicht berücksichtigt, stellen jedoch potenzielle Einflussgrößen dar (Breitbarth 2022).

Darüber hinaus konnte bei Starkregenereignissen (z. B. Standort NRW 2 und NRW 4) ein deutlich erhöhter Austrag von Infill-Material festgestellt werden. Dies unterstreicht, dass meteorologische Extremereignisse einen maßgeblichen Einfluss auf die Verlagerung von Kunststoffpartikeln haben können.

Je nach Standort des Probenahmeequipments ist zudem mit unterschiedlichen Austragsraten zu rechnen. Frühere Untersuchungen (vgl. Breitbarth 2022) zeigen, dass insbesondere die

Zugangsbereiche von Kunstrasenplätzen, also die Zonen, über die Spielende den Platz betreten und verlassen, einen erhöhten Materialverlust aufweisen.

Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass Infill-Materialien auch auf angrenzenden Böden nachweisbar sind, wobei die Konzentrationen mit zunehmendem Abstand zur Spielfläche abnehmen. Dies deutet auf eine Akkumulation von Kunststoffpartikeln im Boden über längere Zeiträume hin. Eine allmähliche Anreicherung über Jahrzehnte erscheint daher plausibel und sollte in zukünftigen Langzeituntersuchungen weiter quantifiziert werden. Die Ergebnisse aus diesem Projekt stützen zudem diese Aussage, da die Menge an Infill im Boden mit dem Abstand zum Kunstrasen als auch mit dem mit Alter der Plätze positiv korreliert war.

6.1.3 Bewertung der Spurenstoffemission

Es wurde vermutet, dass der Eintrag von Spurenstoffen abhängig ist von der Art des Kunstrasens und der eingesetzten Infill-Materialien. Diese erwarteten Unterschiede konnten nicht in den Proben festgestellt werden. Um Werte eingruppiert zu können, sind in den folgenden Tabellen verschiedene Grenz- und Richtwerte für Wasser (TrinkwV⁸, GrwV⁹ und OGewV¹⁰) aufgeführt.

⁸ Trinkwasserverordnung, https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2023/TrinkwV.pdf (08.09.2025)

⁹ Grundwasserverordnung; https://www.lanuk.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/pdf/GrwV_2017.pdf (08.09.2025)

¹⁰ Oberflächengewässerverordnung;

Tabelle 32: Auszug der Grenzwerte für PAK, PFC und Metalle gemäß TrinkwV.

Substanz	Grenzwert/ µg/L	Bemerkungen/Text aus der TrinkwV
BaP ¹¹	0,010	
PAK ⁴	0,10	Summe der folgenden nachgewiesenen und mengenmäßig bestimmten Stoffe: Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(ghi)perylen und Indeno(1,2,3-cd)pyren. Messwerte für die Einzelsubstanz, die unterhalb der Bestimmungsgrenze des jeweiligen Untersuchungsverfahrens liegen, werden bei der Summenbildung nicht berücksichtigt.
Summe PFAS 20 ¹²	0,10	Summe der folgenden nachgewiesenen und mengenmäßig bestimmten Stoffe: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA), Perfluorheptansäure (PFHpA), Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluornonansäure (PFNA), Perfluordecansäure (PFDA), Perfluorundecansäure (PFUnDA), Perfluordodecansäure (PFDoDA), Perfluortridecansäure (PFTrDA), Perfluorbutansulfonsäure (PFBS), Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS), Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS), Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS), Perfluoroctansulfonsäure (PFOS), Perfluornonansulfonsäure (PFNS), Perfluordecansulfonsäure (PFDS), Perfluorundecansulfonsäure (PFUnDS), Perfluordodecansulfonsäure (PFDoDS) und Perfluortridecansulfonsäure (PFTrDS). Messwerte für die Einzelsubstanz, die unterhalb der Bestimmungsgrenze des jeweiligen Untersuchungsverfahrens liegen, werden bei der Summenbildung nicht berücksichtigt. Die Konzentrationen der zur Summenbildung herangezogenen PFAS sind einzeln auszuweisen. Der Grenzwert gilt ab dem 12. Januar 2026
Summe PFAS 4 ⁵	0,020	Summe der folgenden nachgewiesenen und mengenmäßig bestimmten Stoffe: Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluornonansäure (PFNA), Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS). Messwerte für die Einzelsubstanz, die unterhalb der Bestimmungsgrenze des jeweiligen Untersuchungsverfahrens liegen, werden bei der Summenbildung nicht berücksichtigt. Die Konzentrationen der zur Summenbildung herangezogenen PFAS sind einzeln auszuweisen. Der Grenzwert gilt ab dem 12. Januar 2028.
Chrom ⁴	25	Bis 11.01.2030
	5	ab 12.01.2030
Blei ⁵	10	Bis 11.01.2028
	5	ab 12.01.2028
Cadmium ⁵	3	
Kupfer ⁵	2000	
Nickel ⁵	20	

Tabelle 33: Auszug der Grenzwerte für Metalle gemäß Grundwasserverordnung, GrwV.

Substanz	Grenzwert/ µg/L	Bemerkungen
Blei	10	Wert der TrinkwV
Cadmium	0,5	Hintergrundwert

Tabelle 34: Auszug der Grenzwerte für PAK, PFAS und Metalle gemäß Oberflächengewässerverordnung, OGewV; Werte der UQN (Umweltqualitätsnorm), Anhang 8

Substanz	JD-Jahresdurchschnitt-UQN/ µg/L	ZHK-ZulässigeHöchstKonzentration-UQN/ µg/L
BaP	0,00017	0,27
PFOS	0,00065	36
Cadmium	0,08	0,45
Blei	1,2	14
Nickel	4	34

Die Summe der EPA PAK und Benzo(a)pyren (BaP) lag bei den untersuchten Proben unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung werden bei allen untersuchten Proben unterschritten (vgl. Tabelle 26). Für BaP wurde allerdings die analytisch notwendige BG für die Umweltqualitätsnorm nicht erreicht. Aussagen zu diesen Anforderungen sind daher nicht möglich.

Die regulatorischen Anforderungen hinsichtlich des Austrags von PFAS (per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen) werden in den kommenden Jahren deutlich verschärft. Für die 20 gemäß Trinkwasserverordnung relevanten PFAS-Komponenten tritt zum 12. Januar 2026 ein Grenzwert von 0,1 µg/L in Kraft. Im Rahmen des vorliegenden Untersuchungsprojekts wurden elf PFAS-Verbindungen gemäß DIN 38407-42:2011 quantifiziert. Die Summenkonzentrationen dieser elf Komponenten erreichen bereits Bereiche von bis zu 0,1 µg/L (vgl. Tabellen 27–29). Nach dem Leitfaden zur PFAS-Bewertung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV, 2022) erfolgt die Beurteilung der PFAS-Belastung in Oberflächengewässern auf Grundlage von Quotientensummen. Hierfür werden die gemessenen Konzentrationen der einzelnen Komponenten durch die jeweiligen Geringfügigkeitsschwellen (GFS) dividiert und anschließend summiert. Die resultierenden Summenquotienten für sieben PFAS-Komponenten (für die derzeit GFS-Werte vorliegen) bewegen sich zwischen 0,007 und 0,15 ng/L und liegen damit in einem niedrigen Konzentrationsbereich.

Die derzeitigen und geplanten Regelungen gemäß REACH bezüglich der Freisetzung von PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) zielen darauf ab, die Emission dieser Stoffe drastisch zu reduzieren und damit die Umwelt und die menschliche Gesundheit zu schützen. Das im Januar 2023 eingereichte Beschränkungsossier der REACH-Verordnung sieht explizit eine Begrenzung der Herstellung, Verwendung und des Inverkehrbringens von PFAS vor. Mehrere Anbieter von Kunstrasensystemen haben in diesem Zusammenhang bereits PFAS-freie Systeme entwickelt, die zukünftig eine Alternative darstellen.

Die ermittelten Elementgehalte (vgl. Tabellen 27 und 28) unterschreiten sämtliche einschlägigen Grenzwerte. Für Zink und Eisen bestehen keine verbindlichen Grenzwertvorgaben. Die gemessenen Zinkkonzentrationen liegen unterhalb derjenigen Werte, die von Kalbe et al. in Elutionsversuchen bestimmt wurden (vgl. Kapitel 5.2.1.2). Diese Versuche erfolgten unter spezifischen, festgelegten Feststoff-zu-Flüssig-Verhältnissen, die mit den im vorliegenden Projekt erhobenen Stichprobenbedingungen nicht direkt vergleichbar sind. Das Auftreten niedrigerer Konzentrationen in der aktuellen Untersuchung ist daher als plausibel zu bewerten. Die in der vorliegenden Studie gemessenen Werte liegen im oberen Bereich der Werte, die im Sickerwasser von Kunstrasenplätzen in

der Schweiz gemessen wurden (vgl. Burkhardt et al., 2024). Dort wurden Maximalwerte für Zink von 180 µg/L nach künstlicher Beregnung des Platzes festgestellt; nach Regenereignissen reduzierten sich die Konzentrationen auf allen geprüften Plätzen deutlich. Auch Kupfer zeigte in dieser Studie erhöhte Werte, während alle übrigen Metallgehalte vergleichsweise gering waren. In der Schweizer Studie wurden Sickerwasserproben untersucht, während in der NRW-Studie und in Sittensen der Oberflächenabfluss vermessen wurde, der gegebenenfalls zu höheren Wertemessungen führte. Obwohl die Werte aus der Schweizer Studie geringer waren als die in dieser Untersuchung, können die gemessenen Werte aus NRW und Sittensen als plausibel bewertet werden.

Eine Abhängigkeit zwischen den Kunstrasenplätzen bezüglich der Ausbauart (behandelt/unbehandelt) und des Alters ist anhand der Daten nicht erkennbar.

6.2 Abweichungen vom Antrag und ergänzende Bewertung

6.2.1 Bewertung der Effizienz einer modernen Aufbereitungsanlage in Abhängigkeit von der Partikelgrößenverteilung

Zu Projektbeginn war vorgesehen, die in Sittensen entnommenen Wasserproben mithilfe einer Filterkaskade unterschiedlicher Porengrößen zu filtrieren, um die Partikelgrößenverteilung des ausgetragenen Materials detailliert untersuchen zu können. Aufgrund der geringen Belastung des Wassers mit Kunstrasenpartikeln wurde jedoch bereits zu Beginn der Untersuchungen entschieden, die Proben nur über eine Filterstufe (10 µm Korbsiebfilter) zu nehmen, um eine ausreichende Materialmenge für die analytische Bestimmung sicherzustellen.

Zudem erwies sich die Probenahme mit der vorgesehenen Filtertechnik als deutlich zeitaufwendiger als erwartet. Die Filtration einer einzelnen Wasserprobe nahm mehrere Stunden in Anspruch, was eine Anwendung der ursprünglich geplanten mehrstufigen Filterkaskade methodisch und organisatorisch nicht praktikabel machte. Aus diesen Gründen können im Rahmen dieses Projekts keine belastbaren Aussagen zur Partikelgrößenverteilung des Austragsmaterials getroffen werden.

6.2.2 Einschränkungen bei der Standortauswahl und Probenanzahl

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass weniger Sportplätze als ursprünglich geplant, beprobt werden konnten. Die Auswahl geeigneter Standorte war durch begrenzte Teilnahmebereitschaft der Betreiber eingeschränkt; einige Kommunen und Vereine lehnten eine Teilnahme ab. Zusätzlich mussten mehrere Probenahmen wiederholt werden, da es während der Durchführung zu technischen Problemen (z. B. unzureichender Wasserzulauf oder Filterverstopfungen) kam. Diese Faktoren führten zu einer Reduktion der insgesamt auswertbaren Probenanzahl.

