

Masterarbeit

Boden, Gewässer, Altlasten

Zum Thema:

Untersuchung von Kunstrasenplätzen als Belastungsquellen von Mikropartikeln für umgebende Systeme

- Emission, Transportverhalten und Verbleib von Kunstrasenplatz-Infill
am Beispiel von zwei Standorten (Osnabrück und Oberhausen) –

Vorgelegt von:

Sophie Nathalie Rischmüller

Matrikelnummer: 983727

Betreuende Institution:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und

Energietechnik (UMSICHT)

Osterfelder Str. 3

46047 Oberhausen

Betreuender Dozent: AR Dr. rer. nat. Andreas Lechner
Betreuer Fraunhofer UMSICHT: Dipl.-Ing. Jürgen Bertling,
Dipl.-Ing. Ralf Bertling (FH)

Osnabrück, im Juli 2022

Danksagung

Diese Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) in Oberhausen und der Universität Osnabrück absolviert. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Ralf Bertling, der mich von Beginn bis Abschluss meiner Arbeit stets unterstützt hat. Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing. Jürgen Bertling und Jan Blömer, die mich vor Ort am Institut, besonders bei der Konstruktion des Windkanals, unterstützt haben. Ich danke Julia Dohmen und Benita Naumann, die mich ebenfalls in einem besonderen Maße bei der Planung und Durchführung der Experimente bis hin zur Datenaufbereitung unterstützt haben.

Ich bedanke mich zudem bei meinem Dozenten der Universität Osnabrück, Herrn AR Dr. rer. nat. Andreas Lechner, für die Betreuung und Unterstützung, die konstruktiven Gespräche und die Inspiration während meiner Masterarbeit.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Fraunhofer UMSICHTS, die mir auf dem Weg der Fertigstellung meiner Masterarbeit geholfen haben.

Ich danke außerdem der Stadt Osnabrück, der Stadt Oberhausen, den Stadtwerken Osnabrück und Oberhausen, der Polytan GmbH, Firma Heiler GmbH & Co.KG, Domo Sports Grass, den Platzwarten der Kunstrasenplätze, sowie den Architekten Brinkmann & Deppen GbR und der Seeger Landschaftsarchitektur für die Bereitstellung von Geodaten und Unterlagen der Kunstrasenplätze und Standorte.

Mein besonderer Dank gilt schließlich meiner Familie und meinen Freunden, die mich sowohl beim Korrekturlesen als auch moralisch unterstützt haben.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und gelieferte Datensätze, Zeichnungen, Skizzen und graphische Darstellungen selbständig erstellt habe. Ich habe keine anderen Quellen als die angegebenen benutzt und habe die Stellen der Arbeit, die anderen Werken entnommen sind - einschließlich verwendeter Tabellen und Abbildungen - in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht.

Osnabrück, den _____

(Unterschrift)

**Erklärung gem. § 8 Abs. 3 der studiengangspezifischen Prüfungsordnung
für den Masterstudiengang *Boden, Gewässer, Altlasten***

Hiermit versichere ich, dass ich die Masterarbeit bzw. meinen entsprechend gekennzeichneten Anteil der Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Print- oder Online-Veröffentlichungen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Datum, Unterschrift

Zusammenfassung

Emissionen von Kunststoff-Infill aus Kunstrasenplätzen stellen die fünfthäufigste Mikroplastikquelle dar (Bertling et al. 2021a). Aufgrund dessen wurde an den Standorten Osnabrück (Niedersachsen) und Oberhausen (Nordrhein-Westfalen) ein Monitoring von Kunstrasenplätzen durchgeführt. Ziele des Monitorings waren Informationen zu Platzanlage, -aufbau und -umfeld zu erhalten, überdies Untersuchungen zu Emissionsmengen, Transport und Verbleib von Kunstrasenplatz-Infill zu erforschen, um Erkenntnisse zu gewinnen, aus denen Emissionsminderungsstrategien entwickelt werden können. Durch punktuelle Beprobungen auf den beiden Plätzen konnten Infillverluste und die Partikelgrößenverteilung innerhalb der Plätze bestimmt werden. Das windgetriebene Migrations- und Transportverhalten von Kunstrasenplatz-Infill wurde mit Hilfe eines eigens konstruierten Windkanals und KRP-Modellflächen simuliert. Des Weiteren wurde das wassergetriebene Migrations- und Transportverhalten von Kunstrasenplatz-Infill in Entwässerungsschächten am Standort Osnabrück untersucht. Durch die Untersuchungen konnte auf beiden Plätzen ein Abrieb von Kork und EPDM im Größenbereich $< 63 \mu\text{m}$ mikroskopisch nachgewiesen werden. Die Infillverluste des Kunstrasenplatz Oberhausen liegen hochgerechnet mit max. 2,89 t (im Vergleich zu (Bertling et al. 2021a) im Bereich des durchschnittlichen jährlichen Verlusts für Performance-Infill). Auf dem Kunstrasenplatz Osnabrück hingegen ist ein Korküberschuss zu verzeichnen. Unterschiedliche Angaben der dort verfüllten Korkmengen lassen darauf schließen, dass das Kork-Infill, statt auf ein fixes Gewicht pro Quadratmeter, auf eine Mindestfüllhöhe von 10 mm aufgefüllt wurde. Anhand verschiedener Untersuchungen innerhalb dieser Abschlussarbeit kristallisierte sich Wind in Kombination mit anderen Treibern als der Haupttreiber für den Infillverlust über die Entwässerungsschächte heraus. Der Teilversuch mit den KRP-Modellflächen zeigt jedoch, dass ausschließlich Wind und Niederschlag ohne Bespielung keinen großen Einfluss auf die Infillverlustmenge haben. Weitere Faktoren wie Platzaufbau, -anlage, und -konstruktion, Pflegemanagement, Lage und Größe des Platzes sowie die Entwässerungssituation spielen ebenfalls eine bedeutende Rolle und sind Faktoren, anhand deren Regulierung Infillverluste auf ein Minimum reduziert werden können. Auf Grundlage der Versuche an den Entwässerungsschächten kann ein maximal jährlicher Infillverlust von 1,62 kg abgeschätzt werden. Weitere Studien haben gezeigt, dass der Eintrag von Kunstrasenplatz-Infill in die aquatische Umwelt, zumindest für Deutschland, als sehr gering eingeschätzt werden kann. Dem Infill-Eintrag über den

Schmutzwasserpfad wird allgemein eine deutlich höhere Relevanz als dem Niederschlagspfad zugesprochen (Breitbarth et al. 2022).

Abstract

Emissions of plastic infill from artificial turf pitches are the fifth most common source of microplastics (Bertling et al. 2021a). For this reason, monitoring of artificial turf pitches was carried out at the locations of Os-nabrück (Lower Saxony) and Oberhausen (North Rhine-Westphalia). The objectives of the monitoring were to obtain information on the pitch layout, construction and environment, as well as to investigate the emission quantities, transport and fate of artificial turf infill in order to gain knowledge from which emission reduction strategies can be developed. By spot sampling on the two pitches, infill losses and the particle size distribution within the pitches could be determined. The wind-driven migration and transport behaviour of artificial turf infill was simulated with the help of a specially constructed wind tunnel and KRP model surfaces. Furthermore, the water-driven migration and transport behaviour of artificial turf infill was investigated in drainage shafts at the Osnabrück site. The investigations provided microscopic evidence of abrasion of cork and EPDM in the size range $< 63 \mu\text{m}$ on both pitches. The infill losses of the artificial turf pitch in Oberhausen were extrapolated to a maximum of 2.89 t (in comparison to (Bertling et al. 2021a)) in the range of the average annual loss for performance infill). On the artificial turf pitch in Osnabrück, on the other hand, there is a cork surplus. Different data on the quantities of cork filled there suggest that the cork infill was filled to a minimum height of 10 mm instead of a fixed weight per square metre. Based on various investigations within this thesis, wind in combination with other drivers emerged as the main driver of infill loss via the drainage shafts. However, the partial test with the KRP model plots shows that only wind and precipitation without spraying do not have a major influence on the amount of infill loss. Other factors such as site structure, layout and construction, maintenance management, site location and size, and the drainage situation also play a significant role and are factors that can be used to regulate infill losses to a minimum. Based on the experiments on the drainage pits, a maximum annual infill loss of 1.62 kg can be estimated. Further studies have shown that the input of artificial turf infill into the aquatic environment can be estimated as very low, at least for Germany. Infill input via the wastewater pathway is generally considered to be significantly more relevant than the low-impact pathway (Breitbarth et al. 2022).

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Zusammenfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Mikroplastik in der Umwelt	1
1.2 Fragestellung	2
2 Theoretischer Hintergrund	4
2.1 Kunststoffe/Mikroplastik	4
2.1.1 Geschichte und Entwicklung	4
2.1.2 Anwendungsbereiche	4
2.1.3 Begriffsdefinitionen	5
2.1.4 Degradation von Kunststoffen	6
2.1.5 Migrationspfade und Transport von Kunststoffen und Mikroplastik	8
2.1.6 Quellen der Eintragspfade von Kunststoffen und Mikroplastik	9
2.1.7 Verbleib und Senken	11
2.1.8 Mikroplastik adsorbierbarer Schadstoff/Ökotoxikologie	15
2.2 Kunstrasensysteme	17
2.2.1 Geschichte und Entwicklung	17
2.2.2 Vor- und Nachteile der Systeme	19
2.3 Aufbau Kunstrasensysteme	22
2.3.1 Allgemeiner Aufbau	22
2.3.2 Alternative Füllstoffe	26
2.4 KRP-MP Emission, Transport, Senken	28
2.4.1 KRP-Faser Emission	29
2.5 KRP- Maßnahmen zur Verhinderung von MP-Emissionen	30
3 Untersuchungsdesign	32
3.1 Standortbeschreibung der Untersuchungsobjekte/ Kunstrasenplätze	32
3.1.1 Kunstrasenplatz Osnabrück-Nahne (KRP OS)	32
3.1.2 Kunstrasenplatz Oberhausen (KRP OB)	34

3.2	Methoden.....	36
3.2.1	Infill-Kunstrasenplatzuntersuchungen/Monitoring.....	36
3.2.2	Infillverlustbestimmung	38
3.2.3	Rüttel- und Schüttdichtebestimmung	39
3.2.4	Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometrie	40
3.2.5	Infill- und Partikeltransportverhalten (Luftpfad).....	41
3.2.6	Infill- und Partikeltransportverhalten (Wasserpfad).....	45
4	Ergebnisse und Diskussion	50
4.1	Infill-Kunstrasenplatzuntersuchungen/Monitoring.....	50
4.1.1	Recherche und Platzbegehung.....	50
4.2	Siebanalyse/ Partikelgrößenverteilung.....	53
4.2.1	Kunstrasenplatz Oberhausen (KRP OB).....	53
4.2.2	Kunstrasenplatz Osnabrück (KRP OS)	57
4.2.3	Platzvergleich	60
4.2.4	Infillverluste.....	64
4.2.5	Rüttel- und Schüttdichtebestimmung	70
4.2.6	Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometrie	71
4.2.7	Infill- und Partikeltransportverhalten (Luftpfad).....	73
4.2.8	Infill- und Partikeltransportverhalten (Wasserpfad).....	80
5	Fazit	91
6	Literaturverzeichnis.....	94
	Anhangsverzeichnis.....	112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: europäische Kunststoffnachfrage und ihre Anwendungsbereiche. Beispielhaft für das Jahr 2019 (PlasticsEurope Deutschland e. V. 2021)....	5
Abbildung 2: Entstehung und Freisetzung von primärem und sekundärem Mikroplastik im Ozean (Lenz o.J.).....	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Degradation von Makroplastik zu Nanoplastik am Beispiel der Photodegradation. (Galloway et al. 2017).	7
Abbildung 4: Eintragspfade und Quellen von Mikroplastik in die Umwelt (Waldschläger 2019).	9
Abbildung 5: Mikroplastik Senken in ökologischen Systemen (Waldschläger 2019).	12
Abbildung 6: Darstellung Ökotoxikologie, physische und chemische Effekte von Mikroplastik. (Hägerbäumer 2018).....	15
Abbildung 7: Entwicklung der Kunstrasenplätze im zeitlichen Verlauf (GreenFields o. J.).	19
Abbildung 8: Drei Varianten (A, B, C) für den Aufbau eines KRP-Platzes, Darstellung nach (Bertling et al. 2021a).....	24
Abbildung 9: Luftbild Kunstrasenplatz Osnabrück-Nahne (orange umrandet) und Umgebung (Google Maps 2022).	32
Abbildung 10: Karte der Umgebung des Kunstrasenplatzes Osnabrück. KRP OS mit schwarzem Ring gekennzeichnet. (Dohmen, J. und Rischmüller, S. (Fraunhofer UMSICHT) 2021).	33
Abbildung 11: Luftbild Kunstrasenplatz Oberhausen, Mellinghoferstr. (orange umrandet) und Umgebung (Google Maps 2022).....	34
Abbildung 12: Karte der Umgebung des Kunstrasenplatzes Oberhausen. KRP OB mit schwarzem Ring gekennzeichnet (Dohmen, J.; Rischmüller, S. 2021).	35
Abbildung 13: farblich markierte Probenahmestellen auf dem Kunstrasenplatz OB (Mellinghofer Str.114, 46047 Oberhausen) mit eingetragener Entfernung zu den Platzrädern. Modifiziertes Luftbild (Google Maps 2022).....	37
Abbildung 14: farblich markierte Probenahmestellen auf dem Kunstrasenplatz OS- Nahne (Klaus-Strickler-Weg 25, 49082 Osnabrück)) mit eingetragener Entfernung zu den Platzrädern. Modifiziertes Luftbild (Google Maps 2022).	37

Abbildung 15: Schematischer Aufbau eines Gaspyknometer mit konstantem Volumen. Probenvolumen wird durch Druckänderung bestimmt. Formel- und Abbildungsquelle: (Wikipedia 2020) auf Grundlage von (Tamari und Aguilar-Chávez 2005).....	41
Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Windkanals. Blauer Pfeil: Strömungsrichtung. Eigene Darstellung.	42
Abbildung 17: Ansichtskarte der kartierten Entwässerungsschächte auf dem Kunstrasenplatz OS-Nahne. Legende gibt Auskunft über verschiedene Entwässerungsschächte. Probenahme erfolgte an den mit „X“ gekennzeichneten Schächten P1-P4.....	47
Abbildung 18: Aufbau eines feinen Siebes. Grober ursprünglicher Siebeinsatz (links) mit Erweiterung eines feineren Siebeinsatzes. Ansicht kombiniertes Sieb im Gitterschacht (rechts). Siebeinsätze DIN 1236, Hofsinkkasten. ...	48
Abbildung 19: Ansicht Einleitungsstelle in den Riedenbach mit Metallgewebe als Siebeinsatz und Kabelbinder zur Fixierung.....	49
Abbildung 20: Trockengewichte [g] der Infillfraktionen der Probenahmepunkte. Alle Fraktionsbereiche vertreten. Teilweise < 1 g, deshalb nicht sichtbar.	54
Abbildung 21: Ergebnisse der Siebanalyse. Partikelgrößenverteilung der fünf Infill-Proben.	54
Abbildung 22: Infillkonzentrationen [kg/m ²] an den Probenahmestellen, Aufschlüsselung des EPDM- und Sandgewichts.	56
Abbildung 23: Trockengewichte [g] der Infillfraktionen der Probenahmepunkte. Alle Fraktionsbereiche vertreten. Teilweise < 1 g, deshalb nicht sichtbar.	57
Abbildung 24: Ergebnisse der Siebanalyse. Partikelgrößenverteilung der fünf Infill-Proben.	58
Abbildung 25: Infillkonzentration [kg/m ²] an den Probenahmestellen, Aufschlüsselung des Kork- und Sandgewichts.	59
Abbildung 26: Übersicht der mittleren Ablösegeschwindigkeiten [m/s] verschiedener Materialien auf 3 verschiedenen Oberflächen (Technikumsboden, K80, K120) jeweils ohne Barriere, 45° und 90° Barriere im Vergleich. Messreihen als Datengrundlage mit je [n]=5 (Anhang 7.4). Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Bei nicht abgelösten Partikeln wurde eine Ablösegeschwindigkeit > 14 m/s angenommen. In diesem Fall Standardabweichung nicht angegeben.....	74

- Abbildung 27: Ansicht der KRP Modelltestflächen vor dem C-Gebäude von Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen. Ausrichtung in Südwestlicher Windrichtung. Testflächen wurden mit Steinen an den Rändern der Planen stabilisiert. 78
- Abbildung 28: Darstellung der wöchentlichen Wetterdaten während des Untersuchungszeitraums. Niederschlag - aufsummierter wöchentlicher Gesamtniederschlag. Temperatur und Windgeschwindigkeit – Mittelwerte. Datengrundlage: tägliche Wetterdaten der Wetterstation Essen-Bredene (Wetter.com GmbH 2022) (Anhang 7.5). Woche 0, Witterungsbedingungen vor Versuchsbeginn..... 78
- Abbildung 29: Parameterdarstellung im Untersuchungszeitraum. 01.02.-07.02. bezeichnet Woche 0, die Woche vor Versuchsbeginn. Dreiecke und Rauten stellen jeweils Datenpunkte von Mittelwerten dar. Balken stellt wöchentlichen Gesamtniederschlag mit den jeweiligen Einzelniederschlagsmengen dar. Rohdaten (Anhang 7.6). 82
- Abbildung 30: Parameterdarstellung im Untersuchungszeitraum. A) Darstellung der wöchentlichen Durchschnittsgeschwindigkeit. B) wöchentlicher Gesamtniederschlag. C) Infillverluste der Gitterschächte (P1-P3). D) wöchentliche Durchschnittstemperatur. 01.02.-07.02. bezeichnet Woche 0, die Woche vor Versuchsbeginn. Dreiecke in Abb. A und Rauten in Abb. D stellen jeweils Datenpunkte von Mittelwerten dar. Rohdaten (Anhang 7.6). 83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der wichtigsten Eckdaten der Kunstrasenplätze: KRP OS und KRP OB (sofern keine weiteren Quellen genannt wurden die Daten aus Begehungsprotokollen entnommen, Anhang 2), Quellen: (Stadt OB: Fachbereich Sport (Hinz, U.) 2022) (Stadt Oberhausen 2021; STOAG Stadtwerke Oberhausen GmbH 2021; Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021)	51
Tabelle 2: Verhältnis von Sand zu EPDM. Vergleich der Proben mit der ursprünglichen verfüllten Infillmengen. Bei Platzfertigstellung Sand: 20 kg/m ² , EPDM: 4 kg/m ²	57
Tabelle 3: Verhältnis von Sand zu Kork. Vergleich der Proben mit der ursprünglichen verfüllten Infillmengen. Bei Platzfertigstellung Sand: 25 kg/m ² , Kork: 1 kg/m ²	60
Tabelle 4: Grundlage Infillbilanzierung. Platzfertigstellung bis aktuelle Lage. Kunstrasenplatz OB und OS-Nahne im Vergleich. (Stadt Oberhausen 2021; Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021)	64
Tabelle 5: Infillbilanzierung KRP Oberhausen, von 2019 bis Oktober 2021. Rot gekennzeichnet Infillverluste (aktuelle Werte-Sollwerte). Grün gekennzeichnet Infillüberschuss (aktuelle Werte-Sollwerte). Ranking von 1 (sehr wenig Verluste/ Gewinn) bis 5 (höchsten Verluste). Angenommener Sollwert für Sand nach Platzfertigstellung und jährlicher Nachfüllung: 20,642 kg/m ² . Angenommener Sollwert für EPDM: 4 kg/m ² . Angenommener Wert für Gesamteinfill: 24,642 kg/m ² . Gesamtfläche KRP OB brutto: 5.605 m ²	66
Tabelle 6: Infillbilanzierung KRP Osnabrück-Nahne von 2020 bis Oktober 2021. Rot gekennzeichnet: Infillverluste (aktuelle Werte-Sollwerte). Grün gekennzeichnet: Infillüberschuss (aktuelle Werte-Sollwerte). Ranking von 1 (sehr wenig Verluste/ Gewinn) bis 5 (höchsten Verluste). Angenommener Sollwert für Sand nach Platzfertigstellung: 25 kg/m ² . Angenommener Sollwert für Kork: 1 kg/m ² . Angenommener Wert für Gesamteinfill: 26 kg/m ² . Gesamtfläche KRP OS brutto: 8.183,01 m ²	67
Tabelle 7: Ergebnisse im Vergleich. Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometrie. Genauere Ergebnisse: s. Messprotokolle (Anhang 7.3).	72

- Tabelle 8: Beispielhafte Darstellung der Ablösegeschwindigkeiten verschiedener Materialien auf Technikumsboden ohne Barriere. Ablösegeschwindigkeiten stellen jeweils Mittelwerte der Messreihen (Anhang 7.4.1) dar. 73
- Tabelle 9: Infillverluste der Gitterschächte P1-P3 im Versuchszeitraum. Dunkelblaue Werte kennzeichnen jeweils die Maximal- und hellblau hervorgehobene Werte die Minimalwerte. Gleiches gilt für orange unterlegte Daten, welche sich auf die Gesamtinfillmenge aller Schächte bezieht. 86

Abkürzungsverzeichnis

AWI	Alfred-Wegener-Instituts
DFB	Deutscher Fußball-Bund e. V.
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
EL	Elastikschicht
ELT	End of Life Tyres-Granulat
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-(Monomer)-Kautschuk
ET	Elastische Tragschicht
FIFA	Fédération Internationale de Football Association
GPGP	Great Pacific Garbage Patch
IAKS	International Association for Sports and Leisure Facilities
KRP	Kunstrasenplatz, Kunstrasenplatz
KRP OB	Kunstrasenplatz Oberhausen
KRP OS	Kunstrasenplatz Osnabrück-Nahne
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MP	Mikroplastik
NHN	Normalhöhennull, früher auch Normalnull (NN), stellt Bezugsfläche für Höhen über dem Meeresspiegel im Deutschen Haupthöhennetz dar.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
Partikel	a) Teilchen oder b) morphologische Beschreibung eines Teilchens wie Faser, Fragment oder Kugel
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterphthalat
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
TPE	Thermoplastische Elastomere
UEFA	Union of European Football Associations
UMSICHT	Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
pb0 oder pSch	Schüttdichte
pbK	Stampfdichte

1 Einleitung

1.1 Mikroplastik in der Umwelt

Die Kunststoffe bzw. Mikroplastik¹ in der Umwelt sind heutzutage ein relevantes und globales Umweltthema. Seit den 50er Jahren bis heute (neueste Daten, Stand 2020) ist die jährliche Weltkunststoffproduktion von 1,5 Mio. auf 370 Mio. Tonnen angestiegen (Statista Research Department 2022). Durch die immer weiterwachsende Produktion von Kunststoffen steigen auch die Kunststoffemissionen und dadurch der Kunststoffanteil in der Umwelt stark an. Einmal in der Umwelt können sich Kunststoffe, z. B. in der Form von Mikroplastik, über verschiedene Transportpfade (s. Kap. 2.1.5 Migrationspfade und Transport) über große Distanzen verteilen. Sie sind mittlerweile ubiquitär in den Kompartimenten Boden, Luft und Wasser verbreitet. Besonders in limnischen und marinen Systemen wie Seen, Flüsse, Meere und Ozeane wurde Mikroplastik in vielen Studien nachgewiesen (Claessens et al. 2011; Imhof et al. 2013; Lechner et al. 2014). Selbst an abgelegenen Orten wie der Arktis, der Tiefsee (Alfred-Wegener-Institut 2021; Miklos et al. 2016). und Mangrovenwäldern (Jayanthi Barasarathi et al. 2014) konnte das Vorkommen von Mikroplastik nachgewiesen werden. Die Einwirkungen von Mikroplastik auf die aquatische Umwelt sind besonders an Stränden, in Plastikmüllstrudeln auf den Weltmeeren und auch an der ökotoxikologischen Wirkung auf Organismen (s. Kap. 2.1.8 Mikroplastik adsorbierbarer Schadstoff/Ökotoxikologie) zu erkennen (Waldschläger 2019; Miklos et al. 2016).

In den letzten Jahren sind viele Forschungen zu Mikroplastik und Kunststoffen in der Umwelt durchgeführt worden. Allerdings sind viele Phänomene noch unzureichend untersucht und viele Fragestellungen noch nicht beantwortet. Dies gilt vor allem für Migration sowie für Transport und Verbleib von Mikroplastik in die Umwelt. Ebenso stehen Untersuchungen zu öko- und humantoxikologischen Auswirkungen von Kunststoffen noch am Anfang (Bertling et al. 2018).

Primäres und sekundäres Mikroplastik² gelangt aus verschiedenen Quellen in die Umwelt. In Deutschland bestehen die Kunststoffemissionen nach Berechnungen vom

¹ Kunststoffpartikel mit einem Durchmesser unter 5 mm, Arthur, C., J. Baker and H. Bamford (eds). 2009.

² primär: bereits in Dimensionen kleiner 5 mm hergestellt; sekundär: entsteht erst durch Degradationsprozesse in der Umwelt, Fath 2019b

Fraunhofer UMSICHT zu 74 % aus Mikroplastik und zu 26 % aus Makroplastik³. Neben Reifenabrieb, Emissionen bei der Abfallentsorgung, Pelletverlusten und Kunststoffabrieb von Bitumen und Polymeren in Asphalt stellen Emissionen von Kunststoff-Infill von Sport- und Spielplatzflächen, z. B. durch Spielbetrieb und Verwehungen, die fünfthäufigste Mikroplastikquelle dar (Bertling et al. 2018). Europaweit existieren mehr als 50.000 Kunstrasenplätze (Bertling o.J.). Allein in Deutschland gibt es ca. 5.000 Plätze, wobei jährlich ca. 250 neue entstehen (Bertling o.J.; DFB - Deutscher Fußball-Bund e.V. 2021). Unter Berücksichtigung der standardmäßigen Fläche von ca. 7000 m² kann bei einer Anzahl von 51.616 Kunstrasenplätzen in ganz Europa ein jährlicher Granulatverlust zwischen 18.000 bis 71.105 Tonnen/Jahr und Platz angenommen werden (Stand 2020) (Hann et al. 2018). Ausgehend vom ermittelten Wert der Studie, ergibt sich für Deutschland mit etwa 5.000 Plätzen ein jährlicher Infillverlust von 6.000 bis 24.000 Tonnen. Eine Studie von Fraunhofer UMSICHT ermittelt mit 8.000 Tonnen/Jahr einen Verlust im ähnlichen Größenbereich (Bertling et al. 2021a).

Die Kunststoffemissionen von Kunstrasenplätzen, verursacht durch den Verlust von Kunststoff-Infill, sind abhängig von der Bauweise und Lage des Platzes, der Platznutzung, Einflüssen von Wind und Niederschlag sowie der Pflege und eventuell installierter Infill-Rückhaltesysteme. Die genaue Menge emittierten Infills von Kunstrasenplätzen ist unbekannt, Migration, Transport und Verbleib in der Umwelt und innerhalb der Umweltkompartimente sind bis heute nur unzureichend erforscht (Bertling et al. 2021a; Bertling o.J.).

1.2 Fragestellung

Am Beispiel der Kunstrasenplätze Osnabrück-Nahne und Oberhausen wurde ein Kunstrasenplatz-Monitoring durchgeführt. Zudem wurden Emissionsmengen, Transport und Verbleib von Kunstrasen-Infill (Kunststoffgranulat/Alternativgranulat und Kunstrasenfasern) untersucht. Hierfür wurden zunächst allgemeine Randdaten der Plätze durch eine Platzbegehung mit Protokollierung (Anhang 2) erfasst. Zusätzlich wurden topographische, klimatische und geographische Daten der Kunstrasenplatz-Standorte betrachtet. Zur Bestimmung der aktuellen Infillmengen auf den Kunstrasenplätzen wurden punktuelle Probenahmen auf dem Platz vorgenommen, um mögliche Infillverluste definieren zu können.

³ Makroplastik (> 25 mm), Wright et al. 2013; Miklos et al. 2016.

Um den Infillverlust durch Wetterereignisse sowie Migration und Transport des Infills zu untersuchen, wurden drei Telexperimente durchgeführt. Zum einen wurde am Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen ein Monitoring von „KRP-Modellflächen“ durchgeführt, bei denen Testflächen, Kunstrasenplätze im Maßstab von 1:100, natürlichen Einflüssen von Wind und Niederschlägen ausgesetzt wurden. Zusätzlich erfolgte eine experimentelle Untersuchung des Transportverhaltens von Infill mit Hilfe eines selbstkonstruierten Windkanals. Hierbei wurde KRP-Infill aus Kork und Kunststoff in unterschiedlichen Größen auf verschiedenen Untergründen im Hinblick auf die Partikelablösegeschwindigkeit untersucht. Um den Partikeltransport über den Wasserpfad zu untersuchen und Aussagen über Infillverluste treffen zu können, wurden in einem dritten Teilversuch Siebeinsätze in ausgewählten Entwässerungsschächten des Kunstrasenplatzes Osnabrück-Nahne installiert und die dort akkumulierten Infillmengen über einen definierten Zeitraum im Zusammenhang mit den Wetterdaten dokumentiert.

Als Ergebnis sollen einfache Modellvorstellungen zum Transport von Kunstrasen-Infill gemacht sowie Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, wie sich ein unerwünschter Transport vermeiden lässt. Ziel ist es, durch Beobachtungen, Probenahmen, Tests und Versuche verifizierte Informationen zu Migration, Transportverhalten und zum Verbleib von Kunstrasenplatz-Infill zu erhalten, welches bislang noch unzureichend erforscht sind. Zudem soll der Grad des Einflusses unterschiedlicher Treiber wie Spielbetrieb, Platzpflege, Wind und Niederschlag im Hinblick auf die Transportpfade eingeordnet werden. Letztendlich dienen alle Untersuchungen dazu, eine bessere Vorstellung der Emissionsvorgänge von Infill von Kunstrasenplätzen zu erhalten.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Kunststoffe/Mikroplastik

2.1.1 Geschichte und Entwicklung

Kunststoffe bestehen aus festen unlöslichen synthetischen oder halbsynthetischen Makromolekülen (Polymere), die sich aus vielen kleinen Einzelmolekülen (Monomeren) zusammensetzen. Sie lassen sich aufgrund ihrer thermischen und mechanischen Eigenschaften in folgende drei Kunststoffklassen einteilen: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Kunststoffklassen der Thermoplaste wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC) machen etwa 73 % der Gesamtkunststoffproduktion aus (Lumitos AG o.J.; Waldschläger 2019).

Im 17. Und 18. Jahrhundert wurden die ersten wissenschaftlichen Forschungen zu den Kunststoffen durchgeführt. Das Jahr 1950 stellte den Durchbruch der Kunststoffproduktion dar und es kam seitdem zu einer exponentiellen Zunahme (Lumitos AG o.J.; Waldschläger 2019). Besonders nach dem 2. Weltkrieg wurde der Werkstoff aufgrund seiner chemischen Beständigkeit und Formbarkeit sehr geschätzt. Durch weitere Eigenschaften wie Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit, Temperatur- und Wärmeformbeständigkeit bestand ein hohes Interesse am Material und es wurde vom Ersatzstoff zu einem Werkstoff, welcher bis heute in der Industrie genutzt (Lumitos AG o.J.; Waldschläger 2019). Zudem ist die Kunststoffproduktion kostengünstiger und energiesparender in der Herstellung als andere Materialien wie z. B. Metalle oder Keramik (Fath 2019b).

Seit Beginn der Massenproduktion (1950) sind bis 2015 etwa 8,3 Mrd. Tonnen Kunststoffe produziert worden (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2019). Etwa 79 % des weltweitproduzierten Kunststoffes ist entweder in Gebrauch, befindet sich in der Umwelt oder wurde bzw. wird in einigen Ländern bis heute in Deponien gelagert. Lediglich 9 % des Kunststoffs wurde stofflich recycelt und 12 % wurden energetisch verwertet, demnach verbrannt (Fath 2019b).

2.1.2 Anwendungsbereiche

Kunststoffe werden zu einem Anteil von ca. 60 % in der Verpackungs- und Konstruktionsbranche angewendet. Weitere Anwendungsbereiche sind die Automobilindustrie,

Elektronik, Haushalt, Sport, Spiele, Freizeit, Landwirtschaft, Möbel und Sonstige Verwendungen (Abbildung 1) (Fath 2019b; PlasticsEurope Deutschland e. V. 2021).

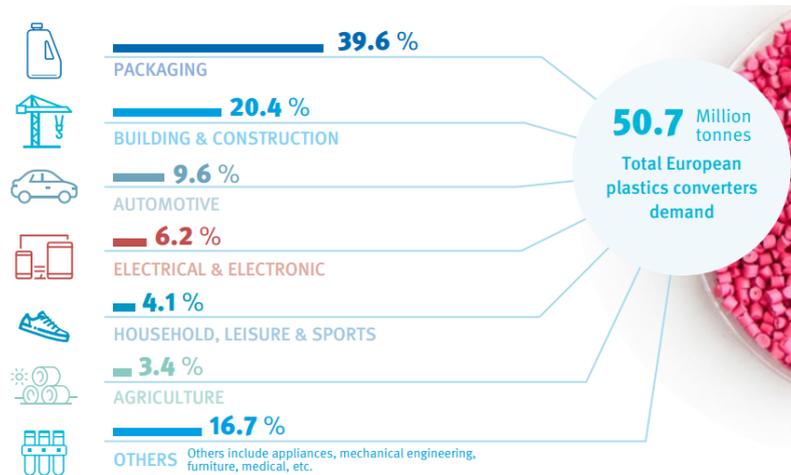


Abbildung 1: europäische Kunststoffnachfrage und ihre Anwendungsbereiche. Beispielhaft für das Jahr 2019 (PlasticsEurope Deutschland e. V. 2021).

2.1.3 Begriffsdefinitionen

Mikroplastik

Für den Begriff Mikroplastik existieren verschiedene Definitionen im Hinblick auf die Größenbereiche. Bis heute wurde noch keine einheitliche offiziell standardisierte Definition festgelegt (Sexlinger 2019). Nach einer Definition des National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) werden Kunststoffpartikel mit einem Durchmesser unter 5 mm als Mikroplastik bezeichnet (Arthur, C., J. Baker and H. Bamford (eds). 2009). Alle Partikel, welche größer als 5 mm sind, werden als Meso- (5-25 mm) und Makroplastik (> 25 mm) bezeichnet (Wright et al. 2013; Miklos et al. 2016). Als Nanoplastik werden Kunststoffpartikel im Größenbereich von 1 bis max. 1000 nm bezeichnet (Valsesia et al. 2021). Mikroplastikpartikel können neben der Größe auch anhand der Polymerart bzw. Dichte, Ursprungsart (primäres und sekundäres Mikroplastik) und Partikelform (Pellets, Bruchstücke, Fasern /Filamente, Schäume, Folien und Microbeads) klassifiziert werden (Wagner et al. 2014; Waldschläger 2019).

Sekundäres und primäres Mikroplastik

Der Unterschied zwischen primärem und sekundärem Mikroplastik liegt darin, dass primäres Mikroplastik bereits in Dimensionen kleiner 5 mm hergestellt wird und sekundäres Mikroplastik erst durch Zerfalls- und Zerkleinerungsprozesse von größeren Kunststoffteilen in der Umwelt entsteht. Beispiele für primäres Mikroplastik sind z. B. Granulate in Kosmetika (Make-up, Peelings, Cremes), Industrieschleifmittel und Kunststoffgranulat,

welche auf Sportplätzen verwendet werden (Fath 2019b). Sekundäres Mikroplastik entsteht durch mechanische Fragmentierung oder Degradation (chem. Abbau) in der Umwelt, auf Deponien, durch Naturkatastrophen, durch Freisetzung von Fasern aus synthetischen Textilien und Abrieb von jeglichen Kunststoffmaterialien (z. B. Reifenabrieb). Durch Umwelteinflüsse wie Salz, Bakterien, Licht und Wärme wird das Plastik biologischen, physikalischen und chemischen Prozessen ausgesetzt und die Struktur wird angegriffen und zerfällt langsam in kleinere Fragmente (Abbildung 2) (Waldschläger 2019; Liebmann 2015).

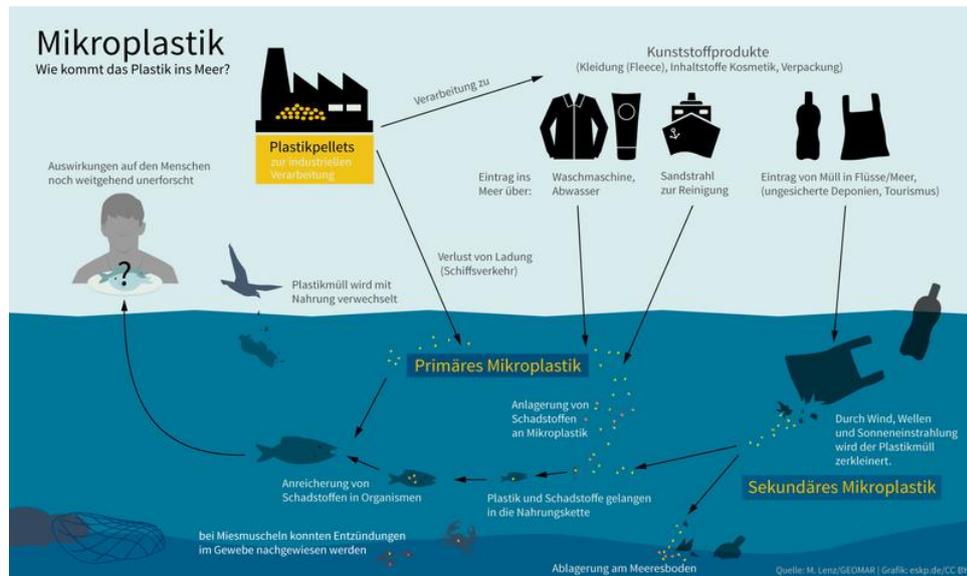


Abbildung 2: Entstehung und Freisetzung von primärem und sekundärem Mikroplastik im Ozean (Lenz o.J.).

2.1.4 Degradation von Kunststoffen

Es ist wahrscheinlich, dass der gesamte freigesetzte Kunststoff in der Umwelt immer noch als Polymer vorkommt und nur in sehr geringem Maße oder gar nicht abgebaut wurde (Andrady und Neal 2009).

Kunststoffe unterliegen verschiedenen Zerfallsprozessen, welche jedoch größtenteils keinen wirklichen biologischen Abbau darstellen. Es werden grundsätzlich Prozesse der mechanischen Fragmentierung von der Degradation (chemischer Abbau), welche unterschiedlich ausgeprägt sein können, unterschieden (Waldschläger 2019). Oftmals findet ein Zusammenwirken der verschiedenen Abbauprozesse statt, sodass das Begrenzen auf einen Prozess nicht möglich ist (Miklos et al. 2016). Des Weiteren ist für die Abbauprozesse die geografische Lage und das jeweilige vorherrschende Klima mit zu berücksichtigen (Shah et al. 2008). Die Tiefsee bietet beispielsweise durch die Kälte und Dunkelheit keine guten Bedingungen für einen Abbau (Barnes et al. 2009).

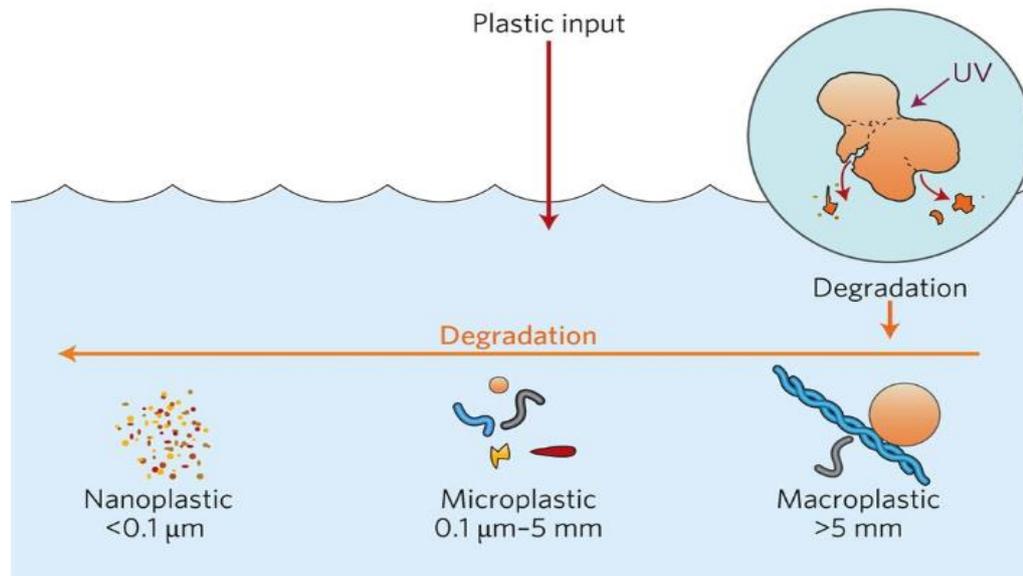


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Degradation von Makroplastik zu Nanoplastik am Beispiel der Photodegradation. (Galloway et al. 2017).

Fragmentierung bezeichnet den mechanischen Zerfall, welcher durch Wellengang, Abrieb durch Sand und Gestein verursacht wird (Fath 2019b). Die Fragmentierung, welche durch natürliche Prozesse wie z. B. Windeinwirkung oder Sonneneinstrahlung resultieren, werden als Verwitterung beschrieben (Bertling et al. 2021b). Die Degradation hingegen bezeichnet allgemein einen Zerfall- oder Abbauprozess. Sie wird allgemein auch als Alterung bezeichnet und ist verbunden mit Quellung, Versprödung, Rissbildung und dem Festigkeitsverlust von Kunststoffen (Seidel 2007). Die Degradation kann physikalisch (physikalische Degradation), biologisch (biologischer Abbau), durch UV-Einstrahlung (Photodegradation, Abbildung 3), thermo-oxidativ (thermo-oxidative Degradation), thermal (thermale Degradation) oder durch Hydrolyse erfolgen. Der biologische Abbau bezeichnet „die Umsetzung der Polymere zu Kohlendioxid, Wasser und mineralischen Salzen (Mineralisierung) sowie neuer Biomasse“ (Burgstaller et al. 2018). Dieser erfolgt durch Mikroorganismen, hauptsächlich Mikroben und stellt den einzigen wirklichen Abbau dar. Er kommt jedoch selten vor, da es nur wenige polymerabbauende Mikroben gibt (Fath 2019b). *Ideonella sakaiensis* stellt ein Polyethylenterephthalat (PET) abbauendes Bakterium dar (Alayo 2019b). Zudem gibt es weitere spezielle Pilze und Larven, die ebenfalls in der Lage sind, Kunststoffe zu verstoffwechseln. Der Abbau durch die Organismen erfolgt jedoch zu langsam, um die Kunststoffmengen in der Umwelt abzubauen zu können. Außerdem sind die Organismen auf nur wenige Kunststoffarten spezialisiert (Alayo 2019b).

Die physikalische Degradation von Kunststoffen beginnt entweder durch Aufnahme von Wasser (Quellung), Zerbrecen des Materials oder Freisetzung der Weichmacher aus

dem Kunststoff. Durch witterungsbedingtes abwechselndes Schrumpfen und Quellen entstehen Risse im Kunststoff, die zum Zerfall führen können (Alayo 2019a).

Bei ausreichend zerkleinerten Kunststoffpartikeln können anschließend die anderen genannten chemischen Degradationsprozesse stattfinden. Allgemein erfolgt beim chemischen Zerfall ein Zerbrechen der Molekülketten der Polymere. Die Degradation geschieht teilweise auch durch Depolymerisation, bei der durch chemische Prozesse einzelne Molekülkette in Einzelbausteine zerlegt und anschließend wieder zusammengesetzt werden. Die chemische Degradation geht immer mit einer Änderung der physikalischen Eigenschaften einher (z. B. Zug- und Biegefestigkeit, Bruchdehnung oder Schlagzähigkeit⁴) (Alayo 2019a).

Bei der Photodegradation, welche den schnellsten Zerfallsprozess darstellt, wird der Abbau durch Sonneneinstrahlung, besonders UV-B-Strahlung, ausgelöst.

Bei der thermo-oxidativen Degradation vollzieht sich ein langsamer oxidativer Abbau bei mäßiger Temperatur. Dies geschieht vor allem in Gewässern.

Bei der thermalen Degradation wird der Zerfallsprozess durch eine Reaktion bei hohen Temperaturen eingeleitet. Dieser stellt keinen in der Natur üblicherweise vorkommender Prozess dar.

Die Hydrolyse stellt einen weiteren Zerfallsprozess dar. Hierbei reagiert das Wasser mit dem Kunststoff, energiereichere UV-Strahlung führt dabei zum Aufbrechen von kovalenten Bindungen, welche pH-Wert-abhängig im Laufe der Zeit in Fragmente hydrolysiert werden. Letztere besitzt nur einen geringen Einfluss, weshalb diese nicht von großer Relevanz in der Umwelt ist (Waldschläger 2019; Fath 2019b).

2.1.5 Migrationspfade und Transport von Kunststoffen und Mikroplastik

In Abbildung 4 dargestellt, gelangt Mikroplastik sowohl punktuell als auch diffus in die Umwelt (Waldschläger 2019). Abbildung 4 fokussiert sich auf die aquatische Umwelt, da diese bezüglich Eintrag und Transport bisher am besten erforscht wurde (Miklos et al. 2016). Es ist von folgenden Eintragspfade in die Umwelt auszugehen: 1) Windverwehungen und Niederschlag, 2) Oberflächenabfluss, 3) Abwasser, 4) Klärschlamm. Durch die Eintragspfade 1 bis 4 kann Mikroplastik in die Binnengewässer eingetragen werden und von dort durch den weiteren Transport in die Ozeane gelangen. Sie werden somit als indirekte Pfade bezeichnet. Direkte Eintragspfade in den Ozean erfolgen durch 5)

⁴ Maß für die Absorptionsfähigkeit eines Stoffes von Stoß- und Schlagenergie, ohne zu brechen. Wolf 1961.

Umweltverschmutzung bzw. menschliches Einwirken (z. B. Littering⁵) und ebenfalls durch 6) Windverwehung und Niederschlag. Letzterer stellt als direkter und indirekter Pfad den Haupteintrag in das aquatische System dar (Waldschläger 2019).

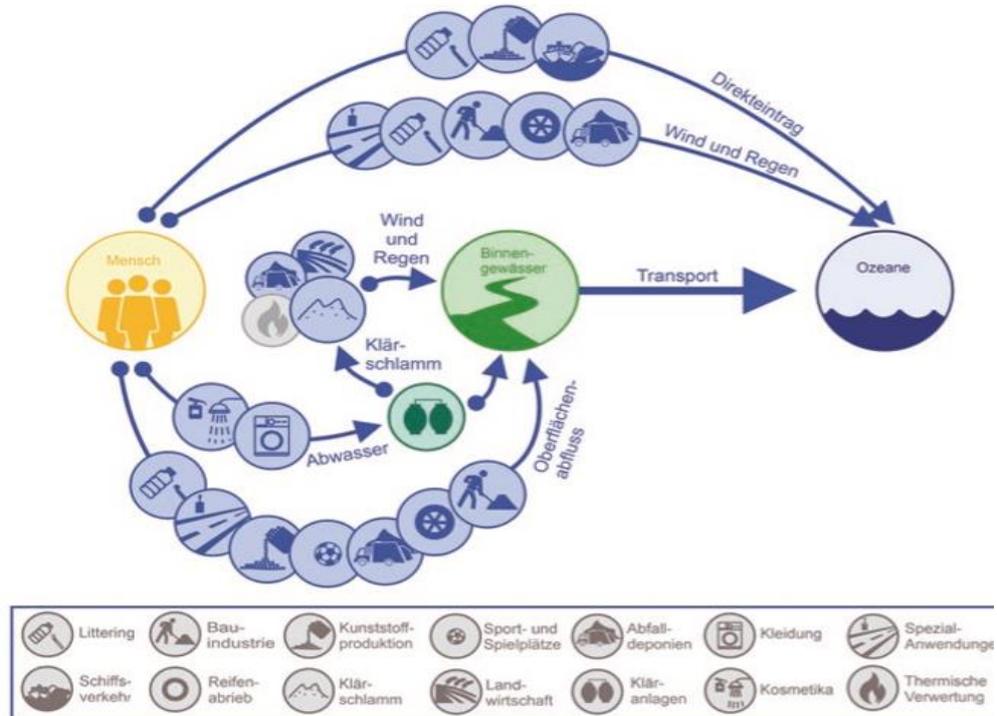


Abbildung 4: Eintragspfade und Quellen von Mikroplastik in die Umwelt (Waldschläger 2019).

2.1.6 Quellen der Eintragspfade von Kunststoffen und Mikroplastik

Als Quellen werden Orte, Produkte und Industrien bezeichnet, aus welchen Mikroplastik emittiert wird (Waldschläger 2019).

Über den Abwasserpfad können Kunststoffpartikel in die Kläranlage gelangen. Dieses geschieht z. B. durch Kunststoffgranulate in Duschgel/Shampoo oder durch das Waschen von synthetischer Kleidung, wodurch Kunststofffasern freigesetzt werden (Waldschläger 2019). Nach wissenschaftlicher Erkenntnis entfernen Kläranlagen Mikroplastik zu einem Großanteil aus dem Wasser. Es konnte z. B. ein Rückhalt von etwa 99 % der Kunststoffpartikel > 300 µm in einem schwedischen Klärwerk nachgewiesen werden (Magnusson und Norén 2014).