6.2.3 Durchführung der Luftmessungen

Der Aufbau der Luftmessungen erwies sich als aufwendig und erforderte eine interne Abstimmung, da das verwendete PM₁₀-Messgerät der Firma Comde Derenda auch für andere Forschungskampagnen im Einsatz war. Im verfügbaren Zeitraum war es daher nicht möglich, die Luftmessungen parallel zur Platzreinigung durchzuführen. Die erfassten Messwerte repräsentieren somit den normalen Spielbetrieb und nicht den potenziell höheren Austrag während Reinigungs- oder Wartungsmaßnahmen.

Trotz dieser Einschränkungen zeigen die Ergebnisse, dass keine Mikroplastikpartikel in der Luft nachgewiesen werden konnten. Dies deutet darauf hin, dass der Luftpfad für den Austrag von Infill-Material eine untergeordnete Rolle spielt und der Hauptaustragspfad über das Wasser sowie über mechanische Verlagerung durch sporttreibende Personen erfolgt.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Alt- und Neuanlagen

Auch wenn die geplante Untersuchung der Partikelgrößenverteilung nicht durchgeführt werden konnte, liefern die erzielten Ergebnisse wichtige Hinweise für die Weiterentwicklung von technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Minimierung des Austrags von Mikroplastik aus Kunstrasenplätzen.

Folgende Empfehlungen lassen sich ableiten:

- Einsatz von Filtersystemen: Der Einbau geeigneter Filtersysteme im Ablaufbereich scheint den Austrag von Mikroplastik deutlich zu reduzieren. Die Langzeitstabilität und Effizienz der Filtermaterialien sollten in weiteren Studien geprüft werden.
- Optimierung der Auslaufzonen: Eine bauliche Gestaltung der Auslaufzonen um den Platz (z. B. mit Sedimentationsstreifen oder begrünten Randbereichen) kann dazu beitragen, den Austrag von Granulat zu verringern. Diese Bereiche müssen regelmäßig gesäubert werden, um eine weitere Verschleppung zu unterbinden.
- Verwendung alternativer Infill-Materialien: Der Einsatz von biologisch abbaubaren oder pflanzlichen Infill-Materialien stellt eine vielversprechende Option dar, um den Eintrag synthetischer Polymere in die Umwelt zu reduzieren.
- Schulung des Platzpersonals: Gespräche mit Platzwarten zeigten, dass häufig unklare Vorstellungen über die notwendige Infill-Menge bestehen. Teilweise wird zu viel Material nachgefüllt, was den Austrag zusätzlich erhöht. Eine gezielte Schulung des Personals kann hier zu einer deutlichen Verbesserung beitragen.
- Lebensdauer der Kunstrasenplätze: Während Hersteller eine empfohlene Nutzungsdauer von etwa zehn Jahren angeben, werden viele Plätze deutlich länger betrieben, häufig aus wirtschaftlichen Gründen. Eine verlängerte Nutzungsdauer kann jedoch mit erhöhten Materialverlusten und sinkender Filtereffizienz einhergehen und sollte daher bei der Wartungsplanung berücksichtigt werden.

Insgesamt zeigen die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse, dass technische Filterlösungen, strukturelle Anpassungen der Platzgestaltung und betriebliche Maßnahmen in Kombination das Potenzial besitzen, den Austrag von Mikroplastikpartikeln aus Kunstrasenanlagen signifikant zu verringern.

8 Trouble Shooting und sonstige Hinweise

Während der Projektlaufzeit traten im Zusammenhang mit der Probenahmeeinrichtung im Keller am Standort Sittensen mehrere technische und organisatorische Schwierigkeiten auf, die den Probetrieb zeitweise beeinträchtigten und zusätzlichen Aufwand erforderten.

8.1 Überflutung des Probenahmekellers

Der Probenahmekeller in Sittensen wurde im Verlauf des Projekts mehrfach überflutet, insbesondere nach stärkeren Niederschlagsereignissen (vgl. Abbildung 38). Durch die wiederholte Überflutung kam es zu Beschädigungen der installierten Geräte (u. a. der Förderpumpe, elektrischer Leitungen und des Regalsystems). Nach jedem Ereignis mussten der Kellerraum und die Zuläufe aufwendig gereinigt und von Sedimenten befreit werden, um die Funktionsfähigkeit des Systems wiederherzustellen. Diese unvorhergesehenen Arbeiten führten zu Verzögerungen im Probenahmeplan und erhöhtem Wartungsaufwand.



Abbildung 38: Fotos des Probenahmekellers nach einer Überflutung. Der Keller war bis etwa 1,50 m Höhe komplett mit Wasser gefüllt.

8.2 Datenerfassung und Füllstandsmessung

Die digitale Aufzeichnung der Füllstände der Sammelbehälter funktionierte zu Beginn des Projekts nur eingeschränkt zuverlässig. Besonders bei sehr geringen Wasserständen wurden die Füllstände nicht korrekt erfasst, sodass einzelne Füllphasen manuell dokumentiert werden mussten. Nach Anpassung der Sensorik und Kalibrierung der Messeinheiten konnte die Datenqualität im weiteren Projektverlauf verbessert werden.

8.3 Störstoffe und Materialeintrag nach Systeminstallation

In den ersten Probenahmezyklen wurde festgestellt, dass sich in den Proben Materialrückstände aus der Installation befanden, vermutlich aus den neu verlegten Rohrleitungen und Verbindungselementen. Diese Partikel führten zu Verunreinigungen der ersten Proben und machten eine Reinigung des Leitungssystems erforderlich. Nach einer vollständigen Spülung der Rohrleitungen konnten die Proben anschließend unter stabilen und reproduzierbaren Bedingungen gewonnen werden.

8.4 Ungleichmäßiger Wasserabfluss und Füllvolumina

Ein weiteres Problem stellte der ungleichmäßige Abfluss des Niederschlagswassers in die Sammelbehälter dar. Dadurch waren die einzelnen Probenbehälter unterschiedlich stark gefüllt, was die Vergleichbarkeit der Proben erschwerte.

8.5 Niederschlagsabhängige Probenverfügbarkeit

Zusätzlich war der Probenfortschritt stark von der Niederschlagsmenge abhängig. In längeren Trockenphasen reichte der Regen über mehrere Wochen oder Monate nicht aus, um die Sammelbehälter zu füllen. Dies führte zu Verzögerungen im Probenahmezyklus und einer geringeren Probenfrequenz als ursprünglich vorgesehen.

8.6 Erfassung der Niederschlagsmenge auf Kunstrasenplätzen im Zusammenhang mit Infill-Verlusten

Durch den Klimawandel nehmen Starkregenereignisse immer häufiger und intensiver zu. Insbesondere bei Kunstrasenplätzen kann dies zu erhöhten Infill-Verlusten führen, da große Wassermengen das Füllmaterial (Infill) aus dem Belag herauspülen.

Um diesen Effekten besser zu verstehen, wird empfohlen, die Niederschlagsmenge auf den Kunstrasenplätzen zu erfassen. Dabei ist es wichtig, nicht nur die gesamte Menge des gefallenen Niederschlags zu dokumentieren, sondern auch die Niederschlagsintensität – also die Regenmenge pro Stunde – zu berücksichtigen. Denn nicht allein die Gesamtniederschlagsmenge entscheidet über die Infill-Verluste, sondern vor allem die Stärke und Dauer der einzelnen Starkregenereignisse. Eine hohe Niederschlagsintensität kann größere Mengen des Infill-Materials aus dem Belag herauspülen, was zu schnellerem Materialverlust und erhöhtem Wartungsaufwand führt.

Die Erfassung dieser Daten liefert somit wertvolle Grundlagen für eine gezielte Pflege und langfristige Erhaltung der Kunstrasenplätze unter den veränderten klimatischen Bedingungen.

8.7 Zusammenfassung

Die im Rahmen des Projekts aufgetretenen technischen und betrieblichen Herausforderungen verdeutlichen die Komplexität langfristiger Umweltprobenahmen unter Realbedingungen. Die gewonnenen Erfahrungen sind wertvoll für die Planung zukünftiger Monitoringprojekte, insbesondere im Hinblick auf robustere Probenahmesysteme und automatisierte Datenerfassung unter variablen Umweltbedingungen.

9 Öffentlichkeitsarbeit

9.1 Vorträge

Wolf et al. 2025: Ermittlung und Minderung von Mikroplastik- und Schadstoffemissionen von Kunststoffrasen-Sportplätzen (MiMiK), (Mikro-)Plastik in Böden – Ursachen, Auswirkungen und Lösungsansätze, Online 05.02.2025.

9.2 Poster

Pruin et al. 2023: Determination and mitigation of microplastic and pollutant emission from synthetic turf sport fields, SETAC Europe 33th Annual Meeting 30 April - 4 May 2023, Dublin, Ireland

Andert et al. 2025: Microplastic, PAH and PFAS Emissions from Turf Fields: Impact on Water, Soil, and Air. SETAC Europe 35th Annual Meeting, 11 – 15 May 2025 Vienna, Austria.

Andert et al. 2025: Microplastic, PAH and PFAS Emissions from Turf Fields: Impact on Water, Soil, and Air. 27th International Symposium on Advances in Extraction Technologies, ExTech 08.09. – 11.09.2025, Mülheim an der Ruhr, Germany.

Andert et al. 2025: Microplastic, PAH and PFAS Emissions from Turf Fields: Impact on Water, Soil, and Air. Jahrestagung SETAC GLB 2025, 22.09 – 24.09.2025, Dessau, Germany.

10 Literatur

- Abbasi, S., Turner, A., Hoseini, M. & Amiri, H., 2021. Microplastics in the Lut and Kavir deserts, Iran. *Environmental Science & Technology*, pp. 5993-6000.
- Alabi, O. A., Ologbonjaye, K. I., Awosolu, O. & Alalade, O. E., 2019. Public and environmental health effects of plastic wastes disposal: a review. *Journal of Toxicology and Risk Assessment*, pp. 1-13.
- Armada, D. et al., 2022. Global evaluation of the chemical hazard of recycled tire crumb rubber employed on worldwide synthetic turf football pitches. *Science of The Total Environment*, 812(152542).
- BAM, 2023. Zukunft Bau - Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis. [Online]
Available at: <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-2202>
[Zugriff am 21 Juli 2023].
- Bertling, J., Bertling, R. & Hamann, L., 2018. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik*, Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT.
- Bertling, J. et al., 2021. *Kunstrasenplätze – Systemanalyse unter Berücksichtigung von Mikroplastik- und Treibhausgasemissionen, Recycling, Standorten und Standards, Kosten sowie Spielermeinungen*, Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT.
- Bertling, J., Zimmermann, T. & Röding, L., 2021. *Kunststoffe in der Umwelt: Emissionen in landwirtschaftlich genutzten Böden*, Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT.
- Bleyer, A. Synthetic Turf Fields, Crumb Rubber, and Alleged Cancer Risk. *Sports Med.* 2017, 47(12), 2437-2441. DOI: 10.1007/s40279-017-0735-x.
- Breitbarth, M., Hentschel, A. & Kaser, S., 2022. *Kunststoffeinträge von Kunstrasenplätzen in Entwässerungssysteme - Aufkommen, Rahmenbedingungen und Möglichkeiten der Eintragsminderung*. *sofia-Diskussionsbeitrag*, 22(01).
- Bridson, J. H. et al., 2023. Release of additives and non-intentionally added substances from microplastics under environmentally relevant conditions. *Environmental Advances*, Band 12, p. 100359.
- Brunella, V. et al., 2022. Recycling of EPDM via Continuous Thermo-Mechanical Devulcanization with Co-Rotating Twin-Screw Extruder. *Polymers*, pp. 14(22), 4853.
- Burkhardt, M, Englert, A., Patrick, M. 2024. *Kunststoffrasenflächen für Fussball: Qualität und Beurteilung des Sickerwassers*. im Auftrag des Bundesamtes für Sport (BASPO), des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich
- Canepari, S. et al. Release of particles, organic compounds, and metals from crumb rubber used in synthetic turf under chemical and physical stress. *Environ Sci. Pollut. Res. Int.* 2018, 25(2), 448-1459. DOI: 10.1007/s11356-017-0377-4

Cheng, H., Hu, Y. & Reinhard, M. Environmental and health impacts of artificial turf: a review. *Environmental science & technology*, 2014, 48, 2114–2129. DOI: 10.1021/es4044193.