Kunststoffpartikel und -fasern akkumulieren in der Kläranlage v. a. im Klärschlamm, sodass durch landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes erneut Mikroplastik

⁵ Littering bezeichnet das Verschmutzen von Flächen und Räumen durch die unsachgemäße Entsorgung von Müll, Waldschläger 2019

freigesetzt werden kann. Die landwirtschaftliche Aufbringung oder bauliche Nutzung von Klärschlamm spielt in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Der Großteil des Klärschlammes wird heute in Deutschland thermisch verwertet und die Asche deponiert (Naumann 2020; Waldschläger 2019).

Lediglich durch die Verbrennung des Klärschlammes werden die Kunststoffpartikeln vollständig aus dem System entfernt (Liebmann 2015). Der Klärschlamm beinhaltet laut einer Veröffentlichung zwischen 1.000 (Zubris und Richards 2005) und über 20.000 Kunststoffobjekte/kg Trockenmasse (Mintenig 2014). Die restlichen Partikel im behandelten Abwasser, welche sich nicht im Klärschlamm abgelagert haben, werden direkt nach Klärung des Wassers den Vorflutern und somit den Binnengewässern zugeführt. Die Oberflächengewässer transportieren die Partikel schließlich in die Ozeane (Waldschläger 2019).

Auch auf Äckern kann Mikroplastik durch Littering, Klärschlammdüngung oder den Einsatz von Kunststofffolien gelangen und sich durch Sickerwasser und Erosion (Wind und Regen) weiter in der Umwelt verteilen. Ein großer Anteil des Mikroplastiks verbleibt jedoch im Boden mit noch unbekanntem Folgen (Waldschläger 2019).

Über Notüberläufe der Kanalisation (Mischwasserentlastungen) und durch unbehandeltes Wasser aus der Trennkanalisation kann kunststoffhaltiges, unbehandeltes Abwasser ungehindert in Flüsse gelangen, bevor es die Kläranlage erreicht. Aber auch aus Gartenbau, Teich- u. Forstwirtschaft, Fischerei und Jagdwesen werden Kunststoffe in die Umwelt freigesetzt (Miklos et al. 2016).

Ein direkter Eintrag von Kunststoffen und Mikroplastik in Oberflächengewässer wird durch Littering verursacht. Unter Littering wird das bewusste Verschmutzen von Flächen und der Umwelt durch unsachgemäße Entsorgung von Abfall bezeichnet. Weitere Direktintragspfade für Kunststoffe sind Windverwehungen (Verbreitung über Luft) und Niederschläge. Auf diese Weise gelangen durch Wind- und Regeneinfluss z. B. Kunststoffabfälle von Deponien ins Meer (Waldschläger 2019).

Auch durch den Oberflächenabfluss gelangen Kunststoffe in die Umwelt. Mikroplastik kann über den Oberflächenabfluss in die Binnengewässer transportiert werden und so bis in marine Systeme gelangen. Ein Beispiel hierfür ist Reifenabrieb aus dem Straßenverkehr, mengenmäßig eine der größten Quellen für Mikroplastik. Der globale Durchschnittswert für Reifenabrieb pro Person und Jahr beträgt 0,81 kg (Kole et al. 2017). Der Feinstaub, welcher ebenfalls beim Abrieb entsteht, gelangt in die Atmosphäre und kann sich somit weiter verteilen (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) o.J.b). Auch von Sportplätzen, hauptsächlich Kunstrasenplätze, gelangt Mikroplastik in

Form von Kunststoffgranulat und Kunststofffasern in die Umwelt. Laut einer Studie des Fraunhofer UMSICHT stellt Reifenabrieb die größte und Kunststoffgranulat von Sportplätzen die fünftgrößte Eintragsquelle von Mikroplastik dar (Bertling et al. 2018; Waldschläger 2019).

Einen weiteren Kunststoffeintragspfad stellen Bau- und Spezialanwendungen dar. Überall wo Kunststoffe als Baustoff eingesetzt werden, z. B. im Bausektor, können diese durch Verwitterung, Abbruch oder Littering in die Umwelt gelangen (Waldschläger 2019).

Bei Tankern wird ein Kunststoff-Strahlmittel zum Entlacken verwendet, sodass auf diese Weise Kunststoffpartikel freigesetzt werden. Außerdem stellt der Abrieb von Straßenmarkierungen und Gebäudefassaden ebenfalls ein Eintragspfad dar (Waldschläger 2019).

2.1.7 Verbleib und Senken

Obwohl bereits die Eintragsquellen von Mikroplastik in die Umwelt gut erforscht sind, gilt dies nicht im gleichen Maß für die Senken. Die vielen Variationsformen der Kunststoffe erschweren es, genauere Aussagen über den Verbleib zu tätigen (Waldschläger 2019; Thompson et al. 2009).

Der Verbleib und Anreicherung von Kunststoffen an bestimmten Orten in der Umwelt werden als Senke bezeichnet. Die Kunststoffpartikel können dort nur zeitweise vorkommen (temporäre Senke) und wieder remobilisiert werden oder die Partikel verbleiben an diesem Ort permanent (permanente Senke) (Waldschläger 2019). In Abbildung 5 sind die Senken von Mikroplastik in der Umwelt dargestellt.

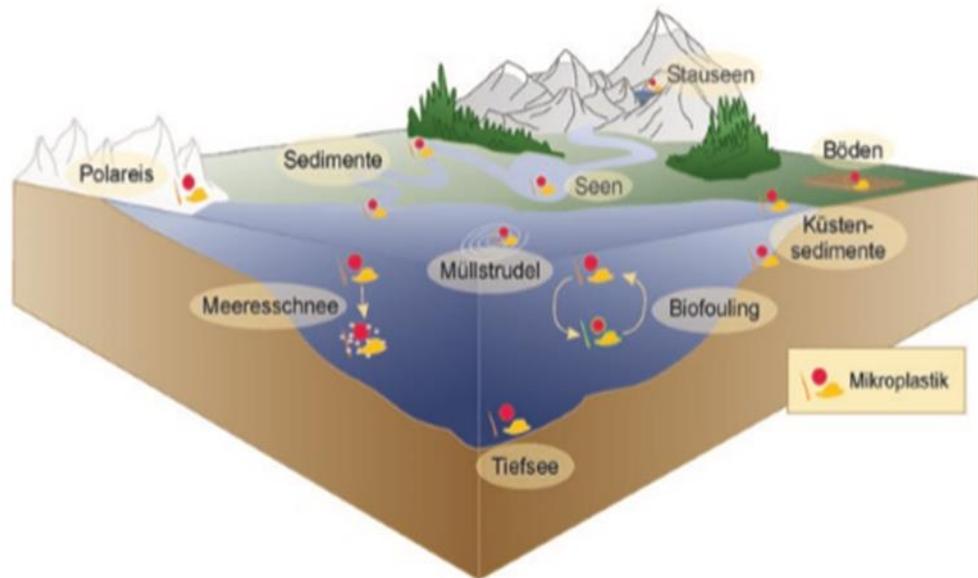


Abbildung 5: Mikroplastik Senken in ökologischen Systemen (Waldschläger 2019).

Aquatische Systeme

Marine Systeme

Eriksen et al. 2014 gehen davon aus, dass über 5 Mrd. Plastikpartikel an der Wasseroberfläche der Meere und Ozeane schwimmen und über 90 % dieser Partikel aus sekundärem Mikroplastik bestehen. Durch die unterschiedliche Dichten der Kunststoffe, 0,8 bis 2,2 g/cm³, befindet sich Mikroplastik (MP) entweder an der Wasseroberfläche (< 1 g/cm³) oder am Meeresboden (> 1 g/cm³) (Liebmann und Sexlinger 2020; Schwarz et al. 1987). Die Größe und Form der MP-Teilchen, ebenso wie Umwelteinflüsse (Strömung, Wellen, Wind, Bewuchs der Partikel mit Pflanzen und Algen („Biofouling“)) beeinflussen die Verteilung des MP im aquatischen System (Liebmann und Sexlinger 2020).

Müllstrudel sind temporäre Senken, hauptsächlich in marinen Gewässern, welche durch die Corioliskraft und die Ekman-Zirkulation entstehen. Der größte Müllstrudel ist der Great Pacific Garbage Patch (GPGP) im pazifischen Ozean. Er wurde 1997 von Kapitän Charles Moore entdeckt und weist keine festen Ränder auf. Er umfasst etwa das 42-fache der Fläche von Deutschland. Die Kunststoffe treiben in diesen Strudeln so lange umher, bis es entweder auf den Meeresgrund absinkt oder in kleinere Partikel zerfällt (Waldschläger 2019).

Eine weitere mögliche Senke im Ozean ist das Phänomen des „Partikelregens“, der sogenannte „Meerschnee“ (Marine Snow): Wenn Tiere ihre Nahrung und den aufgenommenen Kunststoff ausscheiden, besteht die Möglichkeit, dass dieses mit dem

Meeresschnee zum Gewässerboden absinkt. Der Meeresschnee setzt sich zusammen aus den Ausscheidungen von Krill (Gruppe des Zooplanktons) in Verbindung mit abgestorbenen Algen, Mikroben sowie organischen und anorganischen Partikeln und bildet einen permanenten, abwärts gerichteten Partikelstrom im Ozean (Porter et al. 2018; Kvale et al. 2020). Meerschnee dient Bakterien als Nahrungsquelle und somit kann der Kunststoff nach Befreiung aller organischen und anorganischen Rückstände je nach Dichte wieder an die Oberfläche aufsteigen oder verweilt in der Tiefe. Der Meerschnee spielt in Bezug auf die globale Mikroplastikverteilung somit eine bedeutende Rolle (Kvale et al. 2020).

Das arktische Eis stellt ebenfalls eine temporäre Senke dar, da sich die Mikroplastikpartikel über die Wintermonate im Eis festsetzen, aber durch die Eisschmelze jederzeit wieder freigesetzt werden können (Waldschläger 2019). Nach Angaben des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) sind die Verschmutzungen auf lokale Quellen zurückzuführen: „Die Untersuchungen verdeutlichten, dass die jeweilige Region, in der das Meereis gebildet wurde, sowie auch die Wassermassen, in denen die Eisschollen durch die Arktis trieben und weiterwuchsen, einen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung und die Schichtung der im Eis eingeschlossenen Kunststoffpartikel hatten.“ (Bundesministerium für Umwelt, natur, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2018)

Limnische Systeme

Limnische Systeme wie Fließgewässer, Standgewässer und die limnischen Sedimente sind teilweise temporäre Senken für Kunststoffe und Mikroplastik. In Standgewässern sind oftmals Bereiche mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen, so dass die Kunststoffpartikel in Abhängigkeit von ihrer Dichte und Partikelgröße auf den Gewässerboden absinken können (Sedimentation, Biofouling). Dort werden sie entweder von Sedimenten überlagert oder durch starke Durchflüsse, aufgrund von z. B. Niederschlagsereignissen, remobilisiert (Waldschläger 2019). Stauseen bieten den Kunststoffpartikeln eine lange Verweilzeit, da sie oftmals sehr strömungsarm und ruhig sind und die Partikel gut sedimentieren können.

Aufgrund von Hochwasserereignissen kann Mikroplastik sich in den Fluss- und Auen-sedimenten ablagern und in marine Systemen in Strandsedimenten (Waldschläger 2019).

Biofouling

Als „Biofouling“ wird der Bewuchs von Mikroplastik mit Algen und Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) bezeichnet, der die Ursache für das Absinken von MP-Partikel geringerer

Dichte auf den Meeres- oder Gewässergrund darstellt. Es kommt zu einer Dichterhöhung, wodurch eigentlich an der Wasseroberfläche schwimmende Kunststoffe absinken (Fath 2019a; Waldschläger 2019). Lediglich durch Meeresströmungen können diese Partikel wieder Richtung Wasseroberfläche mobilisiert werden. Jedoch ist das durch Biofouling veränderte Partikelverhalten sehr dynamisch, denn sobald die Organismen im tiefen Gewässer nicht mehr das notwendige Licht erhalten und absterben, können die Kunststoffpartikel wieder aufsteigen und der Prozess beginnt von vorn (Waldschläger 2019; Kooi et al. 2017). Durch längere Verweilzeiten in Gewässern und die hydrophobe Oberfläche der Partikel kann der Prozess des Biofouling verstärkt werden (Zettler et al. 2013).

Terrestrische Systeme

Eine weitere Senke für Kunststoffe stellen Böden dar. Kole et al. 2017 nennen Böden als größte Senke für Mikroplastik. Verwehungen und Reifenabrieb stellen hier die größten Eintragsquellen dar (Kole et al. 2017). Hinzu kommt, dass aufgrund der Bewirtschaftung von Feldern Klärschlamm, Kunststofffolien, umhüllte Düngemittel, Gärreste und Komposte aufgetragen werden und ein gewisser Anteil an Kunststoffen auf und in den Boden gelangt, welcher Studien zufolge bis zu 15 Jahre nach Auftrag noch nachweisbar ist (Zubris und Richards 2005; NABU-Bundesverband 2021; Bertling et al. 2021c). Die Eindringtiefe der Partikel in die Bodenmatrix hängt von der jeweils vorliegenden Bodencharakteristik ab. Aufgrund der Filtereigenschaft des Bodens kann eine Partikelverlagerung stattfinden. Bei schluffigen⁶ Böden beispielsweise wurde eine Verlagerung bis zu 1 m Tiefe und bei kiesigen Substraten bis zu 3 m Tiefe detektiert (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2019b). Sekundäre Kunststoff-einträge gelangen durch Auswaschungen aus der Atmosphäre durch Niederschlag und durch Verwehungen aus anthropogener Umgebung in den Boden (NABU-Bundesverband 2021; Allen et al. 2019).

Luft

Besonders Feinstaub⁷, als Teil des Schwebstaubs⁸, aus Mikroplastik (z. B. Reifen- und Bremsenabrieb) können in den Pfad der Luft gelangen und sich somit über Wind- und Niederschlagseinwirkung weiterverbreiten. Die nachgewiesenen MP-Partikel in

⁶ Mineralische Teilchen im Boden, Korngrößenfraktion: 0,063 mm – 0,002 mm, Mölter 2010.

⁷ Alle Staubpartikel mit Durchmesser < 10 Mikrometer, Umweltbundesamt 2018.

⁸ „Teilchen in der Luft, die nicht sofort zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen.“, Umweltbundesamt 2018.

abgeschiedenen Naturräumen der Erde, wie der Arktis, Mangrovenwäldern und den Alpen, bestätigen die Verbreitung über die Luft (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2019b; Alfred-Wegener-Institut 2021; Miklos et al. 2016).

Abschließend ist zu sagen, dass die Kompartimente Boden, Luft und Wasser ständig miteinander in Wechselwirkung stehen und somit auch die Quellen, Transportpfade und Senken von Mikroplastik (Verweis Anhang 2) (Waldschläger 2019; Miklos et al. 2016).

2.1.8 Mikroplastik adsorbierbarer Schadstoff/Ökotoxikologie

Die ökotoxikologischen Auswirkungen auf Organismen werden durch physische und chemische Effekte von (Mikro-)Plastik verursacht (Abbildung 6). Im Folgenden werden die Effekte genauer erläutert.

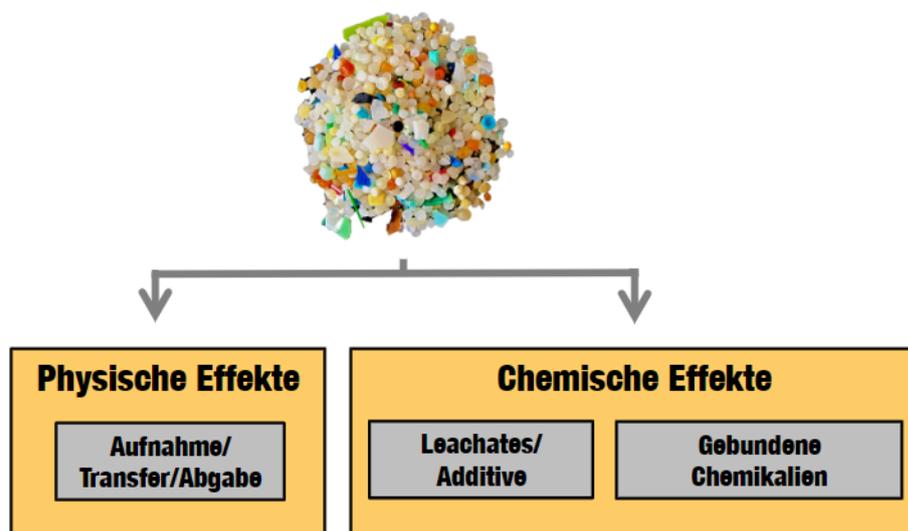


Abbildung 6: Darstellung Ökotoxikologie, physische und chemische Effekte von Mikroplastik. (Hägerbäumer 2018).

Physische Effekte

Größere Kunststoffteile (Makroplastik) wirken äußerlich auf die Organismen ein (z. B. Verfangen von Meeresbewohnern in treibenden Fischernetzen). Kunststoffpartikel bis runter in den Nanobereich können über die Nahrung direkt (Ingestion) oder in Folge der Nahrungskette (trophischer Transfer, indirekt) vom Organismus aufgenommen (und weitergegeben) und so physische Effekte wie Sättigungsgefühl, Verstopfung, Einlagerung in Gewebe (Bsp.: Miesmuschel, (Wright et al. 2013)) und eine pathologische Veränderung der Organe auslösen (Waldschläger 2019; Hägerbäumer 2018). Auch die Aufnahme- und Ausscheidefähigkeit von 1 µm-Kunststoffpartikeln wurde im Rahmen einer Studie an Daphnien (*Daphnia sp.*) und Pantoffeltierchen (*Paramecium sp.*) nachgewiesen. Die zitierten Studien zeigen, dass MP über verschiedene Ebenen der

Nahrungspyramide gelangt. Die Konsequenzen für das Ökosystem Meer sind bei den Kunststoffmengen noch nicht abschätzbar (Holm et al. 2013). In derselben Studie wurde ebenfalls die Akkumulierung von PE⁹-Partikel in Miesmuscheln (*Mytilus edulis L.*) untersucht. Es konnte durch die MP-Aufnahme eine krankhafte Veränderungen in den Zellen der Mitteldarmdrüsen bestätigt werden (Holm et al. 2013). Eine weitere Studie konnte den trophischen Transfer von Mikroplastikpartikeln von Muscheln (*Mytilus edulis L.*) auf Krebse (*Carcinus maenas L.*) nachweisen (Farrell und Nelson 2013). Es konnte ebenfalls eine Translokation der MP-Partikel in andere Gewebe der Krabbe festgestellt werden. Die Studie verstärkt die Besorgnis über das Potenzial von MP sich in höheren trophischen Ebenen anzureichern und über die Akkumulation von Umweltschadstoffen für die Gesundheit von Tier und Mensch (Farrell und Nelson 2013).

Es kann nicht verallgemeinert werden, wie sich ein Mikroplastikpartikel in einem Organismus verhält, denn dieses ist je nach Größe des Partikels verschieden. Werden beispielsweise 5 µm Partikel über die Nahrung aufgenommen, so ist ein Ausscheiden dieser sehr wahrscheinlich. „Die kritische Partikelgröße für die Durchgängigkeit von Organen und Zellwänden liegt unter 1 µm“, im Nanometer-Bereich (Liebmann 2015).

Chemische Effekte

Kunststoffe bzw. Mikroplastik sind biochemisch inert (Liebmann 2015), jedoch können sie chemische Effekte in Organismen auslösen, da an der lipophilen Oberfläche sowohl verschiedenen Schwermetalle als auch diverse hydrophobe organische Schadstoffe (z. B. POP, PAK, PCB) gut adsorbieren können (Andrady 2011; Science for Environment Policy 2011). Es kommt zu einer Schadstoffanreicherung an den Mikroplastikpartikeln (Andrady 2011). Die Schadstoffgehalte an den Partikeln sind hierbei bis zu eine Million Mal höher als im umgebenden Medium. Mikroplastik selbst ist nicht toxisch für Organismen. Problematisch ist ebenfalls, dass (Mikro-)Plastik ein Transport- und Übertragungsmedium von Schadstoffen ist. Adsorbierbare Schadstoffe und Metalle werden über die Ingestion von Kunststoffen in aquatischen Lebewesen entlang der Nahrungskette (Bioakkumulation) angereichert (Wright et al. 2013). Die genannten Schadstoffe können beispielsweise bei der Nahrungsaufnahme eines Tieres in das Fettgewebe eingelagert werden (Waldschläger 2019).

In (Mikro-)Plastik sind Additive (z. B. Phthalate, Bisphenol A) verarbeitet, welche sich im Laufe der Zeit aus der Kunststoffmatrix herauslösen können (Leaching¹⁰) und in der

⁹ Polyethylen (PE)

¹⁰ „Auslaugung oder Auslösung von Additiven aus der polymeren Matrix“, Bertling et al. 2021b.

aquatischen Umwelt für Organismen als endokriner Disruptor wirken und somit eine hormonähnliche Wirkung auf die Organismen haben. Es kann z. B. zu einer Verweiblichung oder Vermännlichung von bestimmten Arten kommen (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) o.J.a).

Oft kommt es bei Organismen auch zu einer sogenannten Kombinationswirkung von Schadstoffen aus verschiedenen Pfaden. Die Organismen sind sowohl dem mit Schadstoffen belastetem Wasser, den angelagerten Schadstoffen am Mikroplastik, potenziell schädlichen Additiven in den Kunststoffen und auch Schadstoffakkumulationen entlang der Nahrungskette ausgesetzt (Koelmans et al. 2017). Das Mikroplastik gelangt über die Nahrungskette (trophischer Transfer) auch zum Menschen. Dies wurde durch van Cauwenberghe et al. 2015 am Beispiel von Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) nachgewiesen. Es wurden ebenfalls Kunststofffasern von Mikroplastik im Trinkwasser (Mason et al. 2018) als auch in der Außen- und Innenraumluft nachgewiesen (Dris et al. 2017).

Abschließend lässt sich sagen, dass eine Risikobeurteilung von Mikroplastik aufgrund der Diversität von Kunststoffen (Größe, Form, Material, Additive, etc.) und der sich im Laufe der Zeit ändernden Eigenschaften von Mikroplastik (Degradation, Fragmentierung und Biofouling) schwierig ist und sich keine allgemeinen Aussagen ableiten lassen. Hinzu kommt, dass die ökologischen Folgen und Wirkungen und Langlebigkeit von Mikroplastik noch unzureichend erforscht sind. Zudem sind die Auswirkungen der an Mikroplastik adsorbierten Schadstoffe sehr unterschiedlich sind und es ebenfalls noch keine adäquate Methode, zur Erfassung der Verteilung von Makro- und Mikroplastik in Gewässern gibt (Koelmans et al. 2017; Waldschläger 2019; Thompson et al. 2009).

2.2 Kunstrasensysteme

2.2.1 Geschichte und Entwicklung

Seit den 1960er Jahren unterliegen Kunstrasensystemen verschiedenen Entwicklungsphasen und können in vier Generationen eingeteilt werden (Abbildung 7). Ein Entwicklungsende ist bisher noch nicht abzusehen. Die erste Entwicklungsphase (1. Generation) beschreibt einen dichten und unverfüllten Vollgarn-Kunstrasen, einen sogenannten „Kunstrasenteppich“, welcher erstmalig in den 60er Jahren verwendet wurde. Zwischen den einzelnen Halmen befindet sich keine Füllung. Es ist ein harter Boden mit erhöhtem Verletzungsrisiko. In der darauffolgenden 2. Generation von 1970-1980 wurde der Kunstrasen erstmalig sandverfüllt, welches zu einer besseren Rutscheigenschaft als auf den Plätzen der 1. Generation beitrug. Die Dämpfung des Platzes war jedoch nicht

optimal und auch die Platzpflege war sehr intensiv, da Verunreinigungen (z. B. Laub) in regelmäßigen Abständen vom Sand abgetragen werden müssten. Im Anschluss daran wurden ab den 90er Jahren Kunstrasensysteme der 3. Generation entwickelt, in denen zusätzlich zum Sand noch Kunststoff-Infill verfüllt wurde, um die Dämpfung des Platzes zu verbessern. Die Plätze der 3. Generation wurden erstmalig von UEFA und FIFA zertifiziert, da sie sich als wettkampftauglich erwiesen haben und die geforderten ähnlichen internationalen optischen und qualitativen Standards (UEFA 2018) erfüllen konnten. Diese Generation bietet durch die elastische Dämpfung eine hohe Belastbarkeit und ein gutes Spielgefühl. Die Flächen sind zusätzlich strapazierfähiger und pflegeleichter. Seit 2010 wird bei den Kunstrasenplätzen der 3. Generation der Fokus, aufgrund ökologischer Aspekte, auf den Einsatz von alternativem Infill gelegt. Als Infill wird meist ein umweltfreundlicheres Material als Kunststoffersatz, wie z. B. Kork eingesetzt. Die aktuelle 4. Generation, seit 2020, bildet den Naturrasen weitgehend nach (GreenFields o. J.). Der Fokus liegt hierbei darauf, die Spieleigenschaften eines Naturrasenplatzes bestmöglich nachzustellen (Bürger 2019). Hierfür wurden Kunstrasenfasern verschiedener Stärke, Texturen und Größe miteinander kombiniert, sodass diese sich gegenseitig stabilisieren. Eine Performance-Infill Verfüllung des Kunstrasenteppichs der 4. Generation ist i. d. R. nicht notwendig (Hermann Kutter GmbH & Co. KG 2018). Die Haltbarkeit des Kunstrasensystems soll im Vergleich zu anderen Systemen gesteigert werden. Zudem soll kein zusätzliches Mikroplastik oder andere schädlichen Substanzen verwendet werden und das Recycling durch ein „one step recycling“ vereinfacht werden (GreenFields o. J.). Das Verletzungsrisiko auf den Kunstrasenplätzen in der 4. Generation kann im Vergleich zu den anderen Generationen als gering eingestuft werden (Bürger 2019). Für den Bau eines Großspielfeld mit 105 m x 68 m, dem Regelmaß nach Vorgaben der FIFA und UEFA (Müller 2019a), lassen sich Kosten von 450.000 Euro bis 800.000 Euro kalkulieren (Sportstättenrechner o. J.c).