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. & Galloway, T., 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine pollution bulletin*, pp. 2588-2597.

de Haan, W. P. et al., 2023. The dark side of artificial greening: Plastic turfs as widespread pollutants of aquatic environments. *Environmental Pollution*, 334(122094).

Deutscher Bundestag: Drucksache 19/16387 - Kunstrasenplätze erhalten – Sportvereine schützen (2020). Abzurufen unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/163/1916387.pdf>.

DFB, 2021. DFB- Handlungsempfehlung für Fussballvereine & Kommunen - Mikroplastikaustrag bei bestehenden Kunststoffrasen-Plätzen, Frankfurt: Deutscher Fußball-Bund.

DIBt, 2023. Deutsches Institut für Bautechnik. [Online]

Available at: <https://www.dibt.de/de/service/zulassungsdownload/detail/z-842-7>

Diekmann, A., Giese, U. & Schaumann, I. Polycyclic aromatic hydrocarbons in consumer goods made from recycled rubber material: A review. *Chemosphere*, 2019, 220, 1163–1178. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.111.

Donner, S., 2022. Mikroplastik - Ursachen, Verbreitung, Wirkung, s.l.: Deutscher Bundestag.

Duemichen, E., Eisentraut, P., Celina, M. & Braun, U., 2019. Automated thermal extraction-desorption gas chromatography mass spectrometry: A multifunctional tool for comprehensive characterization of polymers and their degradation products. *Journal of Chromatography A*, Band 1592, pp. 133-142.

Dümichen, E. et al., 2015. Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method. *Water research*, 85, pp. 451-457.

Dümichen, E. et al., 2017. Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method. *Chemosphere*, pp. 174, 572-584.

Duong, T. T. et al., 2022. Selection of a density separation solution to study microplastics in tropical riverine sediment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, pp. 1-17.

ECHA, 2019. ANNEX XV RESTRICTION REPORT - Proposal for restrictions on intentionally-added microplastics. European Chemicals Agency , 1(2), pp. 1-146.

ECHA, 2020. ECHA. [Online]

Available at: <https://echa.europa.eu/fi/-/rac-backs-restricting-intentional-uses-of-microplastics>

[Zugriff am 31 Juli 2023].

ECHA, 2020. RAC and SEAC opinion on an ANNEX XV RESTRICTION REPORT PROPOSAL FOR A RESTRICTION for intentionally added microplastics., s.l.: European Chemical Agency.

- Eisentraut, P. et al., 2018. Two birds with one stone – fast and simultaneous analysis of microplastics: microparticles derived from thermoplastics and tire wear. *Environmental Science & Technology Letters*, 5(10), pp. 608-613.
- Fleming, P. R., Watts, C. & Forrester, S., 2023. A new model of third generation artificial turf degradation, maintenance interventions and benefits. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 237(1), pp. 19-33.
- Fries, E. & Sühling, R., 2023. The unusual suspects: Screening for persistent, mobile, and toxic plastic additives in plastic leachates. *Environmental Pollution*, Band 335, p. 122263.
- Frühlingsdorf, M., 2019. Forscher ziehen eigene Mikroplastik-Studie in Zweifel. [Online] Available at: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/fraunhofer-institut-relativiert-studie-ueber-mikroplastik-a-1280225.html> [Zugriff am 15.09.2021].
- Funck, M. et al., 2020. Identification of microplastics in wastewater after cascade filtration using Pyrolysis-GC–MS. *MethodsX*, 7, p. 100778.
- Goedecke, C. et al., 2020. Evaluation of thermoanalytical methods equipped with evolved gas analysis for the detection of microplastic in environmental samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, p. 104961.
- Goedecke, C. et al., 2022. Development of a Routine Screening Method for the Microplastic Mass Content in a Wastewater Treatment Plant Effluent. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 844633(3).
- Gomes, F. O., Rocha, M. R., Alves, A. & Ratola, N. A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *Journal of hazardous materials*, 2021, 409, 124998. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124998>.
- Haave, M. & Henriksen, T., 2022. Sources and fate of microplastics in Urban Systems. *Handbook of Microplastics in the Environment*, pp. 849-875.
- HAURATON GmbH & Co.KG, 2021. Sittensen, Sportanlage, Verlegeplan. Rastatt: s.n.
- HAURATON, 2023. HAURATON GmbH. [Online] Available at: <https://www.hauraton.com/de/produkt/weiteres-zubehoer-filtersubstrat-sackware-20-l-3/#tab-panel-product-data>
- Heisterkamp, I. et al., 2022. Methoden und Kriterien zur Bewertung der Ökotoxizität von Produkten, s.l.: Umweltbundesamt.
- Htway, E. E. et al., 2020. Determination of chemicals released from single use low density polyethylene plastic bags. s.l., IOP Publishing, pp. Vol. 496, No. 1, p. 012012.
- Hurley, R., Horton, A., Lusher, A. & Nizzetto, L., 2020. Plastic waste in the terrestrial environment. In: *Plastic Waste and Recycling*. s.l.:Academic Press, pp. 163-193.

- Hurley, R. R., Lusher, A. L., Olsen, M. & Nizzetto, L., 2018. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices. *Environmental science & technology*, 52(13), pp. 7409-7417.
- Hurley, R. R., Lusher, A. L., Olsen, M. & Nizzetto, L., 2018. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices. *Environmental science & technology*, 52(13), pp. 7409-7417.
- IAKS, 2019. Deutschland IAKS Sport. [Online]
Available at: <https://deutschland.iaks.sport/sites/default/files/downloads/Whitepaper/2019-07/Stellungnahme%20Mikroplastik%20in%20Kunstrasen%20-%20IAKS%20Deutschland%20final.pdf>
- Isangedighi, I. A., David, G. S. & Obot, O. I., 2020. Plastic waste in the aquatic environment: impacts and management.. In: *Analysis of nanoplastics and microplastics in food*. s.l.:CRC Press, pp. 15-43.
- Islam, M. S., Mondal, S., Angon, P. B. & Jalil, M. A., 2023. Accumulation of Microplastics in Agroecosystems and Its Effects on Terrestrial Plants: A Short Review. *Current Applied Science and Technology*, 23(5), pp. 10-55003.
- Jeong, Y., Lee, S. & Woo, S.-H., 2022. Chemical leaching from tire wear particles with various treadwear ratings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(10), p. 6006.
- Jiang, L. et al., 2018. Pyrolytic behavior of waste extruded polystyrene and rigid polyurethane by multi kinetics methods and Py-GC/MS. *Fuel*, pp. 222, 11-20.
- Kalbe, U., Krüger, O., Wachtendorf, V., Berger, W., Hally, S. 2013. Development of Leaching Procedures for Synthetic Turf Systems Containing Scrap Tyre Granules, *Waste Biomass Valor* (2013) 4: 745-757, DOI 10.1007/s12649-013-9248-5
- M. Kittner, A. Kerndorff, M. Ricking, M. Bednarz, N. Obermaier, M. Lukas, M. Asenova, G. Bordós, P. Eisentraut, P. Hohenblum, H. Hudcova, F. Humer, T.G. István, M. Kirchner, O. Marushevska, D. Nemejcová, P. Oswald, M. Paunovic, M. Sengl, J. Slobodnik, K. Spanowsky, M. Tudorache, H. Wagensohn, I. Liska, U. Braun, C.G. Bannick. Microplastics in the Danube River Basin: A First Comprehensive Screening with a Harmonized Analytical Approach. *ACS ES&T Water*, 2 (7) (2022), pp. 1174-1181
- Lamichhane, G. et al., 2023. Microplastics in environment: global concern, challenges, and controlling measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), pp. 4673-4694.
- Lechthaler, S., Waldschläger, K., Stauch, G. & Schüttrumpf, H., 2020. The Way of Macroplastic through the Environment. *Environments*, 7(10), p. 73.
- Li, P. et al., 2021. Characteristics of Plastic Pollution in the Environment: A Review. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 107(4), pp. 577-584.

- Li, W. et al., 2023. Desorption of bisphenol A from microplastics under simulated gastrointestinal conditions. *Frontiers in Marine Science*, 10(1195964).
- Löder, M.G.J., Imho, H.K., Ladehoff, M., Löschel, L.A., 2017. Enzymatic Purification of Microplastics in Environmental Samples, *Environmental Science and Technology* 51(24), DOI:10.1021/acs.est.7b03055
- Maddison, C. et al., 2023. An advanced analytical approach to assess the long-term degradation of microplastics in the marine environment. *npj Materials Degradation*, 7(59).
- Manas, D. et al., 2018. The effect of irradiation on mechanical and thermal properties of selected types of polymers. *Polymers*, 10(2), p. 158.
- Negrete Velasco, A. d. J. et al., 2020. Microplastic and fibre contamination in a remote mountain lake in Switzerland. *Water*, p. 2410.
- Patrick, M., Englert, A., Burkhardt, M. (2024): Kunststoffrasenflächen in der Schweiz und Relevanz von Mikroplastik. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich.
- Pakhomova, S. et al., 2022. Microplastic variability in subsurface water from the Arctic to Antarctica. *Environmental Pollution*, p. 118808.
- Pinlova, B. & Nowack, B., 2023. Characterization of fiber fragments released from polyester textiles during UV weathering. *Environmental Pollution*, 322(121012).
- Plastics Europe, 2022. Plastics Europe. [Online]
Available at: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/03/PE-PLASTICS-THE-FACTS_FINAL_DIGITAL-1.pdf
- Połowiński, S., 2002. Template polymerisation and co-polymerisation. *Progress in polymer science*, 27(3), pp. 537-577.
- Polytan GmbH, 2023. Polytan GmbH. [Online]
- Pronk, M. E. J., Woutersen, M. & Herremans, J. M. M. Synthetic turf pitches with rubber granulate infill: are there health risks for people playing sports on such pitches? *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 2020, 30 (3), 567-584. DOI: 10.1038/s41370-018-0106-1
- Rizzarelli, P. et al., 2016. Determination of polyethylene in biodegradable polymer blends and in compostable carrier bags by Py-GC/MS and TGA. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, pp. 117, 72-81.
- Schneider, K., de Hoogd, M., Madsen, M.P. et al. ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber. Infill – Part 1: Analysis of infill samples, *Science of the Total Environment*, 2020, 718, 137174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137174>.
- Schneider, K., de Hoog, M., Haxaire, P., Philipps, A., Bierwisch, A., Kaiser, E. (2020): ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill – Part 2: Migration and

monitoring studies. *Science of the Total Environment*, 2020, 718, 137173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137173>.

Schneider, K., Bierwisch, A., Kaiser, E. ERASSTRI - European risk assessment study on synthetic turf rubber infill - Part 3: Exposure and risk characterisation. *Science of the Total Environment*, 2020, 718, 137721. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137721.

Soják, L., Kubinec, R., Jurdakova, H., Hajekova, E., Bajus, M. (2007) High resolution gas chromatographic–mass spectrometric analysis of polyethylene and polypropylene thermal cracking products, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 78, Issue 2, March 2007, Pages 387-399, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.09.012>

Stadionwelt, 2023. Sportplatzwelt by Stadionwelt. [Online]

Available at: <https://www.sportplatzwelt.de/fachwissen/19287/einfuehrung-alles-ueber-einstreugranulat-fuer-kunstrasensysteme>

[Zugriff am 31 Juli 2023].

D. Thomas, B. Schütze, W.M. Heinze, Z. Steinmetz Sample preparation techniques for the analysis of microplastics in soil—a review *Sustainability*, 12 (2020), p. 9074, 10.3390/su12219074

Tsuge, S., Ohtani, H. & Watanabe, C., 2011. *Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers - Pyrograms, Thermograms and MS of Pyrolyzates*. s.l.:Elsevier.

UkuRa, 2023. Hochschule Osnabrück - Umweltgerechter Kunststoffrasen durch verringerten Kunststoffaustrag und -verbrauch. [Online]

Available at: <https://www.hs-osnabrueck.de/ukura/>

[Zugriff am 21 Juli 2023].

van den Beuken, E. et al., 2023. From# plasticfree to future-proof plastics. White paper,.

Wojnowska-Baryła, I., Bernat, K. & Zaborowska, M., 2022. Plastic Waste Degradation in Landfill Conditions: The Problem with Microplastics, and Their Direct and Indirect Environmental Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, p. 13223.

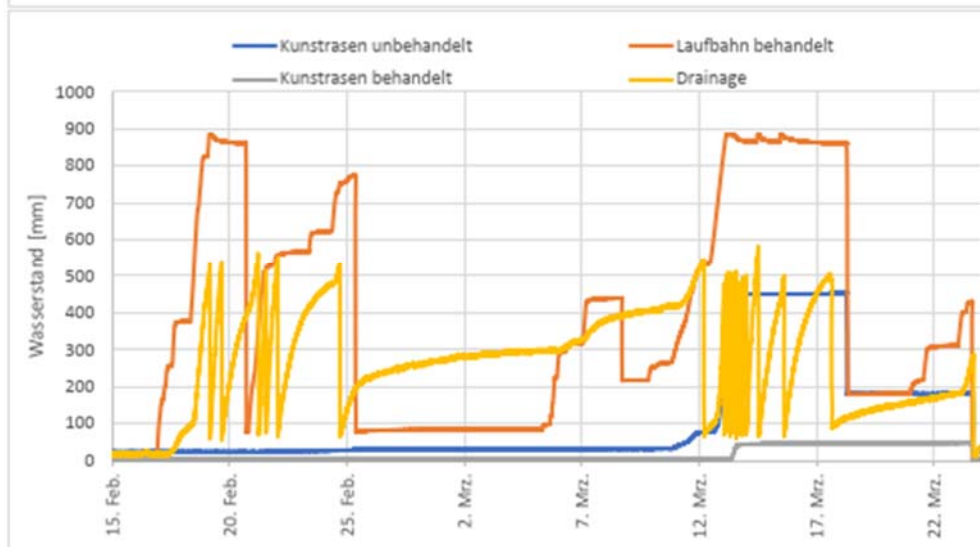
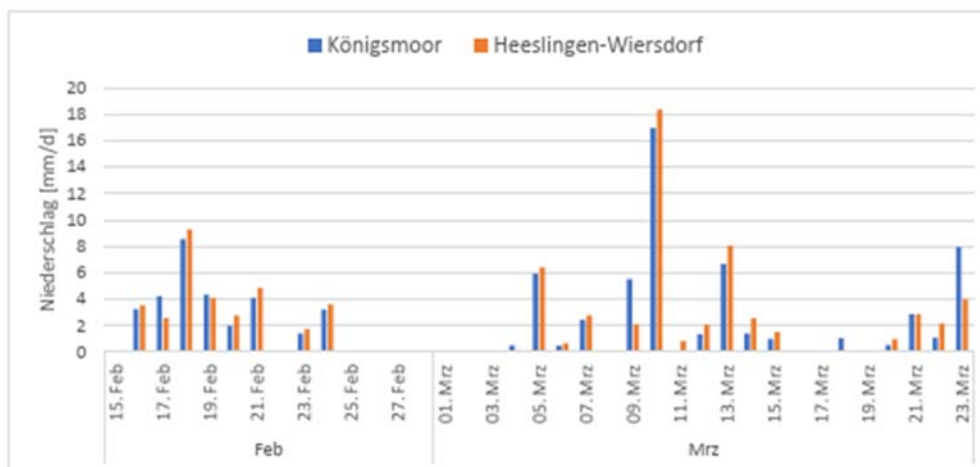
11 Anlage

11.1 Auswertungen der Wasserstände und Abflüsse Sittensen

Kunstrasenplatz VfL Sittensen

1. Beprobungszeitraum 15.02.23 - 23.03.23

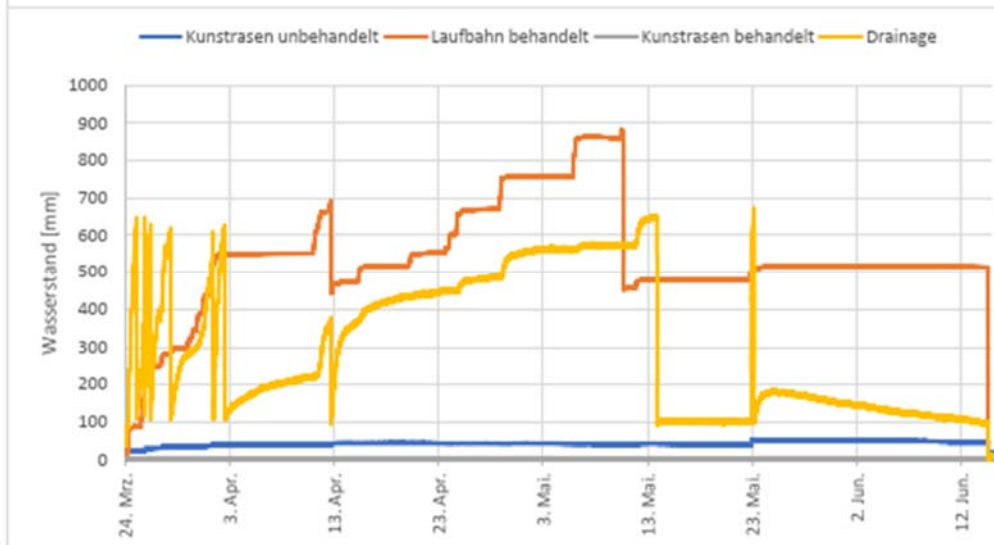
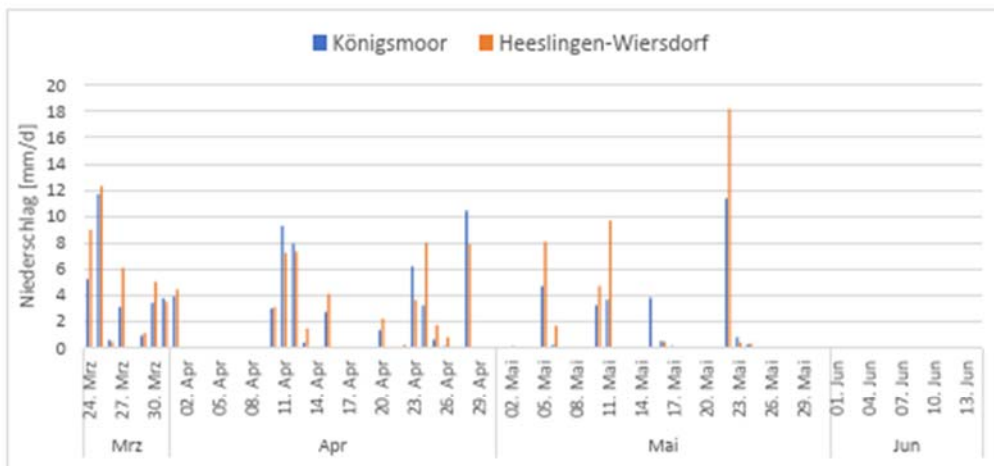
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,06	370	0,17	0,002	Mittelwert 87,8
Kunstrasen unbehandelt	0,07	370	0,18	0,002	Königsmoor 87,2
Laufbahn behandelt	3,76	73	51,41	0,586	Heeslingen 88,4
Drainage	11,50	7885	1,46	0,017	



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

2. Beprobungszeitraum

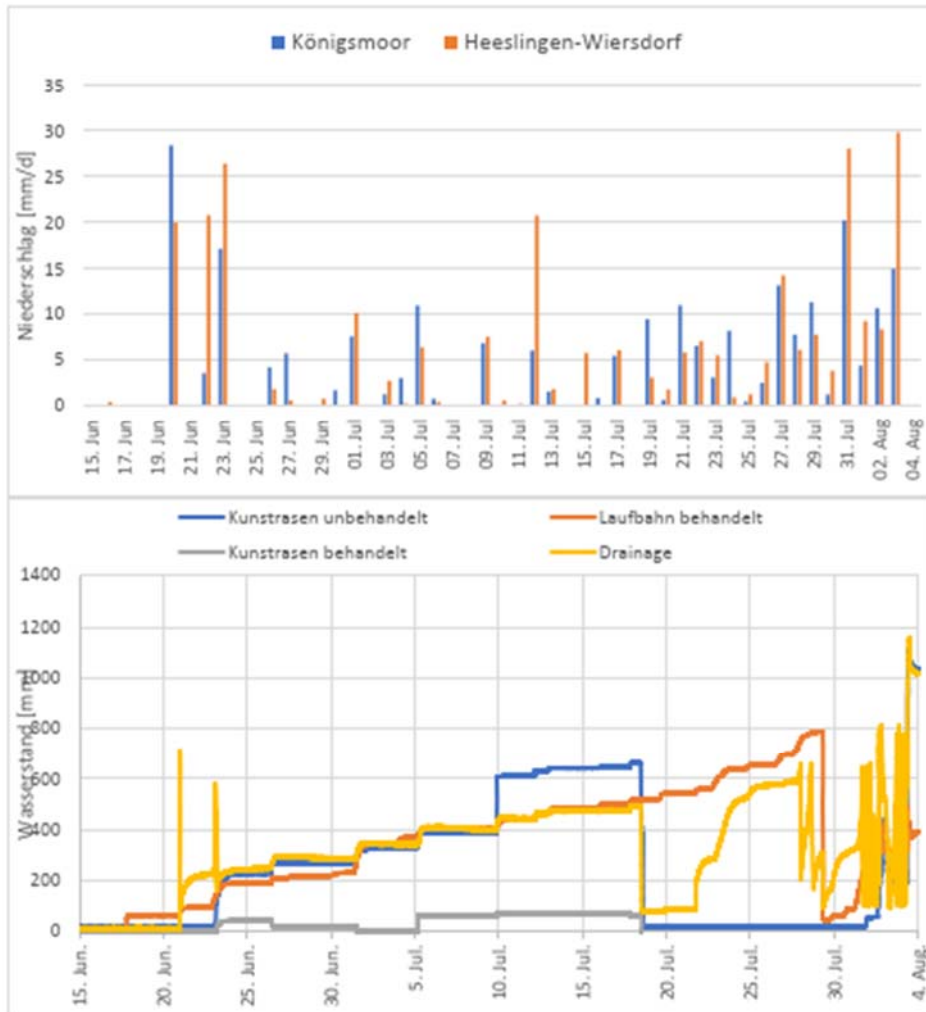
	Abfluss [m³ Fläche [m²]	N_{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000
Kunstrasen unbehandelt	0,03	370	0,09	0,001
Laufbahn behandelt	1,51	73	20,56	0,170
Drainage	11,50	7.885	1,46	0,012
				Mittelwert
				Königsmoor
				Heeslingen