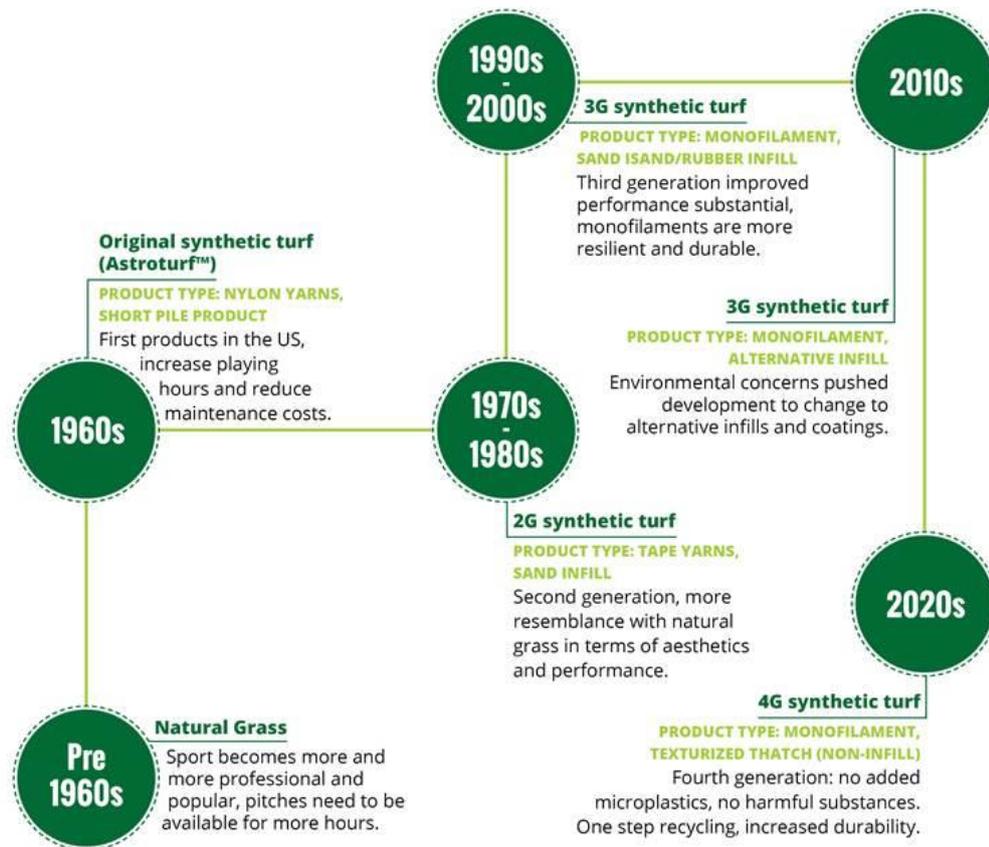


Abbildung 7: Entwicklung der Kunstrasenplätze im zeitlichen Verlauf (GreenFields o. J.).

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Entwicklung der Kunstrasenplätze (KRP) weit vorangeschritten ist und weiter voranschreitet, um sich den Eigenschaften und Spielbedingungen des Naturrasens anzunähern. Im Laufe der Kunstrasenplatz-Generationen konnte das Verletzungsrisiko immer weiter reduziert werden durch verbesserte Dämpfung und Rutscheigenschaften des Platzes. Die Wahl eines geeigneten Rasensystems lässt sich nicht pauschal beantworten und hängt von den individuellen örtlichen Gegebenheiten und auch der gewünschten Nutzungsintensität ab (Helmut Haas GmbH 2015).

2.2.2 Vor- und Nachteile der Systeme

Naturrasen

Naturrasen stellt aufgrund seiner optimalen Spieleigenschaften (Kraftabbau, Scherfestigkeit und Gleitfähigkeit) und der kostengünstigen Anschaffung bis heute die häufigste und beliebteste Form eines Sportplatzes dar (Helmut Haas GmbH 2015). Deutschlandweit gibt es laut dem DFB etwa 3.000 bis 5.000 KRPs und ca. 30.000 Naturrasenplätze (Fußballtraining.de 2017). Der Naturrasen bietet durch die Verdunstung auf der Rasenfläche einen kühlenden Effekt, während der Kunstrasenplatz die Wärme an das

Spielfeld zurückgibt. Außerdem adsorbiert das Gras Schadstoffe, bindet Staub und reduziert die natürliche Bodenerosion und somit auch den Eintrag von Schadstoffen in Gewässer und das Grundwasser. Besonders bei nitratreichen Böden kann durch ein dichtes Wurzelwerk Nitrat in großen Mengen aufgenommen werden, sodass das Grundwasser geschützt wird. Bei der Gewährleistung dieser genannten natürlichen Bodenfunktionen kann der Kunstrasen im Vergleich nicht mithalten (Helmut Haas GmbH 2015). Ein großer Nachteil des Naturrasens ist jedoch, dass er unter den Rasensystemen den kostenintensivsten darstellt, da er witterungsunbeständig ist und eine finanziell und zeitlich intensivere Pflege benötigt als Kunstrasenplätze. Wenn die Fläche optimal gepflegt wird und in regelmäßigen Abständen durch Nachsaat verjüngt wird, kann der Naturrasen über lange Zeit eine gute Platzqualität bereitstellen (Helmut Haas GmbH 2015) (Janczura 2019; Richter Sportstättenkonzepte GmbH 2019). Dennoch sind Naturplätze in ihrer Belastung begrenzt und max. auf eine Nutzung von 800 Stunden jährlich ausgelegt. Die Baukosten eines Naturrasens betragen zwischen 200.000 und 250.000 Euro, wobei für die jährliche Pflege des Platzes 25.000 bis 35.000 Euro hinzukommen. Die Baukosten sind im Vergleich zu anderen Rasensystemen beim Naturrasen am geringsten (Bertling et al. 2021a).

Kunstrasenplätze

Bei Kunstrasenplätzen müssen zunächst höhere Anschaffungskosten einkalkuliert werden. Die Unterhaltungs- und Pflegekosten (Betriebskosten) sind im Vergleich zum Naturrasenplatz jedoch deutlich geringer (Helmut Haas GmbH 2015). „Bei der Befragung der Verantwortlichen für die Platzpflege wurde der Pflegeaufwand eines Kunstrasenplatzes mit »niedrig« bis »gleichwertig im Vergleich zum Naturrasenplatz« angegeben.“ (Bertling et al. 2021a). Folgende Pflegeschritte, wie z. B. das Bewässern, Mähen, vertikutieren und die Nachsaat können eingespart werden. Dennoch ist auch hier eine regelmäßige Pflege des Platzes in Form von Granulatauffüllung, Nachbesandung, Granulatreinigung und -lockerung und eine Flächenräumung durchzuführen (Helmut Haas GmbH 2015). Jährlich lassen sich etwa 10.000 Euro (Janczura 2019) bis 24.000 Euro (Bertling et al. 2021a) Pflegekosten einkalkulieren (Anhang 1).

Die Kunstrasenfläche ist ebener, witterungsbeständig und bietet daher ganzjährige Bespielbarkeit, besonders auch in der Wintersaison, und besitzt eine theoretische Lebensdauer von 12 bis 15 Jahren. Danach ist dieser abgespielt und muss ausgetauscht werden. Zudem ist ein Kunstrasenplatz auf eine höhere Nutzungsintensität von etwa jährlich 2.000 Stunden ausgelegt (Sportstättenrechner 2021a; Richter Sportstättenkonzepte GmbH 2019). „Ein Kunstrasenplatz kann damit um den Faktor 2 bis 3 häufiger bespielt

werden als ein Naturrasenplatz“ (Bertling et al. 2021a). Es besteht hier die Möglichkeit auf eine multifunktionale Nutzung, sodass weitere Sportarten wie z. B. Hockey und American Football (nur bei unverfüllten Systemen geeignet) ebenfalls auf KRPs stattfinden können (Sportstättenrechner 2021a; Richter Sportstättenkonzepte GmbH 2019).

Hybridrasen

Der Hybridrasen versucht die Robustheit eines Kunstrasenplatzes mit den optimalen Bodeneigenschaften eines Naturrasens zu vereinen. Hierbei werden Natur- und Kunstrasenfasern kombiniert. Jedoch ist die Robustheit dadurch begrenzt, dass sich bei häufigem Spielbetrieb Krater und weitere Unebenheiten ausbilden können (Bürger 2019).

Hybridplätze stellen neben dem echten Naturrasen umweltfreundliche Alternativen dar. (Janczura 2019). Die Baukosten eines solchen Platzes betragen 400.000 bis 450.000 Euro. Nicht zu vernachlässigen ist, dass Hybridplätze mit bis zu 400.000 Euro sehr hohe Entsorgungskosten verursachen. Bei neuen zunächst kostenintensiveren, kompostierbaren Modellen können die Entsorgungskosten auf 40.000 Euro reduziert werden (Anhang 1) (Bertling et al. 2021a).

Ökobilanz

Der Naturrasen bietet als biologische Variante durch die Gewährung der natürlichen Bodenfunktionen einen besonderen Vorteil im Vergleich zu anderen Kunstrasensystemen. Aus ökologischer Sicht ist es sinnvoll, den Naturrasenplatz einem Kunstrasenplatz vorzuziehen, sofern eine jährliche Nutzungsdauer von 800 Stunden nicht überstiegen wird. Bei starkem Spielbetrieb mit einer höheren Nutzungstundenzahl wären dann entweder ein zweiter Naturrasenplatz oder ein Kunstrasenplatz erforderlich. Die Ökobilanz eines Kunststoffrasensystems kann durch die Wahl eines nachhaltigen, umweltfreundlichen Infills (z. B. Kork), durch die Infillmenge und durch die Platzbauweise verbessert werden. Beim Kunstrasenplatz ist es sinnvoll, das Recycling des Kunstrasens schon bei der Planung des Platzes zu berücksichtigen (Richter Sportstättenkonzepte GmbH 2019).

Für Kork als alternatives Kunstrasenplatz-Infill lässt sich eine Ökobilanzierung durchführen. Der CO_2 -¹¹Fußabdruck von KRPs liegt allgemein zwischen 9,4 bis 29,8 kg/Kohlenstoffdioxidäquivalenten pro Nutzungstunde und unterscheidet sich nach Kunstrasentyp. Auch die Infillart spielt eine entscheidende Rolle: unverfüllte Plätze oder mit Sand- und Kork-Infill verfüllte, weisen aufgrund des natürlichen Infills einen geringeren CO_2 -Fußabdruck als andere Füllmaterialien auf. Ausgehend vom Kunststoff-Infill weist das SBR-

¹¹ Kohlenstoffdioxid

Granulat den geringsten und TPE-Granulate den höchsten CO_2 -Fußabdruck auf. Auch sollten die freigesetzten Treibhausgase für die Entsorgung des Infills mit einbezogen werden, diese sind für SBR¹², EPDM¹³ und TPE¹⁴ entscheidend und deutlich höher als bei biogenen Materialien wie z. B. Kork. Ebenso ein hochwertiges Recycling der einzelnen Komponenten und eine längere Nutzungsdauer von Infillmaterial und Dämpfungsmaterial sollte berücksichtigt werden, um den CO_2 -Fußabdruck bedeutend herabzusetzen. Des Weiteren spielt die Nutzungsintensität der KRPs bei der Reduktion des CO_2 -Fußabdrucks eine entscheidende Rolle. Sie ist allgemein umgekehrt proportional zu den Treibhausgasemissionen, was bedeutet, dass mit steigender Nutzungsintensität der Plätze der CO_2 -Fußabdruck abnimmt (Bertling et al. 2021a). Beim Bau von Kunstrasenplätzen sollte darauf geachtet werden, dass diese ausreichend bespielt werden, um den ökologischen Fußabdruck zu senken. Für eine abschließende Betrachtung müsste jedoch auch der Infill-Transport zum KRP Standort mit einkalkuliert werden und auch zusätzlich geprüft werden, ob weitere Treibhausgase durch die Erstellung des KRP anfallen. Die obige Kork-Ökobilanzierung befasst sich hingegen ausschließlich mit den CO_2 -Emissionen durch das verwendete Material für den KRP Bau und weitere individuellen Parameter eines Platzes.

2.3 Aufbau Kunstrasensysteme

2.3.1 Allgemeiner Aufbau

Kunstrasensysteme sind aus mehreren miteinander in Wechselwirkung stehenden wasserdurchlässigen Schichten aufgebaut. Grundsätzlich ist ein KRP aus einem dämpfenden Unterbau und dem eigentlichen Kunstrasen inkl. Infill (Oberbau) aufgebaut. Darunter befindet sich eine tragfähige und ebenfalls wasserdurchlässige Asphalt- oder Schotter-schicht (Tragschicht/Feinplanum) (Bertling et al. 2021a; Knauer 2019).

Dämpfender Unterbau

Für die dämpfende Schicht gibt es folgende drei Varianten, die heutzutage Verwendung finden, wobei Variante A in Deutschland dominiert:

A) Elastische Tragschicht (ET)

¹² Styrol-Butadien-Kautschuk

¹³ Ethylen-Propylen-Dien-(Monomer)-Kautschuk

¹⁴ Thermoplastische Elastomere

B) Drainasphaltschicht mit aufliegender Elastikschicht (EL)

C) Elastikschicht direkt auf einer Nivellierschicht

Die Bauweisen A und B werden in der DIN 18035-7 vorgeschrieben. Variante C hingegen wurde bislang noch nicht in die DIN aufgenommen, sie wird aber im DFB-Handbuch für Sportplatzbau erwähnt (Bertling et al. 2021a).

Hauptbestandteil der elastischen Tragschicht (ET) ist das ELT- (End-of-Life-Tyres)-Granulat, welches aus Altreifen hergestellt wird und mit einem Polymer, meist Polyurethan und mineralischen Stoffen gebunden wird. Oftmals kann die ET-Schicht länger als nur für eine Lebenszeit eines Kunstrasenplatzes verwendet werden und besitzt eine Lebensdauer von 30-40 Jahren (Variante B, Abbildung 8).

Die EL-Schicht, auch Shockpad genannt, der Variante A besteht ebenfalls aus ELT-Granulat mit Polyurethanbinder, jedoch ohne Zugabe mineralischer Stoffe und wird beim Einbau vor Ort erstellt. Bei der EL-Variante ist zusätzlich eine wasserdurchlässige Asphalttschicht erforderlich, die die EL trägt. Aufgrund der hohen Kosten ist Variante A nicht so verbreitet in ihrer Anwendung wie Variante B (Variante A, Abbildung 8).

Im Falle der Bauweise von Variante C wird eine geschäumte Elastikschicht (Shockpad) aus Polyethylen- oder Polyurethanschäumen verwendet. Diese Variante ist im Vergleich zu den anderen kostengünstiger und leichter rückbaubar und wird meist bei beheizten KRP angewendet (Bertling et al. 2021a). Bei beheizten Plätzen kann die Elastikschicht elastisch gehalten werden, da sie bei niedrigeren Temperaturen verhärtet und zu Verletzungen führen kann. Somit können Spielausfälle aufgrund von Schnee und kalten Temperaturen umgangen und das Verletzungsrisiko reduziert werden (Hemstedt GmbH 2022). Durch die Poren in den polymeren Schäumen sind die Schichten ebenfalls wasserdurchlässig (Bertling et al. 2021a).

Kunstrasenteppich und Infill

Die Kunstfasern bestehen aus Polyethylen oder Polypropylen, sind auf einem Teppichrücken aus Polypropylen oder Polyamid eingefasst sind und werden mithilfe von einer Latex-Polymerdispersion fixiert. Der Unterschied der verschiedenen Kunstrasenteppiche liegt im Polgewicht, oder auch Fasergewicht genannt, welche die „Garnmasse des Teppichrückens“ bezeichnet. Sie liegt i. d. R. in einem Bereich von 1.000-3.000 g/m². Der Kunstrasenteppich weist eine durchschnittliche Lebensdauer von 12-15 Jahren auf (Bertling et al. 2021a).

Für die Stabilisierung des Kunstrasenteppichs wird Quarzsand als stabilisierendes Füllmaterial (übliche Menge: 20 kg/m²). Der KRP wird zusätzlich mit einem zweiten Infill,

dem Performance-Infill aufgefüllt, welches die technische Beispielbarkeit und die Sicherheit verbessern soll. Als Performance-Infill können Elastomere oder Naturstoffe verwendet werden. Am häufigsten kommen ELT-Granulate, EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-(Monomer)-Kautschuk), TPE (Thermoplastische Elastomere) und Kork vor (Bertling et al. 2021a).

ELT- oder auch Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) Granulat genannt, werden aus Altgummi von Altreifen hergestellt. Dieses kann mit teilweise krebserregend und umweltbeständigen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen belastet sein und hat negative Auswirkungen, v. a. auf die aquatischen Organismen (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2019b).

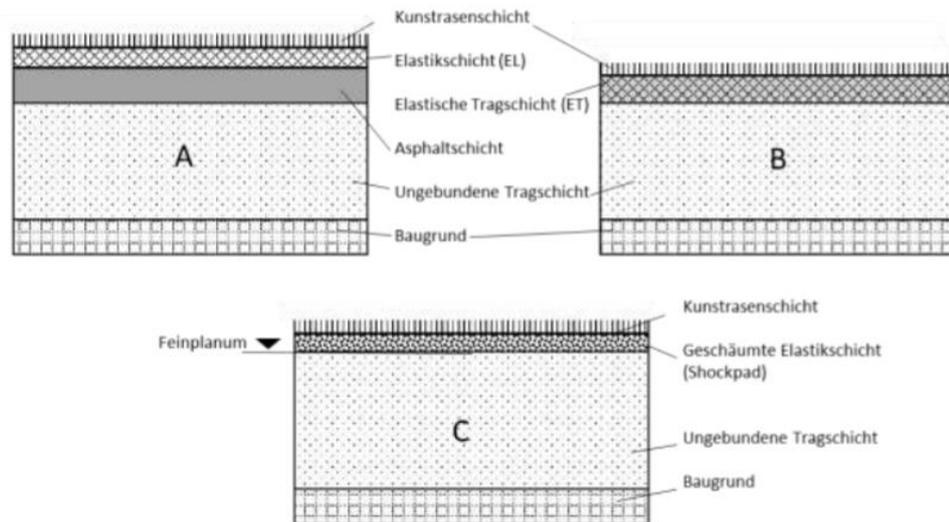


Abbildung 8: Drei Varianten (A, B, C) für den Aufbau eines KRP-Platzes, Darstellung nach (Bertling et al. 2021a)

Entwässerung

Aufgrund der wasserdurchlässigen Eigenschaften der KRP-Schichten kann anfallendes Niederschlagswasser auf folgende Weisen abgeleitet werden:

- Vertikale Entwässerung (Versickerung)
- horizontale Entwässerung (Fassung und Ableitung)
- Drainung (unterstützende Entwässerung)

Der größte Teil des Wassers versickert auf und ggf. neben dem Kunstrasenplatz. Auf dem Platz erfolgt die Versickerung in Richtung Drainage und Grundwasser. Das neben dem Platz aufkommende Wasser wird in Entwässerungselementen (Schächte, Rinnen) gesammelt und kanalisiert über Schmutz- oder Regenwasserkanäle abgeleitet. Der

restliche Wasseranteil auf dem Platz wird horizontal mittels Regenwasserkanälen (Trennsystem) oder seltener über Schmutzwasserkanäle (Mischsystem) abgeleitet. In manchen wenigen Fällen wird das Wasser direkt in die Vorfluter eingeleitet (Bertling et al. 2021a).

Die Wasserdurchlässigkeit (Wasserinfiltrationsrate) der einzelnen Schichten ist in folgenden DIN-Normen verankert: Unterbau KRP (DIN 18035-7), KRP Oberbau (DIN EN 15330-1) und Naturrasen (DIN 18035-4) (Bertling et al. 2021a).

Entsorgung und Sanierung

Vor dem Hintergrund der europäischen Kunststoffstrategie sollen zukünftig alternative Füllmaterialien als Kunstrasenplatz-Infill verwendet werden, welche recyclebar sind. Auch die thermische Entsorgung ausrangierter der Kunstrasenteppiche soll nach Möglichkeit weitgehend reduziert werden, sodass die Kreislaufwirtschaft und Wiederverwendung der Materialien gefördert werden. Hierbei besteht jedoch noch Optimierungsbedarf (Thieme-Hack et al. 2021).

Die Kosten für die Kunstrasenplatzentsorgung richten sich nach der Platzgröße und der Wiederverwendung und speziellen Entsorgung der verbauten Materialien. Es ist sinnvoll bereits vor dem Kunstrasenplatzbau die Kosten für den Rückbau mit einzubeziehen. Der finanzielle Rahmen für die Entsorgung von KRP liegt zwischen 13.000 bis 16.000 Euro (Sportstättenrechner o. J.b), 9.000 bis 45.000 Euro (Eunomia Research & Consulting Ltd 2017) und nach Angaben des Fraunhofer UMSICHT bei 65.000 Euro (Bertling et al. 2021a) (Platzgröße von 7.000 m².) (Anhang 1) (Bertling et al. 2021a; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2019b)

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) kann der Kunstrasen stofflich oder energetisch verwertet werden. Auf letzterem liegt das Hauptaugenmerk (Landessportverband Schleswig-Holstein e.V. 2019). Des Weiteren fallen Kosten für den Rückbau des KRP bei der Trennung der einzelnen Materialien (Infill und Sand) an (Sportstättenrechner 2021b).

Für die Sanierung eines Kunstrasenplatzes kann die Elastikschicht (ET) i. d. R. bis zu 2 oder 3 KRP-Generationen wiederverwendet werden. Somit können deutlich höhere Kosten für einen neuen Kunstrasenplatz vermieden werden. Bei älteren KRP-Modellen wurde auf den Verbau der dämpfenden ET-Schicht verzichtet. Bei diesen Plätzen sollte bei einem Neubau oder einer Sanierung die ET-Schicht unbedingt mit integriert werden, da dadurch die Lebensdauer des Platzes verlängert werden kann (Sportstättenrechner 2021a; Private Greens & FiberGrass International GmbH 2017). Sie federt Belastungen

ab und dient dem Fallschutz für die Spieler (Private Greens & FiberGrass International GmbH 2017).

2.3.2 Alternative Füllstoffe

EU-Verbot Kunststoffgranulat

Die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) empfiehlt der EU aufgrund der Mikroplastikemissionen von Kunstrasenplätzen ein Verbot von Kunststoffgranulat. Die Kunstrasenfasern sind nicht im Fokus der ECHA, sondern ausschließlich das Kunststoffgranulat (Polytan GmbH 2019; Kerkhoff Grün - Kunst- & Rollrasen o.J.). „Die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) führt derzeit eine öffentliche Konsultation durch, welche Auswirkungen eine Beschränkung des Einsatzes von Granulat hätte. Das Ziel: Ab 2022 soll das Streugut verboten werden.“ (Janczura 2019). „Kunststoffgranulat ist letztlich nichts Anderes als umweltschädliches Mikroplastik. Sobald es einmal in der Umwelt ist, gibt es keine Möglichkeit, Mikroplastik wieder aus Boden und Gewässern herauszuholen. „Neue Kunstrasen-Sportplätze sollten zudem nur noch mit einem alternativen Füllstoff geplant und umgesetzt werden“ (Aussage Frau Ziebarth (BUND-Expertin für Mikroplastik) (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2019a). Aufgrund des ECHA-Beschränkungsvorschlags werden Alternativen zu dem zurzeit eingesetzten Kunstrasen-Infill gesucht. Als Möglichkeiten kommt 1) ein kompletter Verzicht auf Füllstoffe in Betracht. Außerdem können 2) ausschließlich mineralische Füllstoffe, 3) bioabbaubare Materialien oder 4) natürliche Materialien (Kork, Fasern oder Schalen von Kokosnüssen, Reisspelzen, Walnussschalen, Olivenkerne oder Holz) eingesetzt werden (Bertling et al. 2021a).

Der bisherige ECHA-Vorschlag dient zunächst als Empfehlung und stellt noch keine endgültige Handlungsanweisung dar. Danach muss eine abschließende Empfehlung, geplant für 2022, in gültiges EU-Recht umgewandelt werden, sodass dieses rechtlich wirksam wird. Für bereits mit MP befüllte Kunstrasenplätze soll der Bestandsschutz gelten. Zudem soll es eine sechsjährige Übergangsfrist geben. Ab 2027 soll kein Kunststoffgranulat auf KRPs mehr ausgebracht werden dürfen. Dennoch sollen bestehende KRP weiterhin benutzt werden können (Polytan GmbH 2020).

Kork

Eine Alternative zu EPDM-, ELT-/SBR- oder TPE-Granulaten stellt Kork dar und wird bereits auf einigen Kunstrasenplätzen in Deutschland als umweltfreundliche Alternative bei KRPs der 3. Generation verwendet. Jedoch muss beachtet werden, dass die

Pflegemaßnahmen im Vergleich zu anderen Kunstrasensystemen aufwendiger sind und dass das Material nur als ein limitierter Rohstoff zur Verfügung steht. Zusätzlich sollte auch der finanzielle Aspekt mit berücksichtigt werden (Knauer 2019; Haymarket Media GmbH 2019; Sportstättenrechner o. J.a; IAKS 2020). Darüber hinaus neigt Kork-Infill aufgrund seiner geringen Dichte besonders dazu sich durch Starkregenereignisse und daraus resultierende Abschwemmung vom Platz in der Umwelt zu verbreiten (Südkurier GmbH 2020; Bertling et al. 2021a).

Unverfüllte Kunstrasensysteme (Vollrasensysteme)

Unverfüllte Kunstrasensysteme der 4. Generation stellen ebenfalls eine Alternative dar. Sie verzichten komplett auf den Einsatz von Performance-Infill (Hermann Kutter GmbH & Co. KG 2018; GreenFields o. J.). Dies ist möglich, indem die Teppiche deutlich höhere Fasergewicht aufweisen (i.d.R. 3 kg/m²), sodass sie nicht mehr mit Infill stabilisiert werden müssen. Falls ebenfalls auch auf den Sand als stabilisierendes-Infill verzichtet werden soll, ist die Installation von Metallschienen an den Spielfeldrändern erforderlich, um den Kunstrasen so gegen die Windeinwirkung zu sichern. Die Fasern werden in diesem Fall so hergestellt, dass diese Fasern sich gegenseitig stützen können und so kein Infill mehr zur Stabilisierung benötigen (Bertling et al. 2021a). Das Performance-Infill wird somit durch eine Performance-Rasenschicht aus Kunstrasenfasern ersetzt (GreenFields o. J.). Ein solches Kunstrasensystem ist deutlich pflegeleichter und weniger kostenintensiv, da kein Infill mehr nachgefüllt oder gereinigt werden muss.

Quarzsand

Quarzsand kann ebenfalls als Alternative für Kunstrasengranulat für die Befüllung von Kunstrasensystemen verwendet werden. Dieser ist 100 % natürlich und stellt keine Umweltgefährdung dar. Der Einsatz von Quarzsand verbessert durch den Prozess der Verdunstung des gespeicherten Wassers im Sand ebenfalls die natürliche Haptik des Kunstrasens. Zusätzlich stellt Sand eine umweltfreundlichere und weniger kostenintensive Alternative dar (Kerkhoff Grün - Kunst- & Rollrasen o.J.). Für die Sportler hingegen birgt ein ausschließlich mit Sand verfüllter KRP eine höhere Verletzungsgefahr und verringert die elastische Spieleigenschaft (Knauer 2019).

Zusammenfassung

Sand und Kork sind als natürliche Materialien umweltfreundlich und werden bereits als alternative Füllmaterialien auf Kunstrasenplätzen eingesetzt. Jedoch kommen die Materialien im Hinblick auf die Lebensdauer, Komfort und Pflege nicht an Kunststoffgranulat heran (Haymarket Media GmbH 2019). Auch der Verschleiß des Korkgranulats liegt über

dem von Kunststoffgranulaten. Auf den Quadratmeter bezogen kosten EPDM- und Kork-Granulat etwa gleich viel (Schneider 2018; BIR Tyre & Rubber Committee 2019).

2.4 KRP-MP Emission, Transport, Senken

In einer Studie des Fraunhofer UMSICHT aus dem Jahr 2018 wurden Kunstrasenplätze als fünftgrößte Emissionsquelle für Mikroplastik von insgesamt 51 primären Quellen eingestuft. Die Daten der Studie zu Emissionen von Kunstrasenplätzen basierten nicht auf Messungen, sondern resultierten aus der nachgefüllten Granulatmenge. „Allein von Fußballplätzen könnten beim Kicken auf Kunstrasen jedes Jahr insgesamt knapp 8.000 Tonnen Mikroplastik in die Umwelt gelangen.“ (Knauer 2019). Im Rahmen der Multi-Client Studie vom Fraunhofer UMSICHT wurde ein durchschnittlicher Verlust von 2,98 Tonnen Performance-Infill pro Jahr und Platz abgeschätzt. Die Verlustmengen liegen somit rund 10 Prozent über den Nachfüllmengen (2,68 Tonnen/Jahr). Auf den untersuchten Kunstrasenplätzen variierten die Werte jedoch stark (Bertling et al. 2021a). Der Hersteller Polytan empfiehlt eine halbe bis eine Tonne im Jahr pro Kunstrasenplatz an Performance-Infill nachzufüllen, der Hersteller Porplastic empfiehlt bis zu 7 Tonnen Nachfüllung. Fraunhofer UMSICHT leitete einen Durchschnittswert anhand von drei Studien ab und empfiehlt 3,15 Tonnen Performance-Infill jährlich pro Platz nachzufüllen (Knauer 2019).

Grundsätzlich verhalten sich Kunstrasenplatz-Infill und -fasern in der Umwelt ebenso wie Mikroplastikpartikel aus anderen Quellen. Sie werden vom KRP emittiert, gelangen über Transportpfade in die Umwelt und verbleiben in so genannten Senken, von wo sie teilweise erneut freigesetzt werden (temporäre Senken) (s. Kap. 2.1.5 und Kap. 2.1.6).

Die Partikelfreisetzung (Emission) von Kunstrasenplätzen erfolgt zum einen durch den Spielbetrieb (Schuhe und Kleider der Spieler), durch die Pflege (z. B. Reinigung des Granulats, Schneeräumung), durch Witterungsverhältnisse (Schnee, Regen, Wind) und durch die Einflüsse der jeweiligen Topographie des Platzes (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) o.J.b; Bertling et al. 2021a). Laut des IAKS stellen Wind und Niederschläge die Hauptaustragspfade für den Infillverlust dar (IAKS 2019).

Auf dem Platzgelände können emittiertes Infill und emittierte Fasern ebenfalls verbleiben und sich an künstlichen (z. B. Gebäude) und natürlichen Barrieren (z. B. Wälle, Grünflächen) in der Umgebung des Kunstrasenplatzes ablagern und dort dauerhaft verbleiben. Eine weitere Mobilität der Partikel ist so zunächst verhindert. Der endgültige Verbleib der Partikel wird jedoch durch verschiedenste Parameter, u. a. Wetterereignisse, Anlage des Platzes, Platzumfeld und den dort vorhandenen geographischen Gegebenheiten vor Ort bestimmt (Bertling et al. 2021a). Durch die Studie von Fraunhofer UMSICHT konnte

nachgewiesen werden, dass die Mikroplastikemissionen je nach Kunstrasenplatz stark variieren. Die Kunststoffemissionsmenge ist des Weiteren ebenfalls von der Häufigkeit der Pflegemaßnahmen, der Nutzungsstunden, dem Platzzustand, der Bauweise und örtlichen Randbedingungen abhängig. Es besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf, um qualifiziertere Aussagen machen zu können (Knauer 2019). Zudem stellt Mikroplastik nur eine von möglichen Umwelteinwirkungen von Kunstrasenplätzen dar (Bertling et al. 2021a).

2.4.1 KRP-Faser Emission

Neben der Emission von Infill kommt es durch den Abrieb von Kunstrasenfasern ebenfalls zu Mikroplastikemissionen. Die Faseremission spielt in der Kunstrasenplatz-Mikroplastikthematik auch aufgrund der deutlich geringeren Menge eine eher untergeordnete Rolle im Vergleich zum Kunststoff-Infill. Letzteres steht aufgrund des geplanten Beschränkungsvorschlags der ECHA im Fokus, da es sich beim Granulat bereits um eine intendierte Zugabe von primärem Mikroplastik handelt und im allgemeinen nach Alternativen zu Kunststoffgranulaten gesucht werden soll (Bertling et al. 2021a; Kerkhoff Grün - Kunst- & Rollrasen o.J.). Bislang wird davon ausgegangen, dass der größte Faserabrieb durch die Spieler verursacht und ausgetragen wird und durch Faktoren wie Elektrostatik und Feuchtigkeit im Anhaftungsverhalten bestimmt wird (Bertling et al. 2021a).

Untersuchungen weisen nach, dass durch den Kontakt der Kunstfasern mit den harten Fußballstollen Fasern und Faserfragmente abgelöst, ebenso durch Pflegemaßnahmen wie Bürsten freigesetzt werden. Der Austrag ist abhängig von der Qualität der Fasern und deren Verarbeitung, von Fasertyp, -dichte und -gewicht kann somit stark variieren. Erste Abschätzungen über den Austrag von Kunststofffasern reichen von 50 kg/a bis zu > 1 Tonnen/Jahr (Bertling et al. 2021a).

Anhand von FIFA-Daten von mehr als 3.000 Plätzen konnte bei einer Faserlänge von 40 bis 65 mm eine jährliche Verschleißrate von 0,5 bis 0,8 % ermittelt werden (durchschnittliches angenommene Polgewicht von 1,4 kg/m²) (Hann et al. 2018). Die Verdichtung von Infill und der Infillverlust sind weitere Faktoren, die zu einer erhöhten freiliegenden Faserlänge (freie Polhöhe) und einer Verschlechterung der Platzperformance/Spielleistung führen können (Verschoor et al. 2021).

Weitere Verschleißuntersuchungen nach Thieme-Hack et al. und Flemming et al. ergaben, dass mit dem Platzalter die Verlustraten der Fasern ansteigen (Bußmann et al. 2019; Bertling et al. 2021a). Sie liegt bei einem Platzalter von 0 bis 5 Jahren bei etwa 0,2 mm/a und im Alter von 5 bis 10 Jahren bei 0,5 mm/a. Die höhere Verlustrate mit dem

Platzalter wird durch Verwitterung, Versprödung und Alterung der Fasern verursacht. Die Untersuchungen zeigen ebenfalls, dass Plätze mit Performance-Infill einen geringeren Faserverschleiß aufweisen als mit Sand verfüllte oder unverfüllte Plätze (Bertling et al. 2021a). Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der Faserverschleiß ebenfalls hohe Werte aufweist, ähnlich den Infillverlustwerten. Zukünftige experimentelle Untersuchungen im Bereich Faseremission sind also ebenfalls dringend notwendig (Bertling et al. 2021a).

2.5 KRP- Maßnahmen zur Verhinderung von MP-Emissionen

Mikroplastikemissionen resultieren v. a. durch die Bespielung des Platzes, Platzwartung/-pflege und durch Wind- und Witterungseinwirkung. Maßnahmen, um der Mikroplastikemission entgegenzuwirken sind am Spielfeld installierte Abklopf- und Wegbürstenbereiche, auf denen Sportler ihrer Schuhe von Granulat reinigen können (KIMO Fidra 2018a; Knauer 2019). Eine weitere Möglichkeit die Emission zu reduzieren, ist den Platz mit Stellsteinen einzufassen. Auch eine Installation von weiteren baulichen Maßnahmen am Spielfeldrand z. B. eines Zinkblechs im 45° Winkel zum Spielfeld (Bertling et al. 2021a) oder eines Verwehungsschutzes (Wälle, Schutz- oder Auffangbanden, Zäune) kann eine erhöhte MP-Emission vom Platz verhindern (Deutscher Fußballbund (DFB) 2021).

Durch den Einsatz von alternativem Infill auf neuen und bereits existierenden 3 G Plätzen kann die MP-Emission durch KRPs zukünftig reduziert werden (GreenFields o. J.). Nach Aussagen des Kunstrasenherstellers Polytan kann das Design der Fasern die Infill-Emissionen beeinflussen. So können gekräuselte (texturierte) Kunststoffhalme das Granulat besser festhalten als glatte (Knauer 2019). Der Faserverschleiß und die Menge an nachgefülltem Infill können durch geeignete Pflegemaßnahmen reduziert werden (Sharma et al. 2016).

Durch ein passendes Pflegemanagement und regelmäßige Instandhaltungsleistungen auf dem KRP kann der Infill- und Faseraustrag verringert und die durchschnittliche Lebensdauer eines Platzes mit großer Wahrscheinlichkeit erreicht werden (Sharma et al. 2016). Auch die Verdichtung¹⁵ kann durch eine geeignete Kombination von Wartungsmethoden deutlich verringert werden (Verschoor et al. 2021). Ordnungsgemäße Platzwartung (Pflege, Reinigung, Dekompression und Nachfüllungen) und die damit

¹⁵ Verdichtung resultiert aus der natürlichen Verwitterung des Infills durch Sonnenlicht, durch Schmutzpartikel, durch die Platznutzung der Spieler und durch die Einwirkung der Schwerkraft, Verschoor et al. 2021

verbundene Dekompression stellen Methoden dar, der Verdichtung entgegenzuwirken (Hann et al. 2018; Fleming et al. 2020). Genaue Vorgehensweisen lassen sich den „FLL-Sportplatzpflegerichtlinien – Richtlinien für die Pflege und Nutzung von Sportanlagen im Freien; Planungsgrundsätze“ entnehmen (DIN e. V. 2019b). Durch eine angepasste Durchführung von Pflegemaßnahmen wie Schneeräumung oder Spielflächenreinigung mit Reinigungsmaschinen kann der Infillverlust reduziert werden. Im Winter sollte eine 1 cm hohe Schneeschicht auf dem Platz bestehen bleiben, um eine Granulatverteilung auf andere Flächen abseits des Platzes zu vermeiden. Nach den Pflegemaßnahmen sollten die verwendeten Maschinen (inkl. Bürstenleisten) ebenfalls vom Infill befreit werden und dieses nach Möglichkeit auf den Platz zurückgeführt werden, um den Verlust zu reduzieren (Deutscher Fußballbund (DFB) 2021; DIN e. V. 2019b). Weitere Maßnahmen sind durch das Europäische Komitee für Normung in Form von Leitlinien zur Minimierung der Ausbreitung von Infill in die Umwelt veröffentlicht (european committee for standardization (CEN) 2020). Die Anleitung achtet auf Spielfeldgestaltung, Installation, Pflege/Wartung, Schneeräumung, Umkleidekabinen, Nachrüstung und die End-of-Life-Phase des Kunstrasens. Weitere Beratungsangebote zur Reduktion bzw. Vermeidung von Infillverlusten bieten zudem auch Hersteller von Füllmaterialien (GENAN Inc. 2020) oder Außendienstunternehmen (Verschoor et al. 2021).

Auch die Ausgestaltung der Entwässerungssysteme kann eine geeignete Maßnahme darstellen, um Infillemmissionen in die Umwelt zu minimieren (Haymarket Media GmbH 2019; Deutscher Fußballbund (DFB) 2021). Der Einbau von Filtersystemen bei Entwässerungselementen und Drainageleitungen kann dazu beitragen (Deutscher Fußballbund (DFB) 2021; Bertling et al. 2021a).

Installierte Filtersysteme können sowohl Einstreugranulat als auch Staub- und Schmutzpartikel herausfiltern, sodass nach Herstellerangaben bis zu 98 % des Kunststoff-Granulats zurückgehalten werden (Sportstättenrechner o. J.a). Das Filtersystem Sportfix Clean der Firma Hauraton stellt ebenfalls eine Möglichkeit dar, da es sowohl bei neuen Plätzen als auch bestehende Plätzen eingebaut werden kann (HAURATON GmbH & Co. KG o. J.).

Abschließend sollte auch eine Bewusstseinsbildung bei den Spielfeldnutzern zu „Mikroplastik“ und zu den „Möglichkeiten zur Reduktion des Granulatverlustes“ stattfinden. Dies kann in Form von Postern, Aufklärung über richtige Verhaltensregeln auf dem Platz und die Nutzung von Abklopf-/Wegbürstenbereichen und Duschsieben in den Umkleiden geschehen (Deutscher Fußballbund (DFB) 2021; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) 2019b; KIMO Fidra 2018b, 2021).

3 Untersuchungsdesign

An zwei Kunstrasenplätzen, einmal am Standort Osnabrück (Niedersachsen) und einmal am Standort Oberhausen (Nordrhein-Westfalen) wurde ein Monitoring von Kunstrasenplätzen durchgeführt. Ziele der Untersuchungen waren es, Emissionsmengen, Transport und Verbleib von Kunstrasenplatz-Infill zu erforschen, um Erkenntnisse zu gewinnen, aus denen Emissionsminderungsstrategien entwickelt werden können.

3.1 Standortbeschreibung der Untersuchungsobjekte/ Kunstrasenplätze

Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung der beiden für die Untersuchungen ausgewählten Standorte.

3.1.1 Kunstrasenplatz Osnabrück-Nahne (KRP OS)

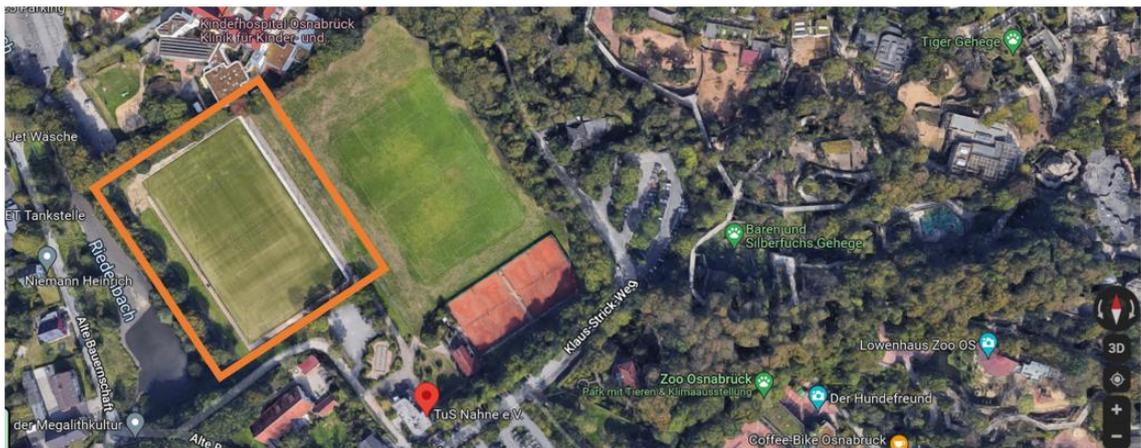


Abbildung 9: Luftbild Kunstrasenplatz Osnabrück-Nahne (orange umrandet) und Umgebung (Google Maps 2022).

Der Kork-Kunstrasenplatz (Koordinaten: 52°14'59.085"N 8°3'58.63"O) befindet sich 82,05 m über NHN in Osnabrück, im Bundesland Niedersachsen und wurde im Mai 2020 erbaut (Abbildung 9). Er liegt außerorts der Innenstadt Osnabrücks, im südlichen Stadtteil Osnabrück-Nahne, in unmittelbarer Nähe zur Autobahnauffahrt A 30 (Klaus-Strick-Weg 25, 49082 Osnabrück) (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) 2022; Google Maps 2022). Der Platz ist nach DIN 18035-7 erbaut und wurde mit Quarzsand und Kork verfüllt (Anhang 3). Zur Sportanlage des Sportvereins des TuS Nahne e.V. gehören zusätzlich zum Kunstrasenplatz ein Naturrasenplatz und zwei Tennisplätze. Südwestlich vom Kunstrasenplatz, in etwa 20 bis 30 m Entfernung, befindet sich der Riedenbach, welcher fast durchgehend kanalisiert ist und nördlich über den Stadtteil

Osnabrück-Schölerberg weiter Richtung Neue Mühle (Innenstadt Osnabrück) verläuft und anschließend in die Hase mündet (Verein für Ökologie und Umweltbildung Osnabrück e. V. 2007). Der Kunstrasenplatz Osnabrück kann somit als gewässernah bezeichnet werden. In der Umgebung des Platzes befindet sich der Osnabrücker Zoo und das Planetarium, ein Kinderhospital sowie ein angrenzendes Wohngebiet, Grünflächen/Wald und Asphaltflächen (Abbildung 10) (Google Maps 2022). Der gesamte Kunstrasenplatz ist bis auf den Platzzugang von der Südostseite vollständig umfriedet (Anhang 2 und 3). Weitere detaillierte Kenndaten des Platzes können der Tabelle 1 und dem Begehungsprotokoll (Anhang 2) entnommen werden.

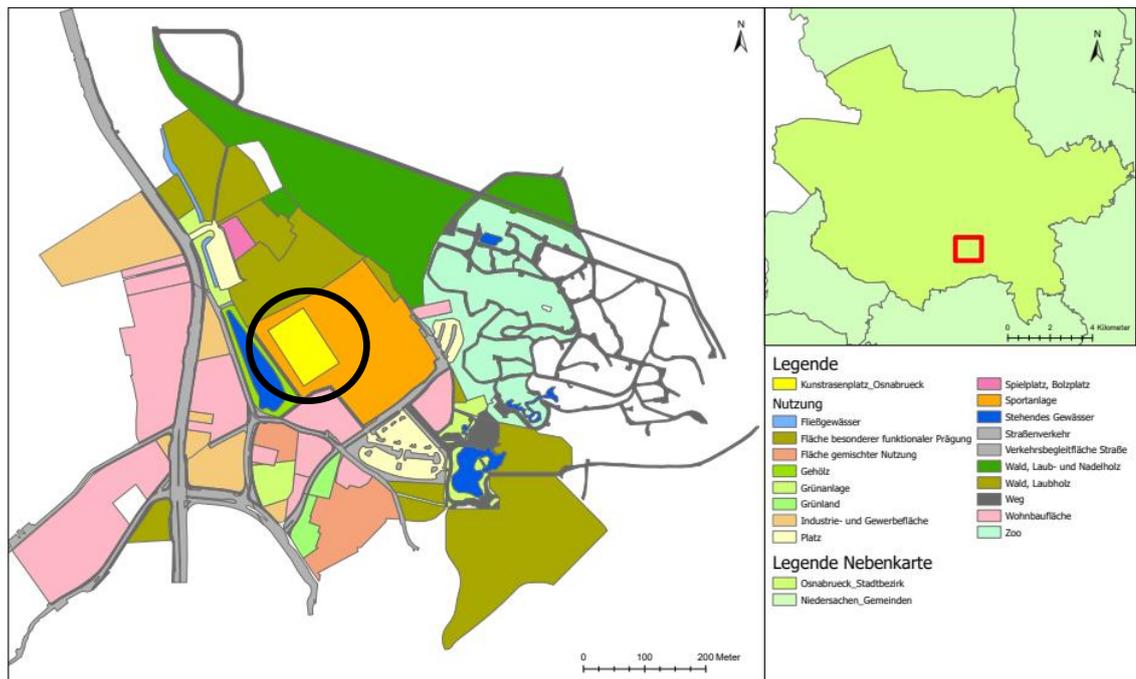


Abbildung 10: Karte der Umgebung des Kunstrasenplatzes Osnabrück. KRP OS mit schwarzem Ring gekennzeichnet. (Dohmen, J. und Rischmüller, S. (Fraunhofer UMSICHT) 2021).