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

3. Zeitraum

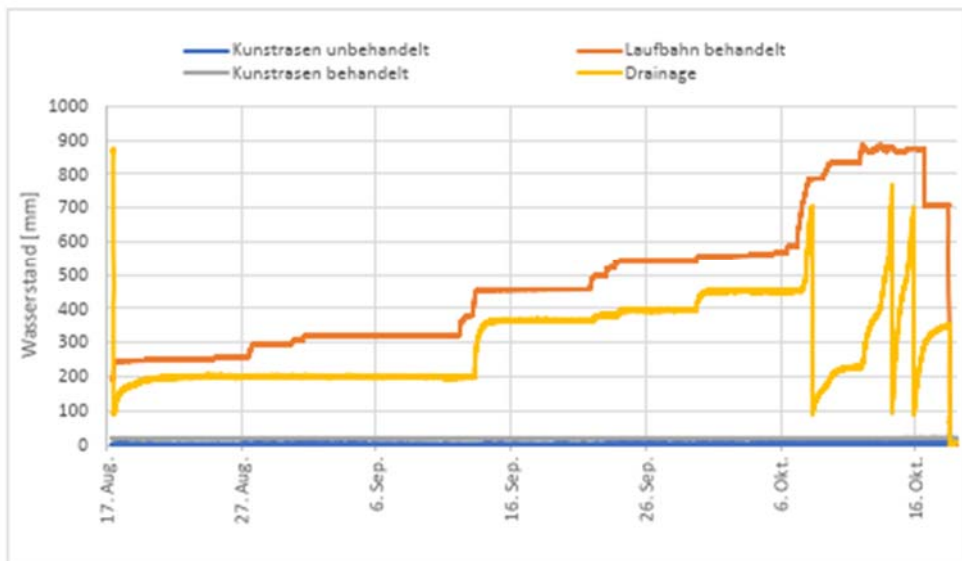
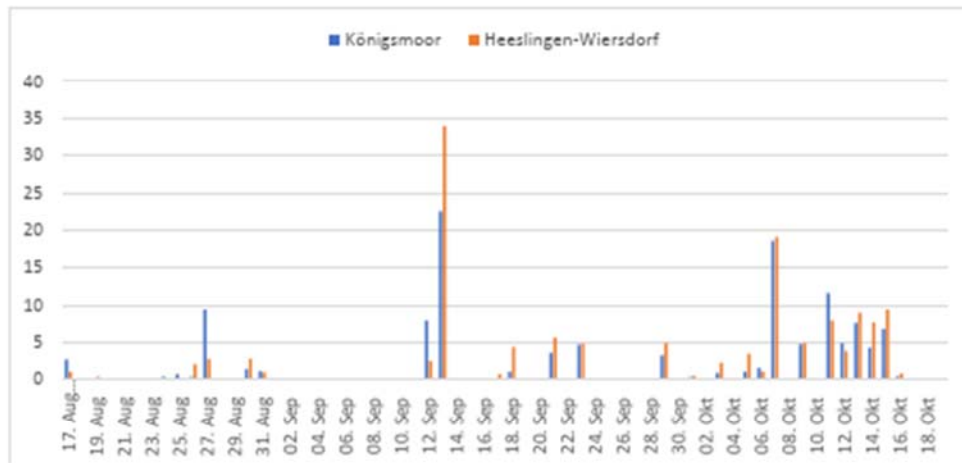
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{gr} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,14	370	0,37	0,001	Mittelwert 253,5
Kunstrasen unbehandelt	2,19	370	5,91	0,023	Königsmoor 233,3
Laufbahn behandelt	1,51	73	20,56	0,081	Heeslingen 273,6
Drainage	10,06	7885	1,28	0,005	



Kunstrasenplatz VfL Sittensen

4. Zeitraum

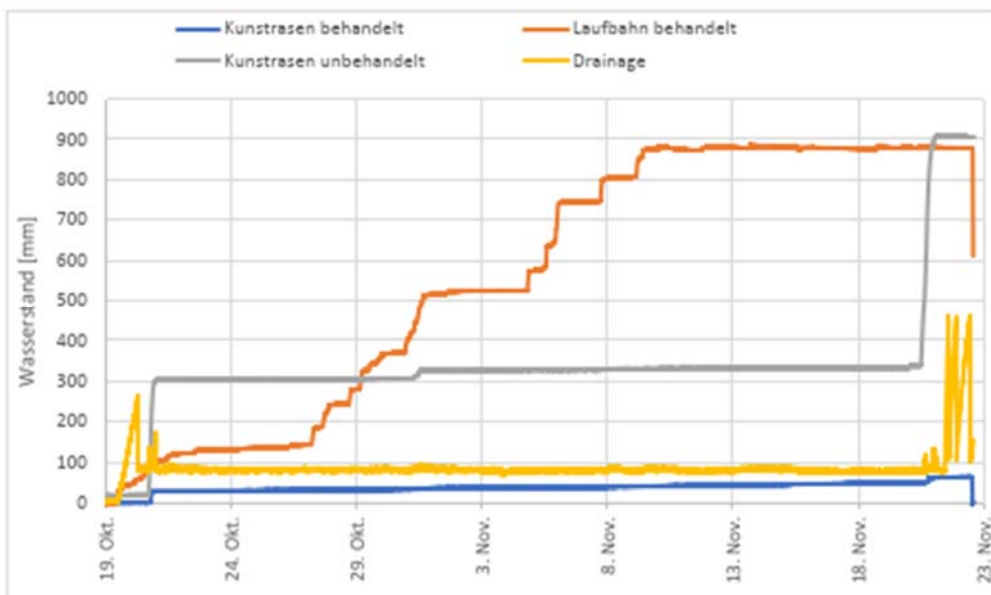
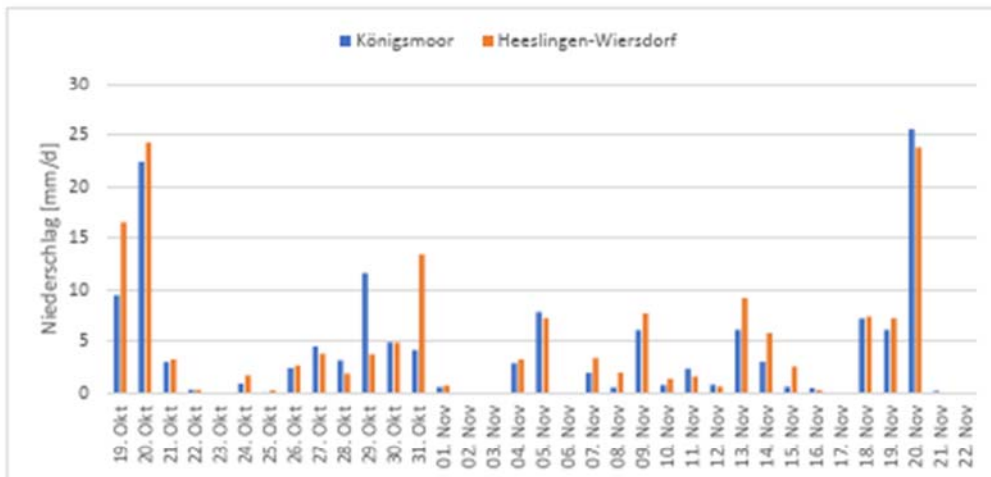
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000	Mittelwert	131,0
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor	123,3
Laufbahn behandelt	0,93	73	12,71	0,097	Heeslingen	138,8
Drainage	2,81	7885	0,36	0,003		



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

5. Zeitraum

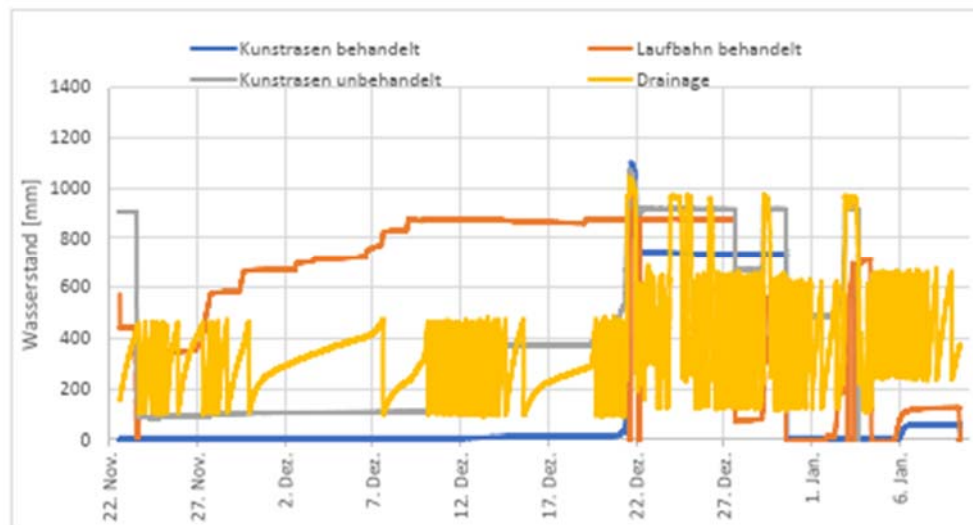
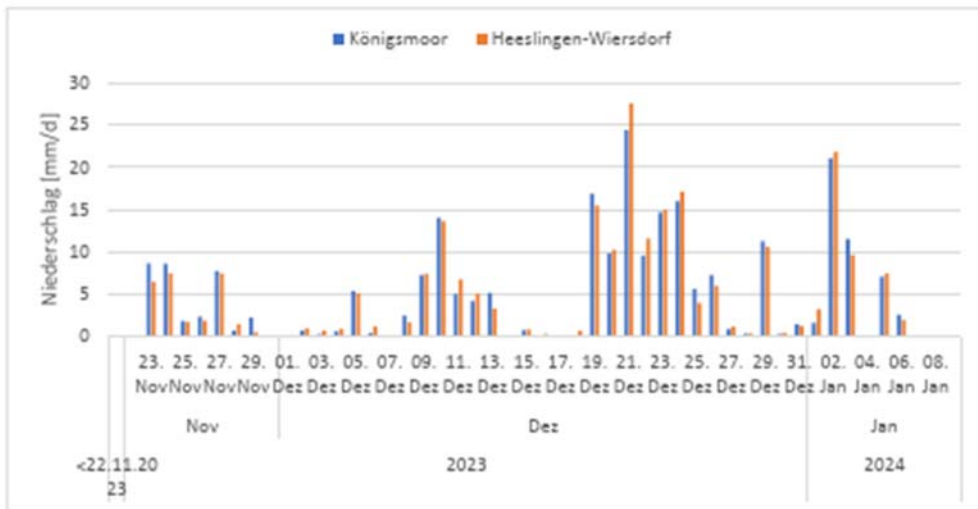
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,14	370	0,37	0,002	Mittelwert 151,3
Kunstrasen unbehandelt	1,23	370	3,32	0,022	Königsmoor 141,0
Laufbahn behandelt	1,23	73	16,83	0,111	Heeslingen 161,7
Drainage	1,64	7885	0,21	0,001	



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

6. Zeitraum

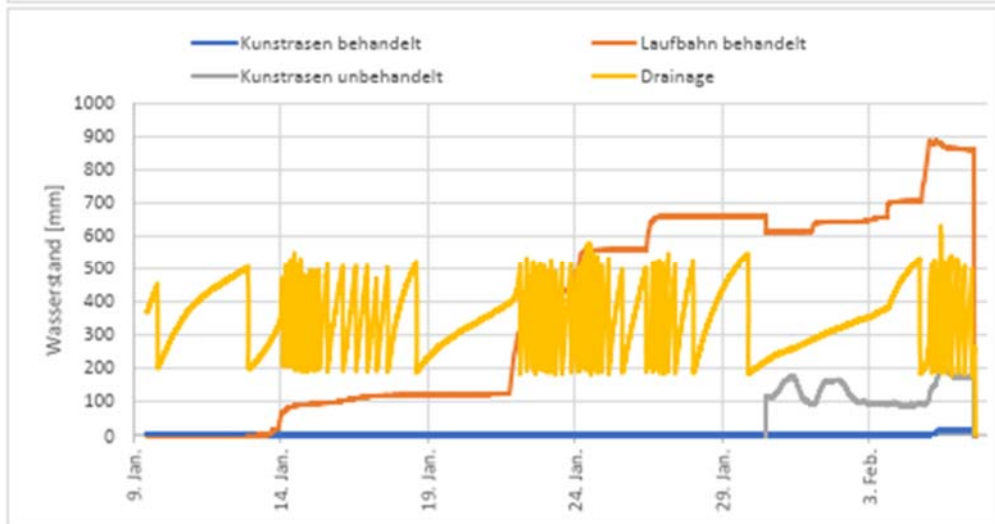
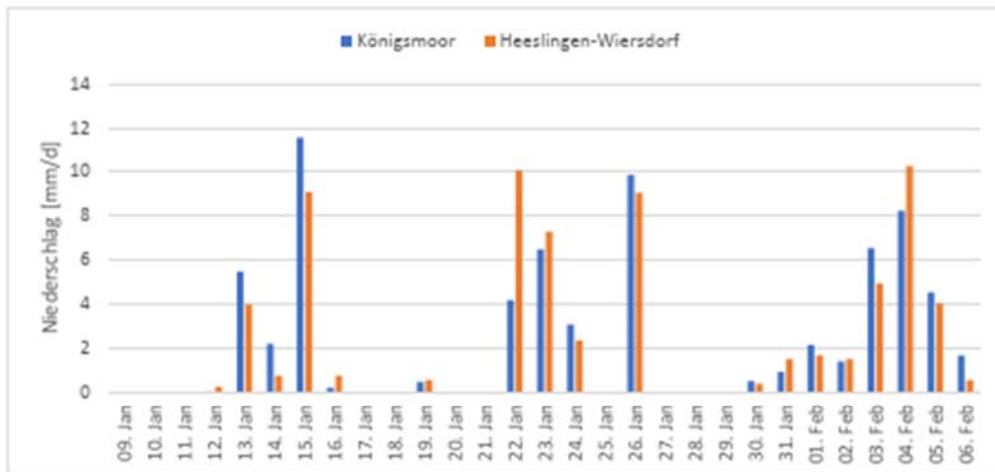
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	1,51	370	4,06	0,017	Mittelwert 240,6
Kunstrasen unbehandelt	1,09	370	2,96	0,012	Königsmoor 241,0
Laufbahn behandelt	1,23	73	16,83	0,070	Heeslingen 240,2
Drainage		7885	0,00	0,000	



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

7. Zeitraum

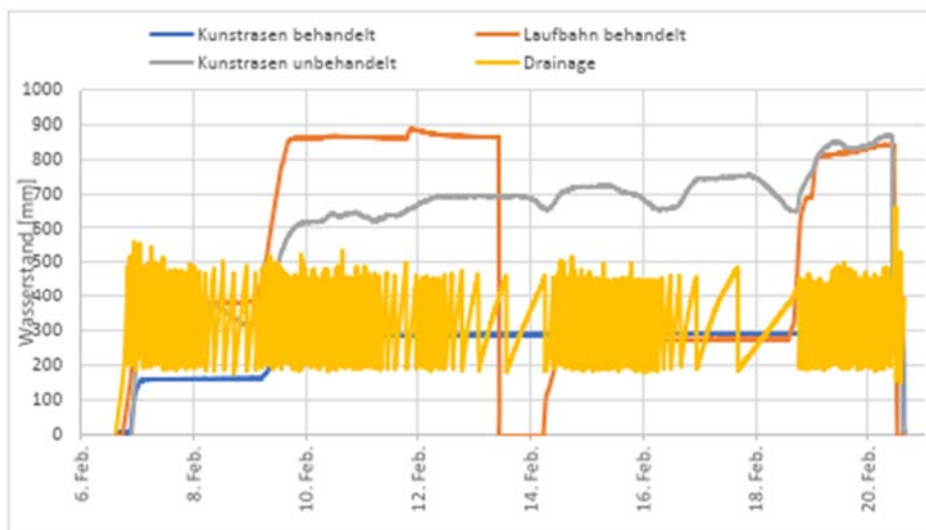
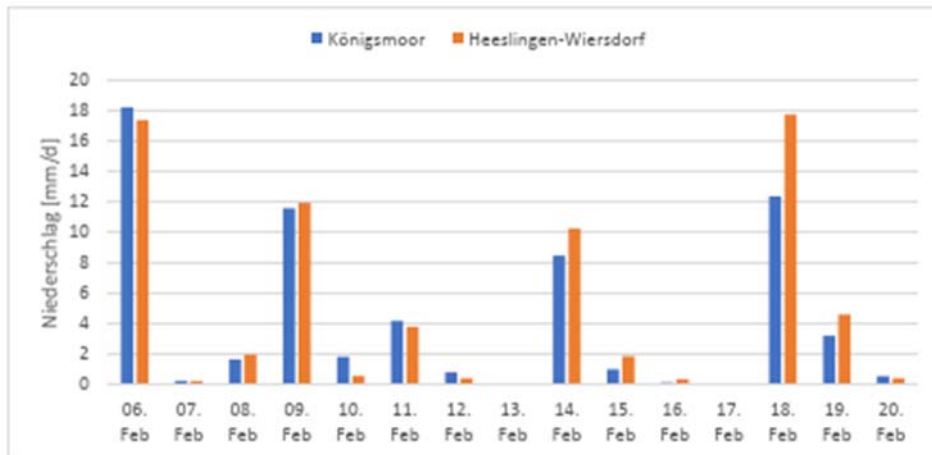
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt	0,02	370	0,07	0,001	Mittelwert	69,1
Kunstrasen unbehandelt	0,27	370	0,74	0,011	Königsmoor	69,3
Laufbahn behandelt	1,23	73	16,83	0,244	Heeslingen	68,8
Drainage		7885	0,00	0,000		



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

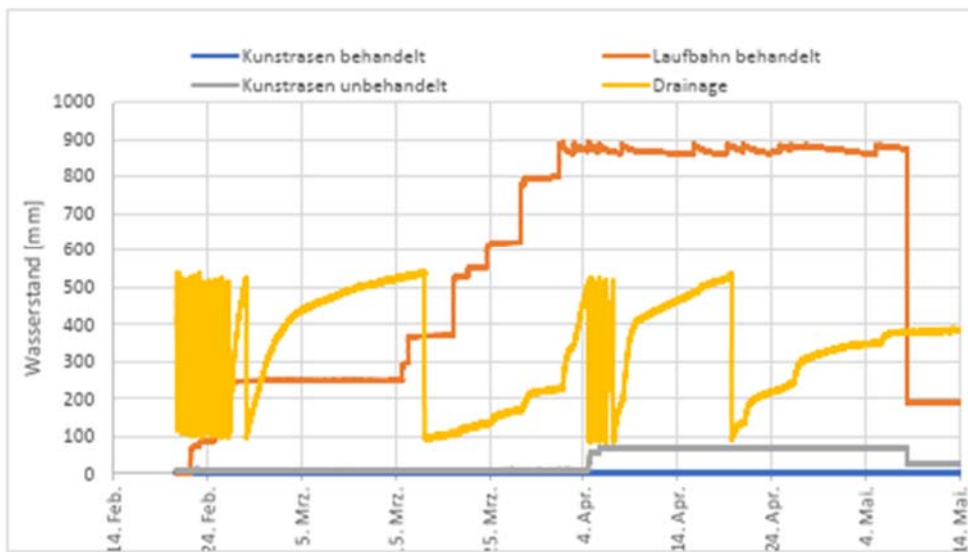
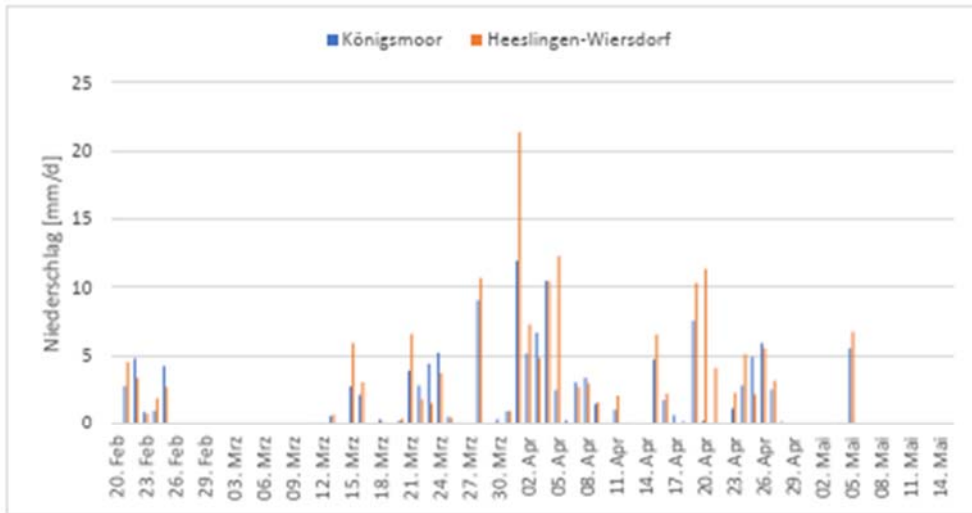
8. Zeitraum

	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,41	370	1,11	0,016	Mittelwert 68,3
Kunstrasen unbehandelt	1,16	370	3,14	0,046	Königsmoor 64,8
Laufbahn behandelt	2,26	73	30,85	0,451	Heeslingen 71,9
Drainage		7885	0,00	0,000	