Entwässerungssituation

Durch die leichte Erhöhung des Mittelpunktes des Kunstrasenplatzes (+ 0,27 %) erfolgt die horizontale Platzentwässerung des Oberflächenwassers zu den Eckpunkten des Platzes hin. Das Wasser wird von dort aus über Muldenrinnen in die Entwässerungsschächte abgeleitet und dem Drainagesystem zugeführt (Anhang 3). Bei der vertikalen Platzentwässerung, der Versickerung „durch den Platz“ hindurch, wird Drainagewasser unter dem Platz mittels Saugrohre und Sammelleitungen gefasst und dem angrenzenden Vorfluter (Riedenbach) zugeführt (Anhang 3, Anhang 3.1). Die Platzentwässerung wurde nach den Vorgaben der DIN 18035 T 3 angelegt (Brinkmann & Deppen GbR). Die Sammelleitungen des vorherigen Tennenplatzes wurden hierbei so modifiziert, dass die

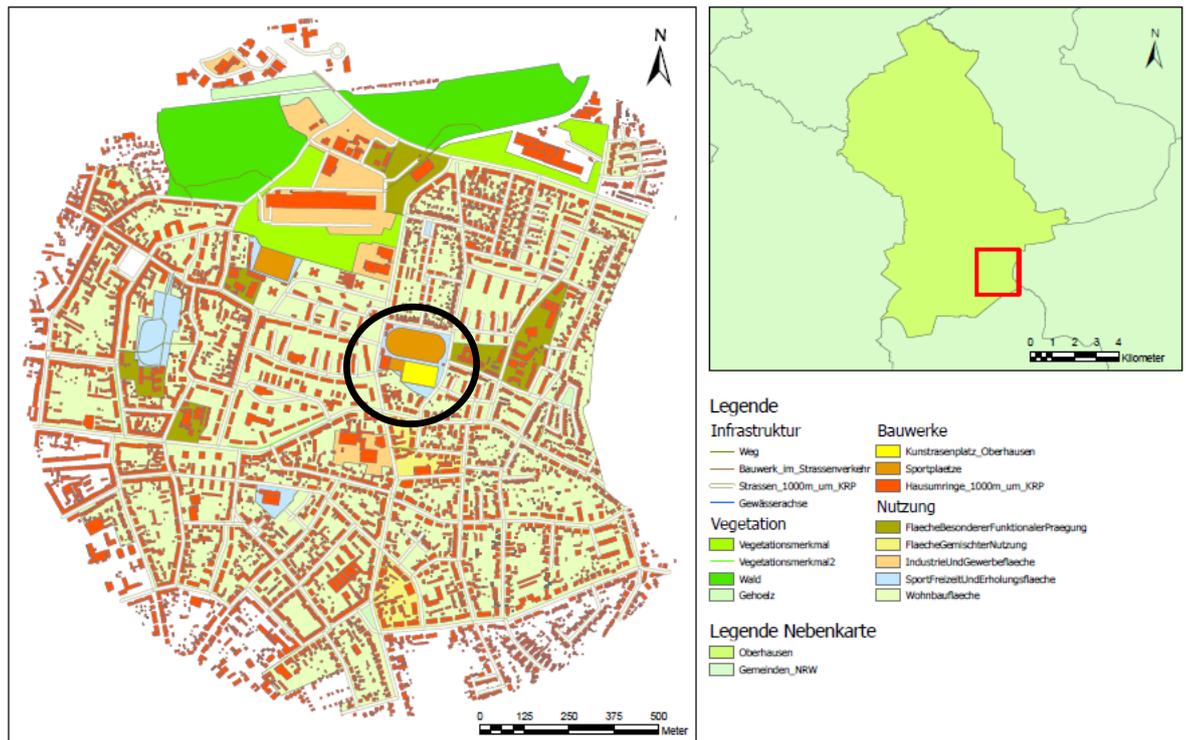
Drainagerohre wiederverwendet werden konnten. Die Einleitung in den Riedenbach erfolgt über eine Einleitungsstelle vom südlichen Eckschacht aus (Brinkmann & Deppen GbR). Im Bereich OS-Nahne ist nach Auskunft der Stadtwerke ein Trennsystem verbaut, sodass das Regenwasser des Platzumfeldes über einen Regenwasserkanal ebenfalls in den Riedenbach eingeleitet wird (Stadt Osnabrück (Borm, J.) 2021; SWO Netz GmbH 2022).

3.1.2 Kunstrasenplatz Oberhausen (KRP OB)



Abbildung 11: Luftbild Kunstrasenplatz Oberhausen, Mellinghoferstr. (orange umrandet) und Umgebung (Google Maps 2022).

Der Kunstrasenplatz (Koordinaten: 51°28'37.2"N 6°53'16.0"O) befindet sich 43,66 m über NHN an der Mellinghofer Straße 114 und liegt innerorts im Stadtteil Oberhausen-Dümpten in Nordrhein-Westfalen (Abbildung 11) (Google Maps 2022; Bezirksregierung Köln 2022). Zusammen mit einem Naturrasenplatz bildet der Kunstrasenplatz im Süden von Oberhausen, die Fritz-Collet-Sportanlage. Diese Sportanlage wird durch zwei Fußballvereine, TB Oberhausen 1889 und SC 1920 Oberhausen genutzt. Der Platz wurde 2019 erbaut und ist mit Quarzsand und umweltfreundlichem EPDM-Kunststoffgranulat verfüllt. Das Granulat erfüllt die europäische Spielzeugnorm EN 71-3 (Müller 2019b). Die Bauweise erfolgte nach Vorgaben der DIN 18035-7 (Stadt Oberhausen 2021). Der Platz liegt innerhalb eines Wohngebietes und ist von Wohngebäuden, Pflasterung, Grün- und Asphaltflächen umgeben (Abbildung 12). Zudem ist der Platz bis auf die Nordseite vollständig umfriedet und liegt im Vergleich zum Kunstrasenplatz Osnabrück gewässerfern (Abbildung 11). Weitere detaillierte Kenndaten des Platzes können der Tabelle 1 und dem Begehungsprotokoll (Anhang 2) entnommen werden.



Umgebung des Kunstrasenplatzes an der Mellinghofer Straße
114 46047 Oberhausen

Bearbeiterin: Julia Dohmen, 22.10.2021
Datengrundlage: Geobasis NRW und Boris Dresen; Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N

Abbildung 12: Karte der Umgebung des Kunstrasenplatzes Oberhausen. KRP OB mit schwarzem Ring gekennzeichnet (Dohmen, J.; Rischmüller, S. 2021).

Entwässerungssituation

Es verläuft ein Platzgefälle von + 0,8 % von der langen Südseite zur langen Nordseite des Kunstrasenplatzes. Dadurch erfolgt die horizontale Platzentwässerung des Oberflächenwassers in Richtung Nordseite des Platzes. Das Wasser wird von dort aus über Muldenrinnen in die Entwässerungsschächte abgeleitet und dem Drainagesystem zugeführt und mittels Saugrohre und Sammelleitungen gefasst und dem Mischwasserkanalsystem zugeführt (Anhang 3, Anhang 3.2). Im Bereich des KRP ist nach Auskunft der Stadtwerke Oberhausen ein Mischsystem verbaut, sodass das Regenwasser des Platzumfeldes über den Mischkanal abgeleitet und dem Klärwerk Emschermündung zugeführt wird (STOAG Stadtwerke Oberhausen GmbH 2021).

3.2 Methoden

3.2.1 Infill-Kunstrasenplatzuntersuchungen/Monitoring

3.2.1.1 Recherche & Platzbegehung

Beim Kunstrasenplatzmonitoring wurde durch die Platzbegehung und Recherche der jeweilige Ist-Zustand der Plätze erhoben. Die Datenerhebung der Kunstrasen Standorte Osnabrück und Oberhausen erfolgte in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Städten, deren Stadtwerke, Vereinen, Ansprechpartner für die Fußballplätze, Platzhersteller, Baufirmen und Architekten. Durch die Vorarbeit der Recherche konnte das Formblatt „Protokoll zur Begehung von Kunstrasenplätzen“ (Anhang 2), v. a. durch die Ansprechpartner der Stadt, Fachbereich Sport ausgefüllt werden. Im Anschluss erfolgte eine erste Platzinspektion, wobei in einem weiteren detaillierten Protokoll räumliche Standortdaten, Platzumgebung, Platz Ist-Zustand, Topographieklassen, Entwässerungssituation und Entfernung von Infill-Rückständen vom Platz festgehalten wurden. Bei der zweiten Platzbegehung der Plätze erfolgte eine punktuelle Probenahme vom Infill vor Ort. Im Fokus des Monitorings stand insbesondere das Migrations- und Transportverhalten von KRP-Infill.

3.2.1.2 Siebanalyse - Ermittlung der Korngrößenverteilung

Feldarbeit

Am 27.10.2021 wurde die Probenahme auf dem Kunstrasen Oberhausen (Mellinghofer Str.114, 46047 Oberhausen) durch Sophie Rischmüller (UMSICHT) und Julia Dohmen (UMSICHT) durchgeführt. Zwei Wochen später erfolgte am 10.11.2021 die Probenahme auf dem Kork-Kunstrasen in Osnabrück-Nahne (Klaus-Strickler-Weg 25, 49082 Osnabrück) durch Sophie Rischmüller, Julia Dohmen und Herrn Peters (Platzwart TuS Nahne e. V.). Sowohl für die Auswahl der Probenahmestellen als auch für die anschließende Laboranalyse wurde sich für beide Plätze an der Veröffentlichung des Fraunhofer-Instituts UMSICHT „Kunstrasenplätze-Systemanalyse“ orientiert (Bertling et al. 2021a). Hierfür wurden fünf Probenahmestellen auf dem Platz ausgewählt (Ecke, Elfmeterpunkt/16er, Tormitte, Mittelpunkt, Mittellinie Außen (Nordseite)). Um die Koordinaten der Probenahmepunkte zu erhalten, wurde mit einem Maßband jeweils die Entfernungen zu den Rändern des Platzes abgemessen (Abbildung 13, Abbildung 14). Anschließend wurde auf jeden Probenahmepunkt eine kreisförmige Form (\varnothing 26 cm) platziert und das Platzinfill, Granulat und Sand (plus Fremdstoffe) aus der Form mit Hilfe eines Kärcher Nass-Trockensaugers (ohne Staubsaugerbeutel) eingesaugt. Nach jeder Probenahme

wurde das eingesaugte Sand-Kork- bzw. Sand-EPDM-Gemisch aus dem Staubsauger entnommen und in Probenahmebeutel überführt.

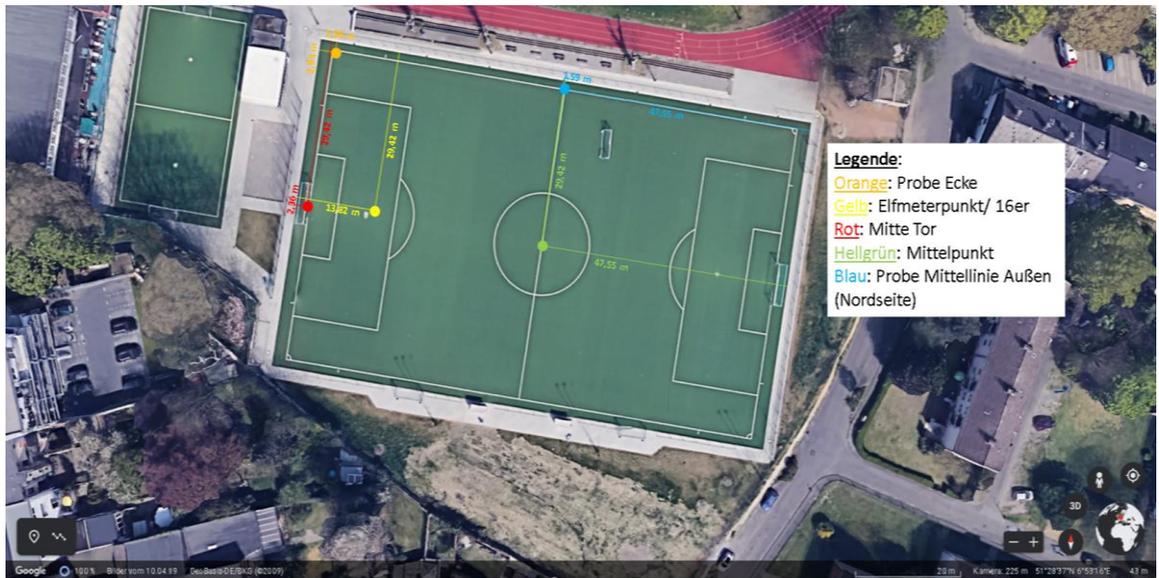


Abbildung 13: farblich markierte Probenahmestellen auf dem Kunstrasenplatz OB (Mellinghofer Str.114, 46047 Oberhausen) mit eingetragener Entfernung zu den Platzrädern. Modifiziertes Luftbild (Google Maps 2022).



Abbildung 14: farblich markierte Probenahmestellen auf dem Kunstrasenplatz OS-Nahne (Klaus-Strickler-Weg 25, 49082 Osnabrück) mit eingetragener Entfernung zu den Platzrädern. Modifiziertes Luftbild (Google Maps 2022).

Laboruntersuchung

Siebanalyse

Im Anschluss an die Probenahme auf den Plätzen erfolgte die Trockensubstanzbestimmung. Dazu wurden die Proben bis zur Gewichtskonstanz in einem Trockenschrank (Binder KB 240 Inkubator) (> 24 Std., 60 °C) getrocknet. Die Bestimmung der Korngrößenverteilung des Kork- bzw. EPDM-Sandgemisch erfolgte mittels Siebanalyse nach DIN 66165. Hierbei wurde ein Siebanalysegerät (Retsch, AS 2000) mit einem Siebturm aus sechs verschiedenen Siebmaschenweiten (2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,3 mm, 0,1 mm, 63 µm, plus Boden) verwendet, um das Gemisch in sieben Fraktionen (> 2 mm, > 1 mm, > 0,5 mm, > 0,3 mm, > 0,1 mm, > 63 µm und < 63 µm) zu unterteilen (Anhang 4.1.2, Anhang 4.1.5). Für die Siebanalyse wurde eine Siebdauer von 10 min mit einer Amplitude von 1,00 mm/g (während der Siebung leicht variierend) gewählt.

Digitale Mikroskopie

Das EPDM-Infill hat eine Ursprungskorngröße von 0,5 bis 2,0 mm, die von Kork-Infill beträgt 1,0 bis 2,0 mm. Durch Spielbetrieb und Verwitterung verschleißt Infill und reibt ab, sodass aus größeren Partikeln kleinere entstehen (s. Kap. 2.1.4). Die Bestimmung des Unterkornanteils sowie die Identifikation möglicher Kork- und Kunststoff-Abriebpartikel < 63 µm wurde mittels digitaler Mikroskopie (Keyence VHX-6000) durchgeführt. Durch die Einstellung von verschiedenen Vergrößerungsstufen konnten genaue Mikroskopaufnahmen von den Feinstabriebpartikeln erstellt werden. Zudem konnten die Partikel vermessen werden (Anhang 6).

3.2.2 Infillverlustbestimmung

Die Ermittlung der theoretischen Infillverlustmenge ist rechnerisch durch eine Bilanzierung möglich. Dazu werden der Wert der Infillmenge zum Zeitpunkt der Platzfertigstellung und eventuelle Nachfüllmengen aufaddiert (Tabelle 4). Von diesem Wert wird die aktuelle Infillmenge auf dem Platz (durch Probenahme) subtrahiert. Die Infillverlustmenge ergibt sich so aus der Differenz beider Werte (Bertling et al. 2021a). Anhand des Versuchs (s. Kap. 3.2.1.2) konnte sowohl die aktuelle Infillmenge an fünf Punkten der Kunstrasenplätze als auch ein Mittelwert aus diesen ermittelt werden. Diese Daten konnte als Grundlage für die Infillverlustmengenbilanzierung verwendet werden.

3.2.3 Rüttel- und Schüttdichtebestimmung

Schüttdichtebestimmung

„Die **Schüttdichte** (ρ_{b0} ¹⁶ oder ρ_{Sch}) ist das Verhältnis der Masse (m) des Schüttgutes zu dem eingenommenen Schüttvolumen (V) einschließlich der Hohlräume und Poren des Schüttgutes im unkonsolidierten Zustand.“ (SHEAR-TEST.com - physical properties of bulk solids o. J.). Umgangssprachlich wird sie auch oft als Schüttgewicht bezeichnet (Stiess 2009). Die Schüttdichte wurde nach den Vorgaben der EN ISO 60 (DIN 53468) bestimmt (SHEAR-TEST.com - physical properties of bulk solids o. J.). Sie wird mathematisch definiert „[...] als das Verhältnis von der Masse der Schüttung m_{Sch} zum eingenommenen Schüttvolumen V_{Sch} “ (Formel 1) (Stiess 2009)

$$\rho_{Sch} = \frac{m_{Sch}}{V_{Sch}} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (1)$$

Zur Berechnung der Schüttdichte wurden EPDM und Kork in einen 250 mL-Standzylinder bis zur 250 mL Markierung eingefüllt. Dieses Volumen wurde als Schüttvolumen angenommen. Anschließend wurde das Gesamtgewicht des Standzylinders plus Füllung gewogen. Von diesem wurde dann das Leergewicht des Standzylinders abgezogen, um das Gewicht der Füllung zu erhalten. Die Schüttdichte konnte nun mit Hilfe der Formel (1) errechnet werden.

Rütteldichtebestimmung

„Die **Stampfdichte** (ρ_{bK}) ist definiert als die Dichte eines Schüttgutes nach der Verdichtung durch Rütteln, Stampfen oder Klopfen.“ (SHEAR-TEST.com - physical properties of bulk solids o. J.). Die Rütteldichte wird auch als Stampfdichte bzw. Klopfdichte bezeichnet, im Folgenden wird der Begriff Rütteldichte verwendet. Sie wurde nach den Vorgaben der DIN EN ISO 787-11 bestimmt. Zur Bestimmung der Rütteldichte wurde ein Standzylinder, wie bei der Bestimmung der Schüttdichte mit Infill (Kork und EPDM) bis zur 250 mL Markierung aufgefüllt und das Gewicht der Schüttung bestimmt. Anschließend wurde der gefüllte Standzylinder auf einem Stampfvolumeter (ERWEKA SVM 22) (Anhang 4.2) fixiert und die Schüttung für eine Dauer von 10 min durch 1250 Hübe verdichtet. Die Rütteldichte wurde aus dem Quotienten der gewogenen Infillmasse und dem

¹⁶ Engl. bulk density oder auch poured density genannt

nach der Stampfung vorliegendem Stampfvolumen ermittelt (SHEAR-TEST.com - physical properties of bulk solids o. J.).

Um veritable Messergebnisse zu erzielen, wurde jeweils eine Dreifachbestimmung von Stampfvolumen und Schüttdichte durchgeführt. Anschließend wurde anhand der drei Werte der Messreihen für jeden Infilltyp (EPDM, Kork, Quarzsand) das arithmetische Mittel bestimmt und daraus die Rütteldichte berechnet.

Die Bestimmung der Rütteldichte ist relevant, um das Infillverhalten auf dem KRP in Bezug auf eine Material-Verdichtung besser verstehen zu können. Durch den Spielbetrieb und durch andere Ereignisse kommt es über die Zeit zu einer Verdichtung des Kunstrasenplatzes.

3.2.4 Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometrie

Mit Hilfe eines Gaspyknometers kann das Volumen fester Körper, unabhängig von ihrer geometrischen Form, ermittelt werden. Das Verfahren wird zur Bestimmung der Dichte von Stoffen verwendet. Die Messung basiert darauf, dass die zu vermessenden Körper ihr Volumen in einem Prüfgas in einer Probenkammer verdrängen. Die Druckdifferenz des Prüfgases in der Probenkammer wird mit dem der Referenzkammer verglichen (Abbildung 15). Helium wurde in diesem Fall als Prüfgas verwendet, da es nur in sehr geringem Maße mit Feststoffen interagiert (d. h. von Festkörper adsorbiert wird). Zudem ist es sehr leicht und kann gut in poröses Material eindringen und dieses vermessen (Joachim Herz Stiftung 2022).

Die physikalische Grundlage für das Messverfahren bildet das Boyle-Mariotte-Gesetz. Dieses besagt, dass der Druck (p) idealer Gase bei gleichbleibender Temperatur umgekehrt proportional zum Volumen (V) ist. Bei Erhöhung des Drucks sinkt das Volumen, während es bei Erniedrigung des Drucks ansteigt. Die Beziehung der Variablen lässt sich durch die Gleichung 2 darstellen (Joachim Herz Stiftung 2022):

Bei $T = const$ und $n = const$ gilt:

$$p \sim \frac{1}{V} \quad p * V = const \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

Die Vorgaben und Anweisung für die Durchführung einer Gas-Pyknometrie sind der DIN 66137-2 „Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie“ zu entnehmen (DIN e. V. 2019a).

In das Heliumpyknometer (Thermo Fisher Scientific, Pyknomatik-ATC) (Anhang 4.3) wurde eine definierte Probenmenge (Kork, EPDM, Sand, KRP-Fasern) eingewogen und davon das Leergewicht des Behälters abgezogen. Anschließend erfolgte für etwa 20-40 min die Probenvolumenbestimmung (V_P), auf Grundlage die Probendichte vom Gerät errechnet werden konnte (Formel 3, 4) (Mortimer et al. 2015; Wikipedia 2020).

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad (3)$$

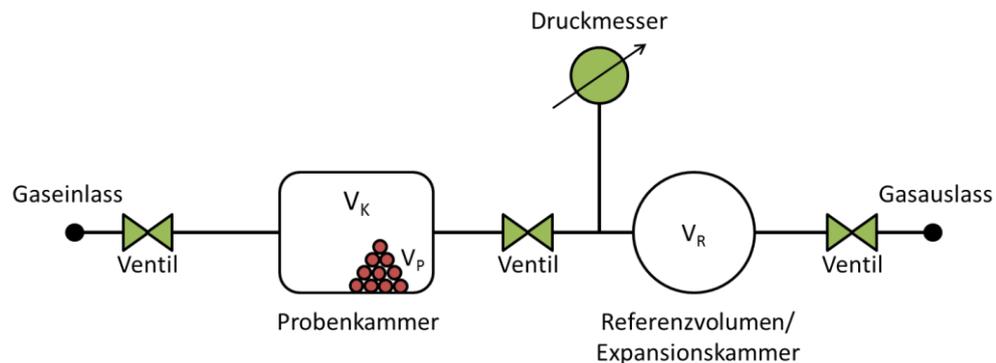


Abbildung 15: Schematischer Aufbau eines Gaspyknometers mit konstantem Volumen. Probenvolumen wird durch Druckänderung bestimmt. Formel- und Abbildungsquelle: (Wikipedia 2020) auf Grundlage von (Tamarit und Aguilar-Chávez 2005).

$$V_P = V_K + \frac{V_R}{1 - \frac{p_i}{p_e}} \quad (4)$$

V_P = Probenvolumen

V_K = Volumen der Probenkammer

V_R = Volumen der Referenz-/Expansionskammer

p_i = initialer Druck

p_e = Enddruck

3.2.5 Infill- und Partikeltransportverhalten (Luftpfad)

Das Luft-Transportverhalten von Kunstrasenplatzinfill und -fasern wurde mit Hilfe eines Windkanals simuliert und untersucht. Ziel war es, herauszufinden, ab welcher Windgeschwindigkeit unterschiedliche Infill-Typen aus dem Kunstrasenplatz abgelöst werden (Bestimmung der Ablösegeschwindigkeit). Zusätzliche Untersuchungen fanden auf einer Freifläche mit Kunstrasenmodellflächen statt. Die Versuche zum Partikeltransport lassen sich insgesamt in zwei Teilversuche untergliedern:

- 1) Windkanal - Simulation
- 2) Freifläche - Modellflächen der KRP OB und KRP OS (Maßstab 1:100)

3.2.5.1 Windkanal - Simulation

Mit Hilfe eines selbst konstruierten Windkanals wurden Windereignisse simuliert und Ablösegeschwindigkeiten [m/s] verschiedener Infill-Typen auf verschiedenen Untergründen bestimmt. Der folgende Versuchsaufbau wurde durch experimentelle Analyse anhand von vorausgehenden Vorversuchen erstellt.

Windkanalaufbau

Für den Kanalbau wurde ein 2 m langer Plexiglastunnel mit quadratischem Querschnitt von 0,2 m x 0,2 m mit einem Gebläse (Trotec, TTV 3000) verbunden (Abbildung 16, Anhang 4.4.2).