Kunstrasenplatz VfI Sittensen 9. Zeitraum

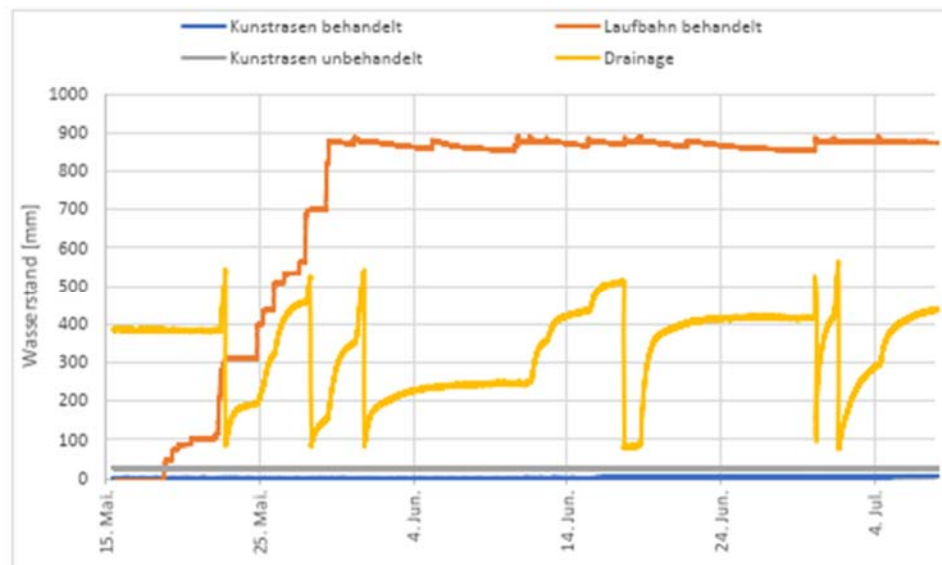
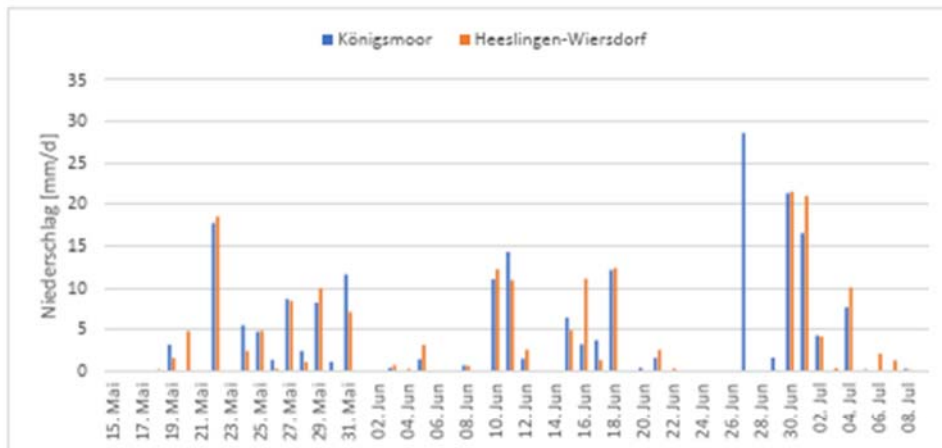
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000	Mittelwert 153,0
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor 131,1
Laufbahn behandelt	1,23	73	16,83	0,110	Heeslingen 174,9
Drainage		7885	0,00	0,000	



Kunstrasenplatz Vfl Sittensen

10. Zeitraum

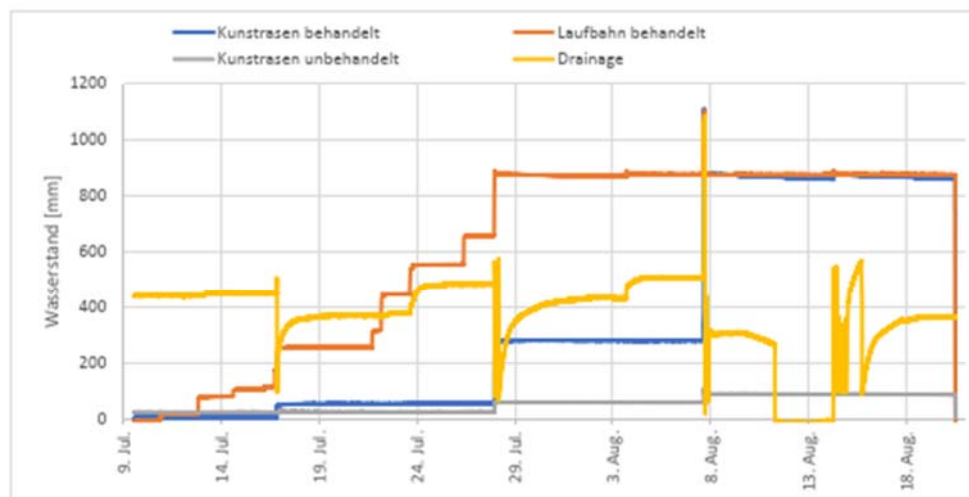
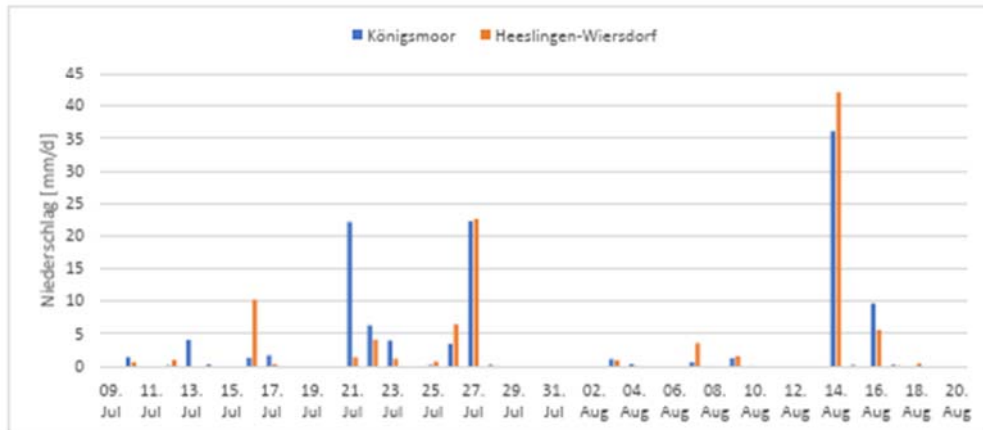
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000	Mittelwert 193,3
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor 202,5
Laufbahn behandelt	1,23	73	16,83	0,087	Heeslingen 184,2
Drainage	3,28	7885	0,42	0,002	



Kunstrasenplatz VfL Sittensen

11. Zeitraum

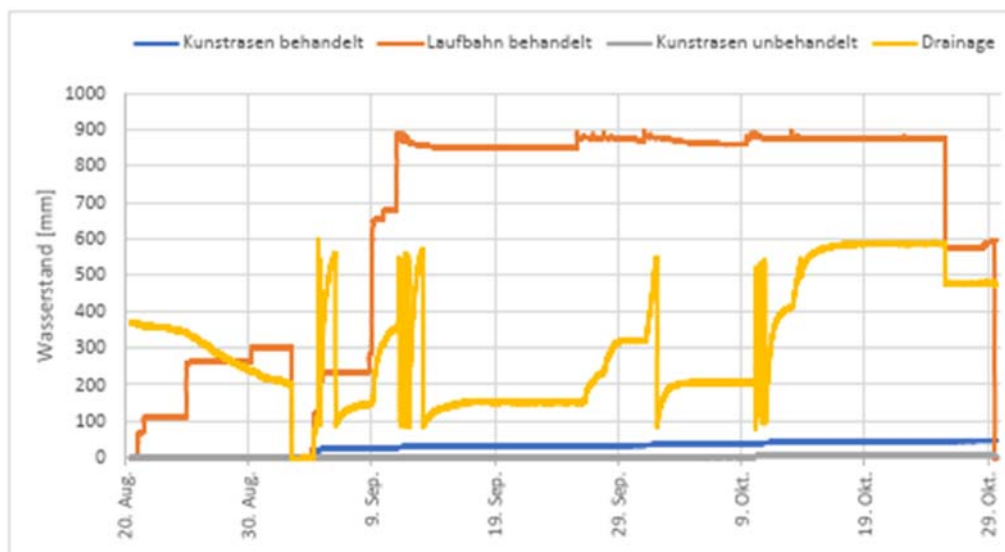
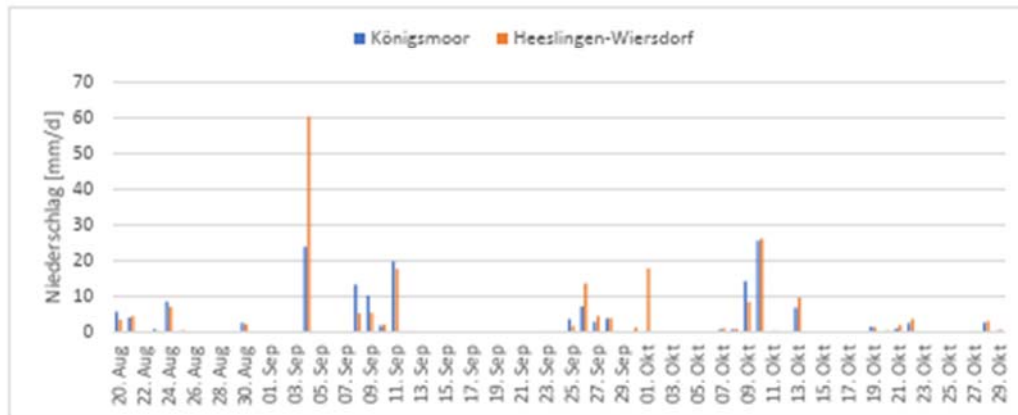
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt	1,23	370	3,32	0,030	Mittelwert	110,3
Kunstrasen unbehandelt	0,11	370	0,30	0,003	Königsmoor	117,2
Laufbahn behandelt	1,23	73	16,83	0,152	Heeslingen	103,5
Drainage		7885	0,00	0,000		



Kunstrasenplatz VfL Sittensen

12. Zeitraum

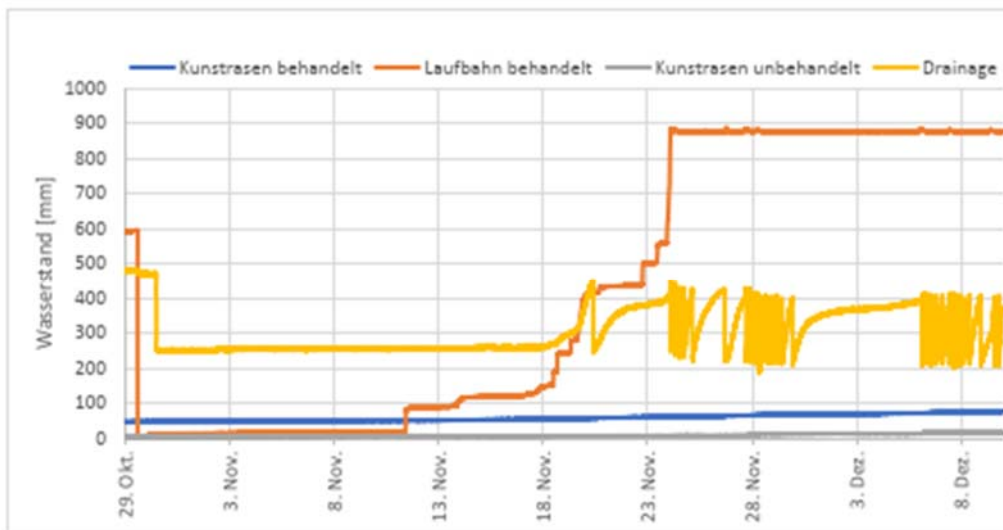
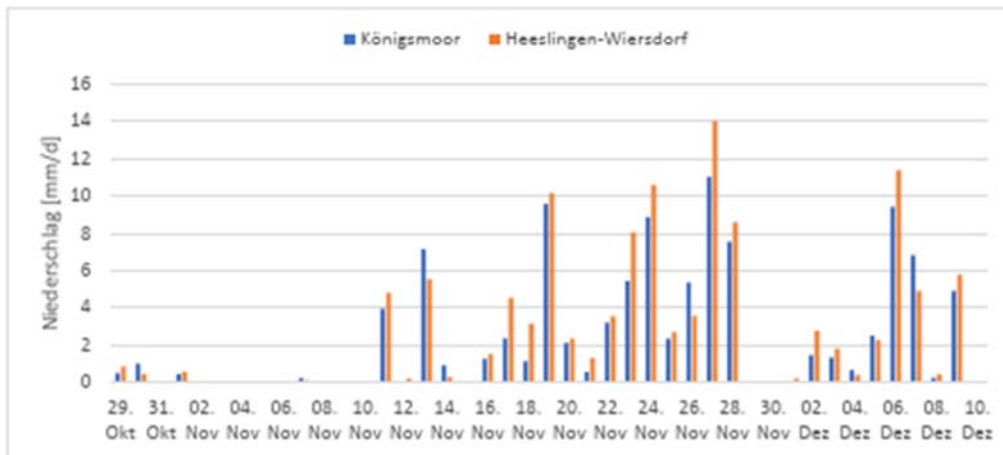
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt	0,06	370	0,17	0,001	Mittelwert	190,2
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor	167,6
Laufbahn behandelt	1,64	73	22,43	0,118	Heeslingen	212,8
Drainage	7,53	7885	0,95	0,005		



Kunstrasenplatz VfI Sittensen

13. Zeitraum

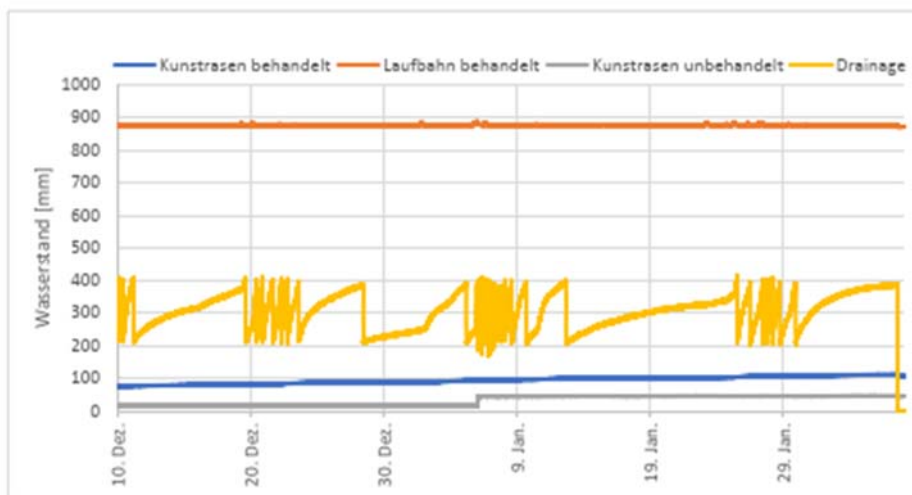
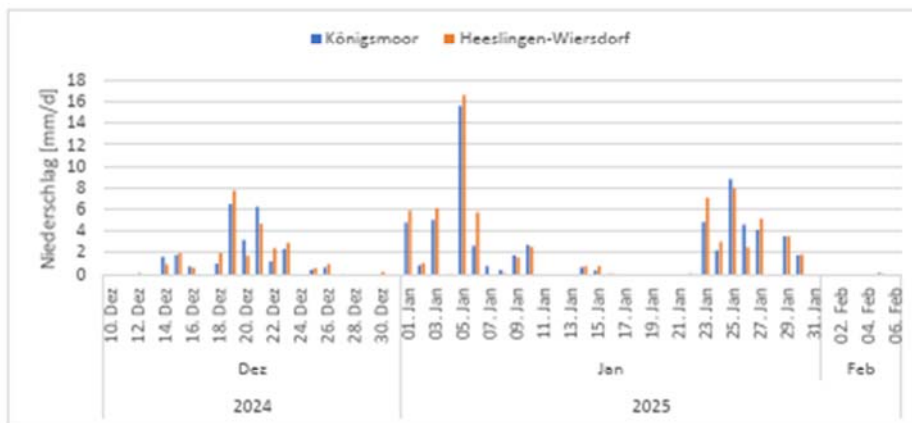
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,03	370	0,07	0,001	Mittelwert 109,8
Kunstrasen unbehandelt	0,01	370	0,04	0,000	Königsmoor 102,4
Laufbahn behandelt	1,20	73	16,45	0,150	Heeslingen 117,1
Drainage	0,00	7885	0,00	0,000	



Kunstrasenplatz VfL Sittensen

14. Zeitraum

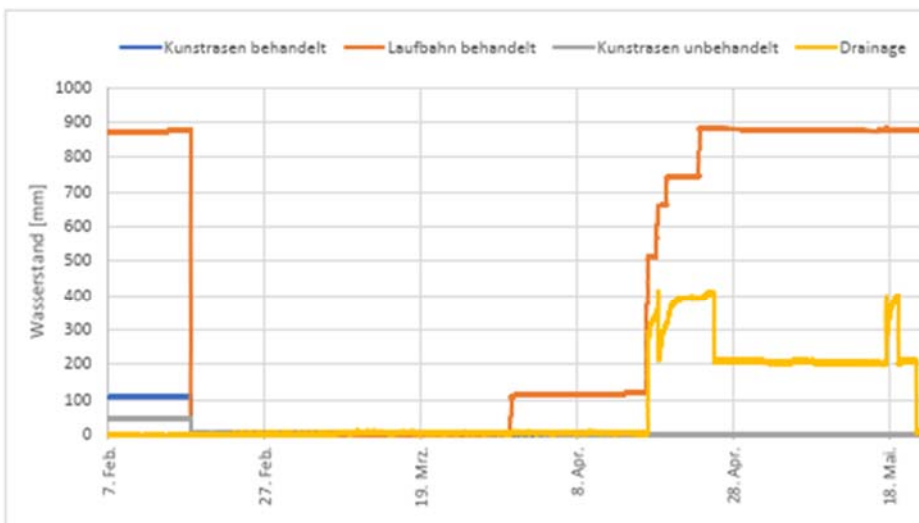
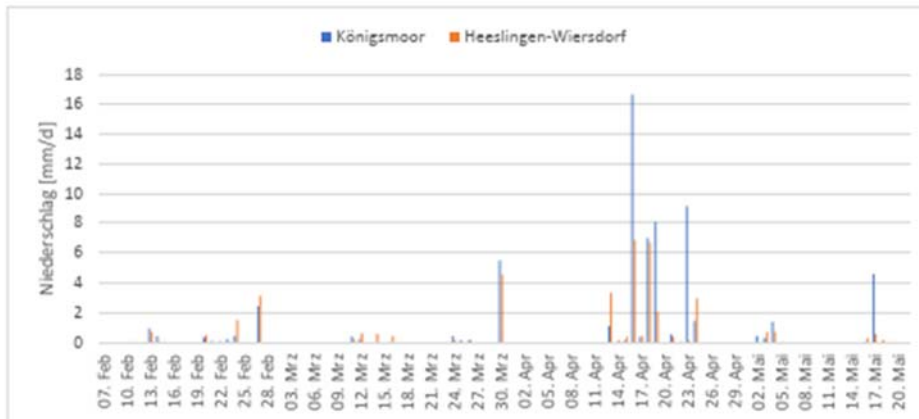
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000	Mittelwert 95,3
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor 91,4
Laufbahn behandelt	0,00	73	0,00	0,000	Heeslingen 99,1
Drainage	1,64	7885	0,21	0,002	



Kunstrasenplatz VfL Sittensen

15. Zeitraum

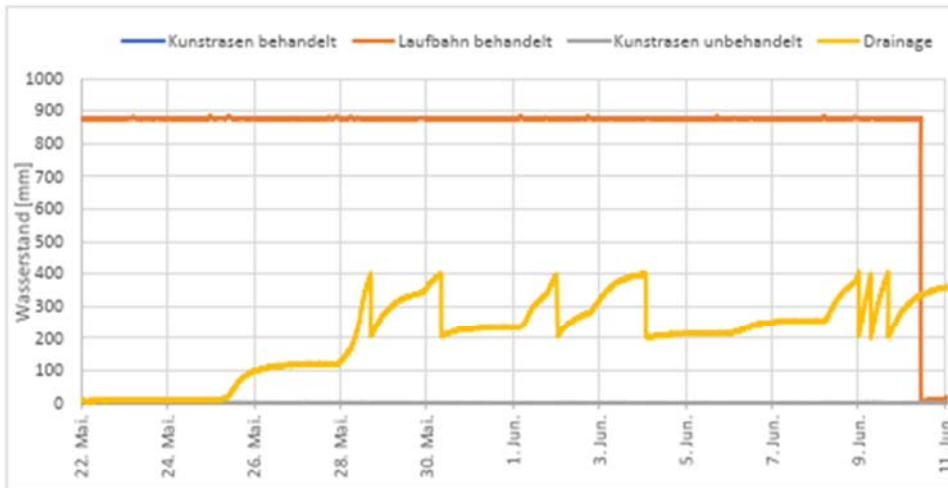
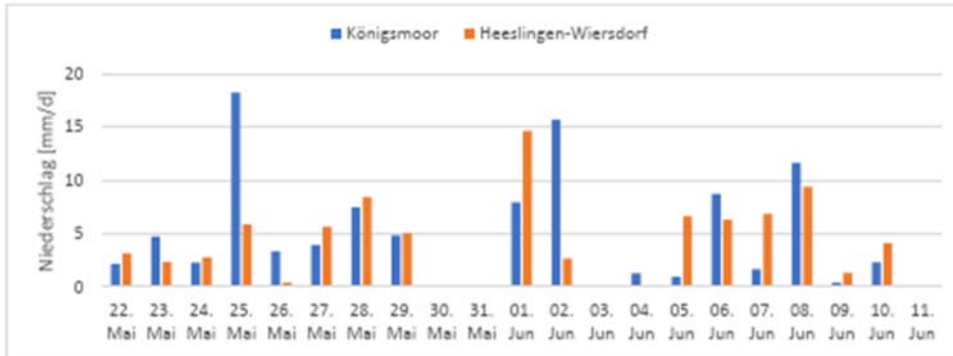
	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000	Mittelwert	50,5
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor	62,7
Laufbahn behandelt	1,16	73	15,89	0,315	Heeslingen	38,2
Drainage	1,37	7885	0,17	0,003		



Kunstrasenplatz VfL Sittensen

16. Zeitraum

	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt	0,00	370	0,00	0,000	Mittelwert	92,0
Kunstrasen unbehandelt	0,00	370	0,00	0,000	Königsmoor	98,0
Laufbahn behandelt	0,00	73	0,00	0,000	Heeslingen	86,1
Drainage	2,33	7885	0,30	0,003		



Kunstrasenplatz VfI Sittensen

17. Zeitraum

	Abfluss [m³]	Fläche [m²]	N _{eff} [mm]	ψ [-]	Niederschlag [mm]	
Kunstrasen behandelt		370	0,00	0,000	Mittelwert	154,3
Kunstrasen unbehandelt		370	0,00	0,000	Königsmoor	146,1
Laufbahn behandelt		73	0,00	0,000	Heeslingen	162,4
Drainage		7885	0,00	0,000		