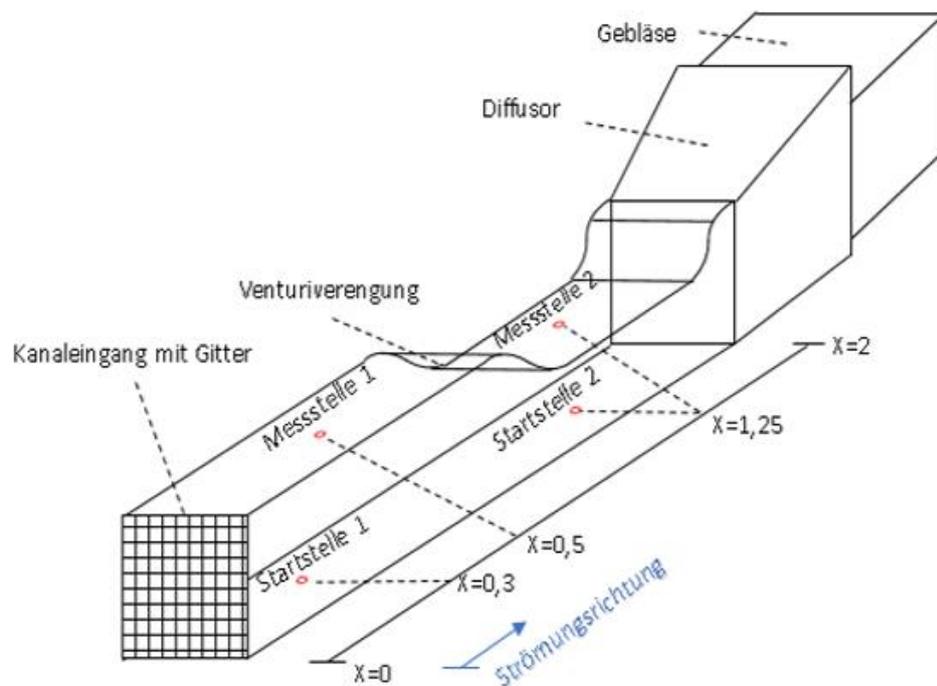


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Windkanals. Blauer Pfeil: Strömungsrichtung. Eigene Darstellung.

Die saugende Seite des Gebläses wurde an den Windkanal angeschlossen (Saugströmung). Am Kanalende wurde zusätzlich ein Sieb mit einem Metallgewebe (Maschenweite: 100 μm) als sog. Diffusor¹⁷ montiert, um die Luftströmung zu gleichmäßig zu verteilen. Für die Messpunkte der Ablösegeschwindigkeit sind in verschiedenen Abständen zum Gebläse Löcher in den Plexiglastunnel gebohrt worden (M1 = 50 cm, M2 = 125 cm). Da sich eine gleichmäßigere Strömung erst mit einem bestimmten Abstand zum Gebläse entfaltet, wurde der M1 Punkt als Hauptmesspunkt gewählt. Alle Einzelpartikel/Fasern

¹⁷ Bezeichnung eines Bauteils, welches die Strömung von Gasen oder Flüssigkeiten verlangsamt und den Druck erhöht, Umkehrprinzip einer Düse, Bohl 1998.

bis zu einer Ablösegeschwindigkeit von 7 m/s konnten hier vermessen werden. Der Messpunkt M2 wurde für von M1 nicht abgelösten Partikel/Fasern der Messstelle verwendet. Das Besondere an der M2 Messstelle ist eine eingebaute Venturi-Verengung¹⁸, die als Kanalverengung fungiert, um höhere Ablösegeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s zu erreichen. Als Messgerät für die Wind- bzw. Ablösegeschwindigkeit wurde ein Hitzdraht-Anemometer (testo 405i, Smart Probe) verwendet (Anhang 4.4.1). Hierbei bezeichnet die Windgeschwindigkeit die Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal, während die Ablösegeschwindigkeit die Ablösung eines Partikels von seinem Startpunkt beschreibt (s. Definitionen der Ablösung im Folgetext). Für die Messungen an M1 wurde das Anemometer mit einem Stativ auf einer Kanaltiefe von 10 cm fixiert. Bei den Messungen von M2 wurde aufgrund der Venturi-Verengung bei einer Kanaltiefe von 15 cm gemessen. Über einen vorgeschalteten Regler (FC 300 Flow Control, Aqua Forte) konnte die Strömungsgeschwindigkeit des Gebläses im freien Querschnitt bis max. 7 m/s, mit Verengung auf 14 bzw. 20 m/s (ohne Sieb) eingestellt werden. Am ersten Messpunkt M1 wurden die Proben von einer Startlinie auf 30 cm und bei M2 auf 125 cm vom Kanaleingang aus gestartet.

Einzelpartikel/Fasern

Mit unterschiedlichen Partikelgrößen von Kork und EPDM (> 2 mm und 0,5 bis 1 mm), KRP-Fasern (KRP OS und KRPS OB) und Styroporkugeln (Referenzmaterial, ideale Kugel) wurden für Einzelpartikel Ablösegeschwindigkeiten bestimmt. Zur Dokumentation wurden alle Messungen aufgezeichnet (Anhang 7.4.2). Ausführliche Informationen zu allen Versuchen und den eingesetzten Partikeln und Fasern sind dem Anhang 7.4 und 7.4.3 zu entnehmen. Für jede Oberfläche und jede Partikelart wurde eine eigene Messreihe mit jeweils 5 Replikaten¹⁹ erstellt (Anhang 7.4). Für die Messreihen der Fasern wurden für Osnabrück 3 x 5 Replikate und für Oberhausen 2 x 5 Replikate vermessen. Die unterschiedliche Replikatzahl ist darauf zurückzuführen, dass verschiedene Fasertypen auf den Plätzen vorkommen. Auf dem Kunstrasenplatz Osnabrück sind es drei verschiedene Fasern, auf dem KRP OB hingegen nur zwei. Für jede(s) Partikel/Faser wurden Eckdaten wie Probennummer, -gewicht, -form, -volumen, -dichte, -maße und -durchmesser aufgenommen. Die Dichte der Probenmaterialien wurde mittels

¹⁸ „Sonderform der Düse, die meist zur Durchflussmessung genutzt wird. Eine zylindersymmetrische Strömung wird durch eine kurze Verengung geführt, wobei die Verengung und die nachfolgende Erweiterung des Querschnittes so allmählich erfolgt, dass keine Grenzschichtablösung auftreten kann.“, Spektrum Akademischer Verlag 2018.

¹⁹ Wiederholung von Messergebnissen, Verfahren zur Qualitätssicherung von Ergebnissen empirisch-quantitativ arbeitender Wissenschaftsgebiete, Deutsche Forschungsgemeinschaft 2017.

Heliumpyknometrie (Thermo Fisher Scientific, Pyknomatik-ATC) (s. Kap. 3.2.4) erfasst. Zusätzlich wurden alle Einzelpartikel und Fasern mittels digitaler Mikroskopie optisch untersucht und vermessen (Keyance VHX6000) (Anhang 7.4.4). Zur Eliminierung des Wassergehalts und zur Herstellung vergleichbarer Proben wurden diese vor Verwendung im Windkanal bei 80°C im Trockenschrank über Nacht getrocknet. Um definierte Partikelgrößen aus den obigen gewünschten Fraktionsbereichen für die Versuche zu erhalten, wurden die Infill-Materialien einer Siebanalyse (s. Kap. 3.2.1.2) unterzogen.

Verschiedene Vorversuche haben gezeigt, dass die Infill-Typen auf verschiedenen Untergründen und unter der Verwendung von Barrieren andere Ablösegeschwindigkeiten aufweisen. Für den Windkanalversuch wurden deshalb drei Oberflächen variiert und die jeweiligen Ablösegeschwindigkeiten sowohl mit als auch ohne Verwendung von Barrieren (45° und 90°) verglichen.

Oberflächen

Es wurden insgesamt drei verschiedene Testoberflächen verschiedener Rauigkeit (Reihenfolge: glatt bis rau) für die Versuche verwendet:

- 1) Technikumsboden Institut²⁰
- 2) K80 Schleifpapier
- 3) K120 Schleifpapier

Von einer zunächst geplanten direkten Untersuchung auf dem Kunstrasenplatz/Kunstrasenteppich als Testoberfläche wurde abgesehen, da Vorversuche ergaben, dass die Leistung des Windkanals hierfür zu gering ist. Als Ersatz wurde das Telexperiment 2 (Freifläche- Modellflächen des KRP OS und KRP OB, s. Kap. 3.2.5.2 konzipiert.

Barrieren

Des Weiteren wurden mit allen Materialien und Oberflächen auch Versuche mit einer Metallbarriere (Höhe: 2 cm, Schräge, 2,8 cm) im Winkel von 45° und 90° im Abstand von 2 cm zu den Einzelpartikeln durchgeführt. Die Barriereversuche wurden durchgeführt, um die Schutzfunktion dieser, und den dadurch möglichen Infill-Rückhalt auf Kunstrasenplätzen zu simulieren.

²⁰ Estrich mit Kunstharzlack

Definitionen der Ablösung

Für die Einzelpartikel und Fasern wurde die Ablösung in zwei Stufen gegliedert und wie folgt definiert:

- ▶ 1. Stufe: Leichte Bewegung („zittern“), evtl. neue Ausrichtung auf dem Messpunkt; Beobachtung nicht immer möglich
- ▶ 2. Stufe: Ablösung (auch „Sprünge“) vom Messpunkt

Angenommener Gerätemessfehler

- Anemometer: $\pm 5\%$ des Messwertes + 1 Messeinheit

3.2.5.2 Freifläche- Modellflächen des KRP OS und KRP OB

Nach den baulichen Vorgaben aus der Praxis hinsichtlich Infillmenge pro m² und Platzdimension der KRPs OB und OS wurden Nachbauten im Maßstab 1:100 erstellt und mit der jeweiligen Menge an Performance-Infill und stabilisierendem Infill (Quarzsand) verfüllt (Tabelle 1). Unter den Modellflächen wurden jeweils große Kunststoffplanen verlegt, um mögliche Partikelemissionen von den Flächen beobachten zu können und die Entfernung der Partikel vom Modellplatz bei Bedarf zu bestimmen (Anhang 7.5.1). Beide Modellflächen wurden auf dem Außengelände von Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen an der Südwestseite des C-Gebäudes (entsprechend der Hauptwindrichtung von den KRPs OB und OS) installiert und für eine Zeitspanne von 12 Wochen den natürlichen lokal vorherrschenden klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Dabei lagen drei Seiten der KRPs frei und eine Seite wurde jeweils durch die Gebäudewand abgeschirmt. Die Wetterdaten der nächstliegenden Wetterstation Essen-Bredeney (Wetter.com GmbH 2022) wurden parallel für den gesamten Versuchszeitraum täglich aufgezeichnet. Es wurde die maximale und minimale Tagestemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlagsmenge erhoben (Anhang 7.5). Am Ende des Versuchs wurden die Beobachtungen auf und neben den Testflächen und eine mögliche Korrelation mit den Wetterdaten untersucht und ausgewertet. Zusätzlich zum Einfluss von Wind wurde auch der Einfluss von Wasser, in Form von Niederschlägen auf die Testflächen simuliert. Ziel war es die Infill-Emission in Abhängigkeit zu den Wetterereignissen zu erforschen und allgemeingültige Aussagen über die Einwirkung von Wind und Niederschlag auf KRPs ableiten zu können.

3.2.6 Infill- und Partikeltransportverhalten (Wasserpfad)

Durch verschiedene Treiber gelangt Kunstrasenplatz-Infill in angrenzende Entwässerungssysteme und von dort aus in Kanalsystem und/oder Gewässer. Bei diesem

Experiment stehen die Witterungseinflüsse (Wind, Niederschlag), denen der Platz ausgesetzt ist und der damit einhergehende Infillverlust im Vordergrund. Das Versuchsdesign wurde in Anlehnung an folgende Mikroplastikstudien entwickelt: „RAU -Reifenabrieb in der Umwelt“ (Venghaus et al. 2021), „Guppyfriend Waschbeutel“ (BUND für Naturschutz und Umwelt in Deutschland 2019), welche Mikroplastik Kleidungsabrieb beim Waschen verhindern sollen und „bionische Filter zur Trennung von Mikroplastik“, welche Mikroplastikpartikel $> 5 \text{ mm}$ aus dem Abwasser reduzieren können (Klärwerk.Info Bio-serve GmbH 2020; Hamann 2016). Auf Basis des Versuchs 3.2.1.2 konnte bereits die theoretische Infill-Verlustmenge (s. Kap. 3.2.2) bestimmt werden. Der Verlust an Infill und dessen Verfrachtung in den Wasserkreislauf stellt eine potenzielle Umweltbelastung dar. In diesem Teilversuch wird durch die Beprobung in ausgewählten Gitterschächten auf dem KRP OS die reale/tatsächliche Umweltbelastung von Kork-Infill-mengen in den Wasserpfad untersucht. Dieses Experiment soll aufzeigen, ob zukünftig weitergehende Forschung in diesem Themenbereich angesetzt werden soll.

3.2.6.1 Infillverlust über Entwässerungsschächte

Auf dem Kunstrasenplatz- Nahne wurden in drei von vierzehn vorhandenen Entwässerungsschächten (P1, P2, P3) auf die bereits existierenden groben Siebeinsätze zusätzlich feine Siebeinsätze installiert (Abbildung 17, Abbildung 18). Ein weiterer Siebeinsatz (P4) wurde an der Ausleitungsstelle der Saugrohre der Sammelleitung von der Platzdrainage (Einleitungsstelle in den Vorfluter, Riedenbach) montiert (Abbildung 19). Über einen Zeitraum von elf Wochen wurden wöchentliche Wetterdaten der nächstgelegenen Wetterstation Belm aufgezeichnet (wetter.com 2022). Ebenso wurden jede Woche die mit den Siebeinsätzen versehenen Schächte beprobt und das aufschwimmende Kork-Infill von der Oberfläche entnommen und in Probenahmebeutel gefüllt. Hierzu wurde ein Haushaltssieb (Maschenweite $0,5 \text{ mm}$) als „Kescher“ verwendet. Da Kork eine deutlich geringere Dichte als Wasser besitzt, konnte dieses an der Wasseroberfläche abgeschöpft werden. Bei Fraunhofer UMSICHT erfolgte eine Trocknung der Proben über Nacht bei 80 °C im Trockenschrank sowie eine anschließende Klassierung (Siebe mit den Maschenweiten: $< 2 \text{ mm}$, 1 mm und $0,5 \text{ mm}$) und die Einwaage der Proben.



Abbildung 17: Ansichtskarte der kartierten Entwässerungsschächte auf dem Kunstrasenplatz OS-Nahne. Legende gibt Auskunft über verschiedene Entwässerungsschächte. Probennahme erfolgte an den mit „X“ gekennzeichneten Schächten P1-P4.

Der Versuch wurde am 07.02.2022 gestartet und wurde am 25.04.2022 beendet. Die Wetterdaten wurden zusätzlich eine Woche vor Versuchsbeginn (Woche 0) aufgezeichnet. Vor Versuchsbeginn wurden die jetzigen Siebeinsätze der Gitterschächte vom Platzwart gereinigt und mit dem feineren Siebeinsatz bestückt. Abbildung 17 gibt Auskunft über alle beprobten Entwässerungsschächte. Die drei mit „X“ versehenen Schächte wurden für dieses Experiment ausgewählt, da sie nah am Platz liegen und stichprobenartig drei Seiten des Platzes abdecken. Es gilt besonders zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Entwässerungsschächte (P1 und P2) an der langen Nordostseite des Kunstrasenplatzes höhere Infillmengen aufweisen, da diese der Hauptwindrichtung Südwest (Tabelle 1) exponiert sind.

Aufbau kombinierter Siebeinsatz



Abbildung 18: Aufbau eines feinen Siebes. Grober ursprünglicher Siebeinsatz (links) mit Erweiterung eines feineren Siebeinsatzes. Ansicht kombiniertes Sieb im Gitterschacht (rechts). Siebeinsätze DIN 1236, Hof-sinkkasten.

Die Abbildung 18 zeigt einen unbehandelten Siebeinsatz (Maße: $d_{Innen} = 20$ cm, $d_{Außen} = 25$ cm, Tiefe: 20 cm) im Entwässerungsschacht. Für den Bau des kombinierten Siebes wurden zusätzlich ein Metallgewebe mit Maschenweite 75 μ m verwendet, welches seitlich am Siebeinsatz mit wasserfestem Klebeband befestigt wurde. Als zusätzliches Grobsieb wurde eine Kunststoff-Pflanzenzwiebelschale ($d_{Außen} = 22$ cm, $d_{Innen} = 18$ cm) verwendet, welche Fremdstoffe > 2 cm (z. B. Laub, Zigarettenstummel, Kronkorken etc.) zurückhalten sollte. So konnte Infill bis zu einer Untergrenze von 75 μ m in dem kombinierten Siebeinsatz gesammelt werden.

Die Beprobung der Einleitungsstelle in den Riedenbach (P4) wurde ausschließlich einmalig, vier Wochen nach Installation, am Versuchsende (14.04.-12.05.) durchgeführt. Hier wurde dasselbe Metallgewebe mit der Maschenweite 75 μ m verwendet. Dieses wurde mittels Kabelbinder um das PVC-Einleitungsrohr gespannt (Abbildung 19). Da die Beprobungsstelle P4 teilweise durch Regenereignisse unterhalb der Wasseroberfläche lag, war eine wöchentliche Beprobung nicht möglich. Die Probennahme und anschließende Aufbereitung erfolgten analog zur Probennahme mit den kombinierten Sieben.



Abbildung 19: Ansicht Einleitungsstelle in den Riedenbach mit Metallgewebe als Siebeinsatz und Kabelbinde zur Fixierung.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Infill-Kunstrasenplatzuntersuchungen/Monitoring

4.1.1 Recherche und Platzbegehung

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenndaten beider Kunstrasenplätze, Osnabrück und Oberhausen im Vergleich, resultierend aus den vorangegangenen Rechercharbeiten und Platzbegehungen der Kunstrasenplätze und ihrer Umgebung, dargestellt. Die ausgefüllten Formblätter der Plätze „Protokoll zur Begehung von Kunstrasenplätzen“ und detailliertere Informationen der Plätze sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

Der Kunstrasenplatz Osnabrück dient als Beispiel für einen gewässernahen Kunstrasenplatz außerhalb der Stadt und ist umgeben von einem hügeligen Relief. Er ist zudem vollständig umfriedet. Der Osnabrücker Platz ist aufgrund des verwendeten Kork-Infills ein Kunstrasenplatz der 3. Generation. Der Platz ist mit einem umweltfreundlicheren Kunststoffersatzbaustoff aus der Korkeiche (*Quercus suber L.*) verfüllt (Anhang 3) (Mansfeld's World Database of Agricultural and Horticultural Crops 2001). Als Kunstrasenmodell ist der DOMO Duraforce XSL TXT 40-11 von der Firma Domo Sports Grass verbaut worden (Domo Sports Grass 2021a). Pro Quadratmeter sind 1 kg Kork und 25 kg Quarzsand als Infill verfüllt worden. Bei dem Quarzsand wurden von drei offiziellen Stellen unterschiedliche Infillmengen genannt. Deshalb wurde ein mittlerer Wert von 25 kg/m² (Tabelle 1, Tabelle 4) angenommen (Domo Sports Grass 2021b; Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021; Heiler GmbH & Co. KG 2022b). Die jährliche Tiefenreinigung des Platzes erfolgt durch die Firma Heiler GmbH (Anhang 3). Der KRP OS besitzt insgesamt 14 Gitterschächte für die Platzentwässerung, welche sich auf drei Seiten des Kunstrasenplatzes mit Muldenrinnen verteilen. Die Nordostseite des Platzes besitzt parallel zu den Spielfeldbändern eine zweite zusätzliche Muldenrinne mit integrierten Schächten (Abbildung 17).

Der Kunstrasenplatz Oberhausen liegt innerorts und gewässerfern in einem sehr ebenen Relief und ist bis auf die offene Nordseite von drei Seiten durch Ballfangzäune und eine Mauer umfriedet. Er ist wie der KRP OS ein 3G-Modell und mit 4 kg/m² EPDM-Granulat und 20 kg/m² Quarzsand verfüllt. Als Kunstrasenplatzmodell wurde hier das Modell LigaGrass Pro 23813-8 von der Firma Polytan GmbH verbaut. Der Oberhausener Platz wurde 2019 erbaut und ist somit vom Platzalter etwa 1,5 Jahre älter und von der Fläche etwas kleiner als der KRP OS. Die durchschnittliche jährliche Platznutzung liegt beim KRP OB um 400 h/a höher, vermutlich resultierend aus der sehr zentralen Lage des

Platzes und der Nutzung durch zwei Vereine. Der Platz besitzt insgesamt 9 Ablaufschächte, welche sich auf zwei Seiten des Platzes erstrecken. Die Hauptentwässerung findet auf der Nordseite des Platzes durch die Muldenrinne und 7 integrierte Gitterschächte statt (Anhang 3).

Anhand der ersten Platzbegehungen konnte EPDM-Infill auf dem KRP OB in einer Entfernung von mehr als 5 m vom Platz und Kork-Infill auf dem KRP OS in mehr als 2 m Entfernung vom Platzumfeld vorgefunden werden (Anhang 2).

Auf den Oberhausener Platz werden ca. 1.200 kg frisches Sand-Infill pro Jahr aufgebracht, hauptsächlich in den Sechzehnmeterräumen und an den Elfmeterpunkten. EPDM-Granulat werde aus Umweltschutzgründen nicht nachgefüllt (SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021). Die jährlichen Nachfüllmengen an Kork und Sand sind beim Osnabrücker Platz unbekannt. Dies kann in den Jahren 2020 und 2021 auch mit Covid zusammenhängen. Durch den stark Covid-bedingten reduzierten Spielbetrieb war eine bisherige Auffüllung nicht notwendig.

Auf den beiden Plätzen in Oberhausen und Osnabrück ist die Hauptwindrichtung Südwest vorherrschend und beträgt im Jahresmittel bei beiden Plätzen zwischen 5,5 bis 6,1 m/s. Die Nordostseite des KRP OS und die Nordseite des KRP OB stellen somit mögliche Infillhotspots dar, da der Südwestwind das Infill vermutlich primär in diese Bereiche des Platzes befördert.

Tabelle 1: Darstellung der wichtigsten Eckdaten der Kunstrasenplätze: KRP OS und KRP OB (sofern keine weiteren Quellen genannt wurden die Daten aus Begehungsprotokollen entnommen, Anhang 2), Quellen: (Stadt OB: Fachbereich Sport (Hinz, U.) 2022) (Stadt Oberhausen 2021; STOAG Stadtwerke Oberhausen GmbH 2021; Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021)

Kunstrasenplatzdaten	KRP OB	KRP OS
Baujahr/ Platzalter	2019	2020/05
Lage	Innerorts, gewässerfern	Außerorts, gewässernah
Platzgeneration	3G	3G mit alternativem Infill
Platzbau	Bauweise A mit Elastikschiicht (EL) und Nivellierschiicht, Bau nach DIN EN 15330 und nach DIN 18035-7	Bauweise B ²¹ mit Elastischer Tragschiicht (ET), Bau nach DIN EN 15330 und DIN 18035-7
Platzmaße	90 m x 56 m (netto) 95 m x 59 m (brutto)	65 m x 105 m (netto) 68,5 m x 119,46 m (brutto)
Platzfläche	5.040 m ² (netto) 5.605 m ² (brutto)	6.825 m ² (netto) 8.183 m ² (brutto)
Anzahl Abläufe und	9 Über 2 Spielfeldseiten Nordseite Muldenrinne	14 Über 3 Spielfeldseiten, Nordöstliche Längsseite doppelte Muldenrinne

²¹ Siehe Kap. 2.3.1 Allgemeiner Aufbau

Muldenrinnen²²		
Durchschnittliche Platznutzung pro Jahr	1.815 h/a ²³ + unbekannte Nutzungsdauer durch Bevölkerung (reduziert durch Covid)	1.416 h/a ²⁴ + unbekannte Nutzungsdauer durch Bevölkerung (reduziert durch Covid)
Kunstrasentyp²⁵	LigaGrass Pro 23813-8	DOMO Duraforce XSL TXT 40-11
Performance-Infill [kg/m²] Gesamtmenge pro Platz (Nettofläche) [kg] Gesamtmenge pro Platz (Bruttofläche) [kg]	EPDM (Schüttdichte: 650 kg/m ³) ²⁶ (4 kg/m ²) ²⁷ 20.160 kg (netto) 22.420 kg (brutto)	Kork (Schüttdichte: mind. 100 bis max. 200 kg/m ³) (ca. 1 kg/m ²) ²⁸ 6.825 kg (netto) 8.183 kg (brutto)
Korngröße²⁹	0,5-2 mm	1-2 mm
Stabilisierendes Infill [kg/m²] Gesamtmenge pro Platz (Nettofläche) [kg] Gesamtmenge pro Platz (Bruttofläche) [kg]	Quarzsand (20 kg/m ²) ³⁰ 100.800 kg 112.100 kg	Quarzsand (ca. 22/25/27 kg/m ²) ³¹ Ca. 150.150 kg (netto) bis max. 180.026 kg (brutto)
Korngröße³²	0,315-0,8/1 mm	0,315-0,8/1 mm
Infill-Nachfüllmengen [kg] durch Platzpflege	ca. 1.200 kg Sand pro Jahr ³³	Keine Nachfüllung ³⁴
Entwässerung	Horizontale und vertikale Ableitung über Mischwasserkanalsystem und Versickerung in Richtung Grundwasser	Horizontale und vertikale Entwässerung in den Direktableitung in den Riedenbach und Versickerung in Richtung (vertikale Entwässerung)
Kanalsystem³⁵	Mischkanalisation Einleitung in das Klärwerk Em-schermündung (Dinslaken)	Trennkanalisation, Regenwasser wird direkt in Riedenbach eingeleitet

²² Kartierung vor Ort

²³ SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021; DFB GmbH 2022.

²⁴ Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021; Stadt Osnabrück (Remest, S.).

²⁵ Polytan GmbH (Pajak, M.) 2021; Polytan 2021.

²⁶ Heiler GmbH & Co. KG 2022a.

²⁷ Brinkmann & Deppen GbR.

²⁸ Heiler GmbH & Co. KG 2022b.

²⁹ Heiler GmbH & Co. KG 2022b, 2022a.

³⁰ Brinkmann & Deppen GbR.

³¹ Unterschiedliche Mengenangaben offizieller Quellen: Domo Sports Grass 2021b; Schimmelpfennig, Oliver R. (DomoSportsgrass) 2021; Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021.

³² Domo Sports Grass 2021b.

³³ SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021.

³⁴ Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021; Platzwart KRP OS (Peters, Udo) 2021.

³⁵ SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021; SWO Netz GmbH 2022; Stadt Osnabrück (Borm, J.) 2021.

Hauptwindrichtung³⁶ Mittlere jährliche Durchschnitts- geschwindigkeit	Südwest, > 5,75-6,00 m/s (Referenzhöhe 100 m)	Südwest, 5,5-6,1 m/s (Referenzhöhe 80 m)
---	---	---

4.2 Siebanalyse/ Partikelgrößenverteilung

Im Rahmen der Infill-Beprobung der Kunstrasenplätze sind im Folgenden die Ergebnisse dargestellt. Die Infillmengen sind zur Veranschaulichung und dem besseren Vergleich teilweise in Mittelwerten und die Infillkonzentrationen und Partikelgrößenverteilungen in Prozentwerten dargestellt.

4.2.1 Kunstrasenplatz Oberhausen (KRP OB)

Wassergehalt

Die fünf Infillproben der verschiedenen Probenahmestellen (Abbildung 13) wiesen stark unterschiedliche Trockenmassen auf (Abbildung 20). Die höchste Probenmasse wurde mit 1.417 g in der Tormitte ermittelt. An Eck- und Elfmeterpunkt betragen die Massen mit 572 g und 633 g im Vergleich dazu weniger als die Hälfte des Infillgewichts im Vergleich zur Tormitte. Auch der Wassergehalt [in Gew.-%] der Proben variierte je nach Probenahmestelle. Der höchste Wassergehalt konnte an der Mittellinie mit fast 26 Gew. % beobachtet werden. Der Wassergehalt der anderen Probenahmestellen lag zwischen 16 und 23 Gew.-% (Anhang 7.1). Eine Erklärung für die geringen Unterschiede der Wassergehaltsverteilung der Proben auf dem Kunstrasenplatz kann die Bauweise liefern, da der Platz für die Entwässerung mit einem 0,8 %-Süd-Nordgefälle angelegt wurde und somit die Höhe von der Süd- zur Nordseite leicht zunimmt (Anhang 3). Vier von fünf Probenahmestellen lagen an der Nordseite des Platzes und wiesen geringere Wassergehalte als am Punkt der Mittellinie auf. Letztere stellte die südlichste untersuchte Probenahmestelle dar und auch den höchsten gemessenen Wassergehalt des Platzes.

³⁶ Weather Spark 2021; Deutsches Windenergie-Institut (DEWI GmbH) 2012; Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen 2022; DWD 2004.

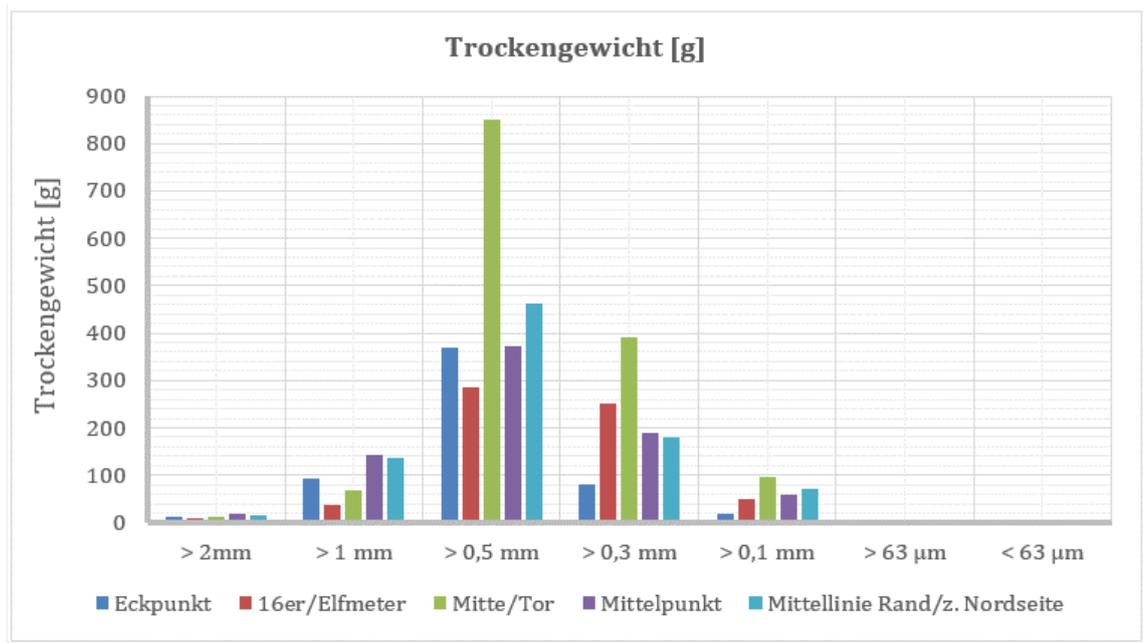


Abbildung 20: Trockengewichte [g] der Infillfraktionen der Probenahmepunkte. Alle Fraktionsbereiche vertreten. Teilweise < 1 g, deshalb nicht sichtbar.

Partikelgrößenverteilung

Bei der Siebanalyse konnte festgestellt werden, dass die größte Partikelmenge bei allen Proben im Korngrößenbereich von > 0,5 mm lag (Abbildung 20, Abbildung 21, Abbildung 22). Im Fraktionsbereich < 0,1 mm (100 µm) wurden die wenigsten Partikel nachgewiesen. Die Partikelgrößenverteilung aller Proben wiesen eine ähnliche Tendenz auf, wobei

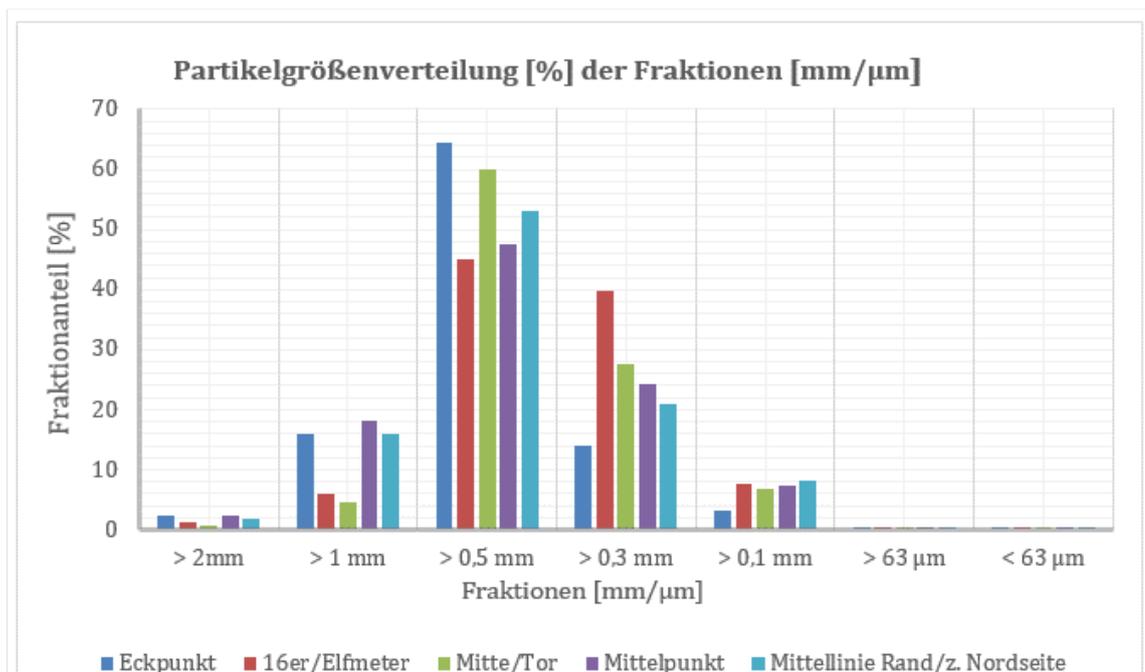


Abbildung 21: Ergebnisse der Siebanalyse. Partikelgrößenverteilung der fünf Infill-Proben.

90 % des Infills in einem Partikelgrößenbereich von $> 0,3$ mm bis $> 1,0$ mm lagen (Abbildung 21).

Frisches EPDM-Infill liegt laut Hersteller in Fraktionsbereichen von 0,5 bis 2,0 mm vor (Tabelle 1). Es konnte ein Abrieb³⁷ des Granulats bis zu einem Fraktionsbereich von > 100 μm optisch und < 63 μm mikroskopisch (Anhang 6) nachgewiesen werden. Der größte Abriebanteil ließ sich jedoch im Bereich $> 500\text{-}300$ μm feststellen.

Infillkonzentrationen

Am Eck- und Elfmeterpunkt konnte eine sehr geringe Performance-Infillmenge von < 5 % der ursprünglich an den Punkten verfüllten Menge pro Quadratmeter vorgefunden werden (Abbildung 22, Anhang 7.1). Dies liegt womöglich daran, dass hier der Platz stark beansprucht wird und laut Platzwart an diesen Stellen nur noch mit Sand aufgefüllt wird (SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021). Diese Beobachtung wird durch die höheren Sand- und niedrigen EPDM-Infillkonzentrationen [kg/m^2] in Abbildung 22 deutlich. So besteht am Elfmeterpunkt das Infill zu ca. 92 % nur aus Sand. Die höchste Konzentration von Sand wurde mit $25,23$ kg/m^2 in der Tormitte ermittelt. Dieser Wert kann wahrscheinlich auf die Beanspruchung des Torbereichs, die daraus resultierende Entfernung von Performance-Infill und das anschließende Nachfüllen mit Sand zurückgeführt werden. Die höchsten EPDM-Infillkonzentration wurden am Mittelpunkt und am Platzrand mit rund 3 kg/m^2 ermittelt. Diese Punkte repräsentieren beispielhaft die weniger beanspruchten Bereiche auf dem Kunstrasenplatz (Abbildung 22).

³⁷ „Verschleiß von Objekte als Folge des Kontakts mit anderen Körpern“, Bertling et al. 2021b.

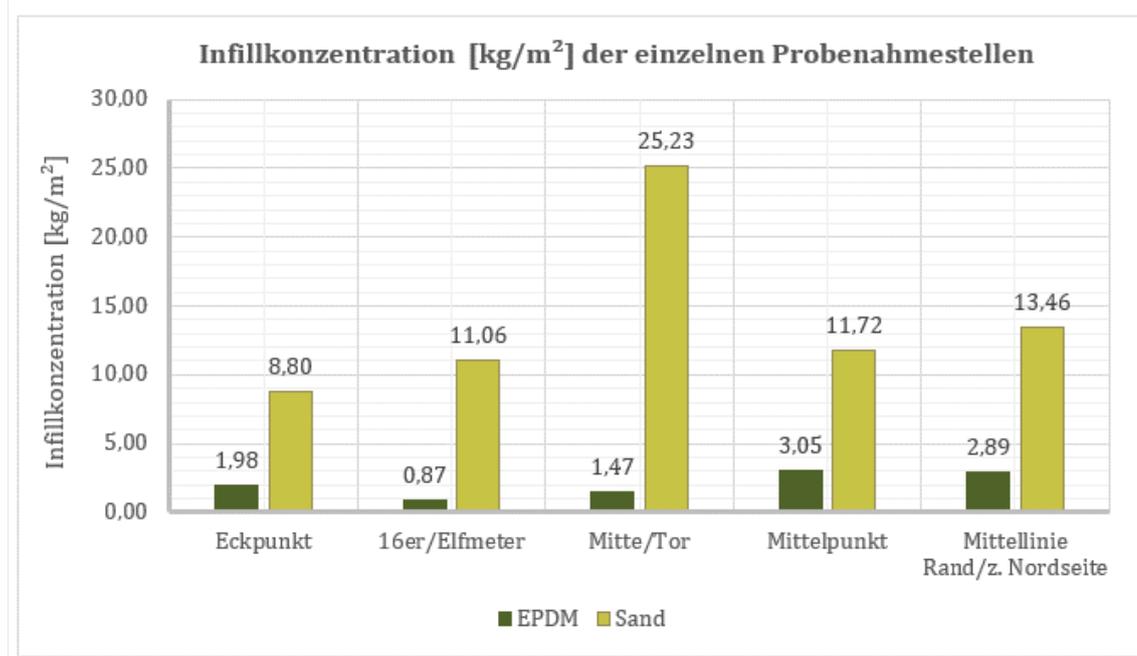


Abbildung 22: Infillkonzentrationen [kg/m²] an den Probenahmestellen, Aufschlüsselung des EPDM- und Sandgewichts.

Abschließend lässt sich sagen, dass sowohl bei Partikelgrößenverteilungen als auch bei den punktuellen Infillkonzentrationen auf dem Platz Schwankungen zu verzeichnen sind. Bei der Partikelgrößenverteilung auf die Fraktionsbereiche ist ein allgemeiner Trend zu beobachten (Abbildung 20, Abbildung 21, Abbildung 22). Bei den Infillmengen sind sehr große Konzentrationsunterschiede auf dem Platz zu beobachten (Abbildung 22). Beispielsweise weist die Tormitte eine ca. 2,5-mal höhere Infillmenge auf, als der Eckpunkt. Der Mittelwert der Infillmengen an allen fünf untersuchten Punkten beträgt etwa 16 kg/m². Vier von fünf Probenahmepunkten lagen mit der Infillmenge unter dem Mittelwert, im Bereich zwischen 10 bis 16 kg/m². Lediglich die Tormitte weist mit 26,70 kg/m² eine Infillmenge deutlich oberhalb des Mittelwertes auf. Tabelle 2 zeigt das Infillverhältnis der einzelnen Proben von Sand zu EPDM auf. Das ursprüngliche auf dem KRP verfüllte Verhältnis entsprach 20:4 oder 5:1. Die Infillproben des Mittelpunktes und die der Mittellinie Rand liegen mit ihren Verhältnissen von 4:1 und 13,5:3 noch am nächsten an diesem ursprünglichen verfüllten Verhältnis. Die größten Abweichungen zum ursprünglichen Verhältnis sind im Vergleich dazu bei der Probe Tormitte zu beobachten. Die hohen Abweichungen vom Ursprungsverhältnis resultieren aus der punktuell höheren Platzbeispielung, ungleicher Nachfüllung von Sand und dem Verzicht von EPDM-Infill auf dem Platz.

Tabelle 2: Verhältnis von Sand zu EPDM. Vergleich der Proben mit der ursprünglichen verfüllten Infillmengen. Bei Platzfertigstellung Sand: 20 kg/m², EPDM: 4 kg/m².

Sand zu EPDM	Platzfertigstellung	Eckpunkt	Elfmeter	Mitte/Tor	Mittelpunkt	Mittellinie, Rand
Verhältnis	5: 1	9:2	11:1	25:1,5	4:1	13,5:3

4.2.2 Kunstrasenplatz Osnabrück (KRP OS)

Wassergehalt

Die fünf Infill-Probenahmestellen (Abbildung 14) wiesen im Vergleich zu den Proben aus Oberhausen, geringe Unterschiede in Bezug auf ihre Trockengewichte auf (Abbildung 23). Das höchste Infillgewicht wurde an der Mittellinie außen mit 1.634 g Trockenmasse ermittelt (Anhang 7.1). Die Infillprobe vom Mittelpunkt ist mit einer Trockenmasse von 1.161 g der niedrigste Wert. Bei den drei anderen Probenahmepunkten bewegen sich die Gesamtinfillmengen in einem ähnlichen Wertebereich von 1.344-1.448 g. Auch der Wassergehalt [Gew.-%] der Proben variiert je nach Probenahmestelle. Der höchste Wassergehalt wurde am Eckpunkt mit 30 Gew.-% identifiziert. Der geringste Wassergehalt wurde hingegen am Mittelpunkt mit 20,5 Gew.-% gemessen. Der Wassergehalt der restlichen Probenahmestellen lag oberhalb von 26 Gew.-% (Anhang 7.1). Eine Erklärung für die unterschiedliche Wassergehaltsverteilung auf dem Kunstrasenplatz kann die Bauweise geben, da die Platzmitte leicht erhöht (+ 0,27 %) angelegt wurde und die Höhe zu den Platzrändern abnimmt. Dies soll einer besseren Platzentwässerung dienen (Anhang 3).

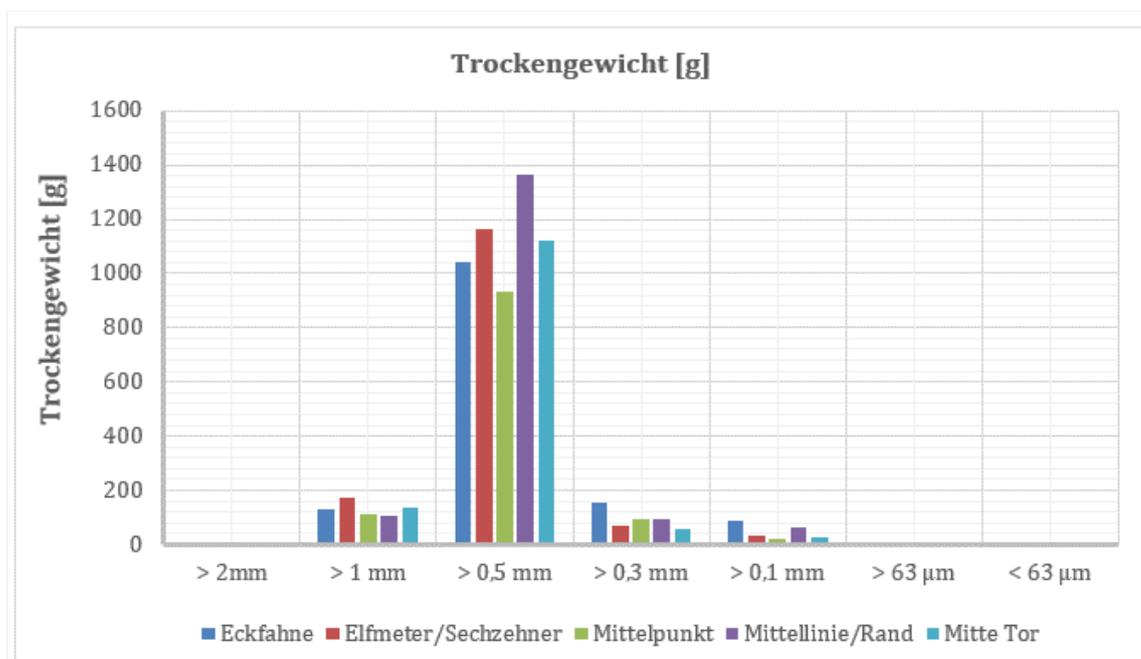


Abbildung 23: Trockengewichte [g] der Infillfraktionen der Probenahmepunkte. Alle Fraktionsbereiche vertreten. Teilweise < 1 g, deshalb nicht sichtbar.

Partikelgrößenverteilung

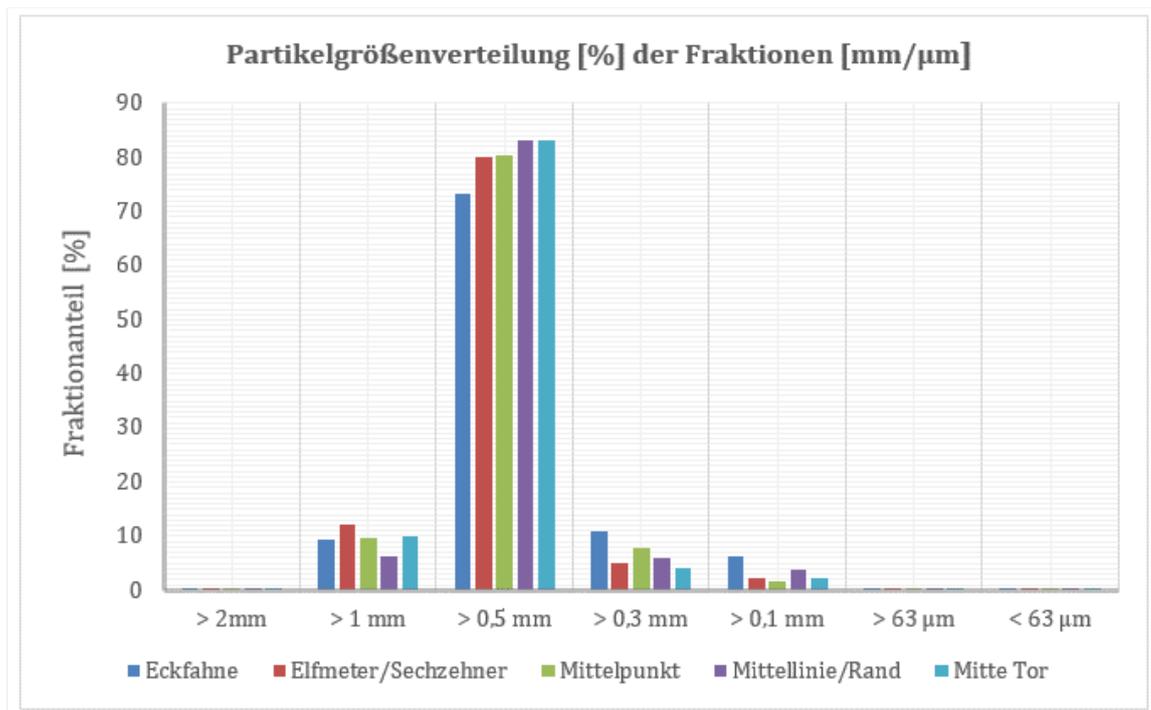


Abbildung 24: Ergebnisse der Siebanalyse. Partikelgrößenverteilung der fünf Infill-Proben.

Bei der Siebanalyse konnte verzeichnet werden, dass der größte Partikelanteil aller fünf Proben bei $> 0,5$ mm lag (Abbildung 24). Der Partikelanteil für diese Fraktion betrug zwischen 73 und 80 %. Des Weiteren wurden in den Fraktionsbereichen > 1 mm und $> 0,3$ mm die zweit- und dritthäufigsten Partikelanteile verzeichnet. Am wenigsten Partikel wurden im Fraktionsbereich $< 0,1$ mm nachgewiesen. Obwohl die Partikelgrößenverteilungen aller Probenahmestellen die gleiche Tendenz aufwies sind Schwankungen der Infillmenge pro Quadratmeter an den unterschiedlichen Probenahmestellen zu verzeichnen (Abbildung 25).

Frisches Korkgranulat liegt laut Herstellerangaben im Fraktionsbereich 1,0 – 2,0 mm (Tabelle 1) vor. Somit konnte der Abrieb des Granulats bis zu einem Fraktionsbereich von $> 0,1$ mm optisch nachgewiesen werden. Der größte Abriebanteil lässt sich jedoch im Bereich $> 1,0$ – 0,3 mm feststellen.

Infillmenge/-konzentration

Die Kork-Sand-Konzentrationen schwankten leicht und besaßen sehr ähnliche Gesamtinfillmengen pro Quadratmeter. Der höchste Unterschied in der Gesamtinfillmenge war zwischen den Proben Mittelpunkt und Mittellinie außen mit einem Wertunterschied von 29 % zu verzeichnen. Der Probennahmepunkt wies an der Mittellinie mit $30,79$ kg/m² die höchste Gesamtinfillmenge als auch Sandkonzentration aller Proben, der Mittelpunkt

hingegen mit 21,88 kg/m² die geringste Menge bzw. Infillkonzentration (Abbildung 25). Die Platzerhöhung am Mittelpunkt des Kunstrasenplatzes könnte hierbei wieder eine Erklärung für die Infillmengenverteilung auf dem Platz geben. Dadurch liegt hier wahrscheinlich ein besserer Angriffspunkt für Wind und Niederschlag vor, sodass das Performance- und stabilisierende Infill in Richtung Platzränder verteilt vorgefunden wurde. Zudem spielt die geringe Dichte von Kork hierbei eine entschiedene Rolle, da die Partikel im Vergleich zu anderen Infilltypen durch Witterungsbedingungen einfacher bewegt werden können (Bertling et al. 2021a; Südkurier GmbH 2020).

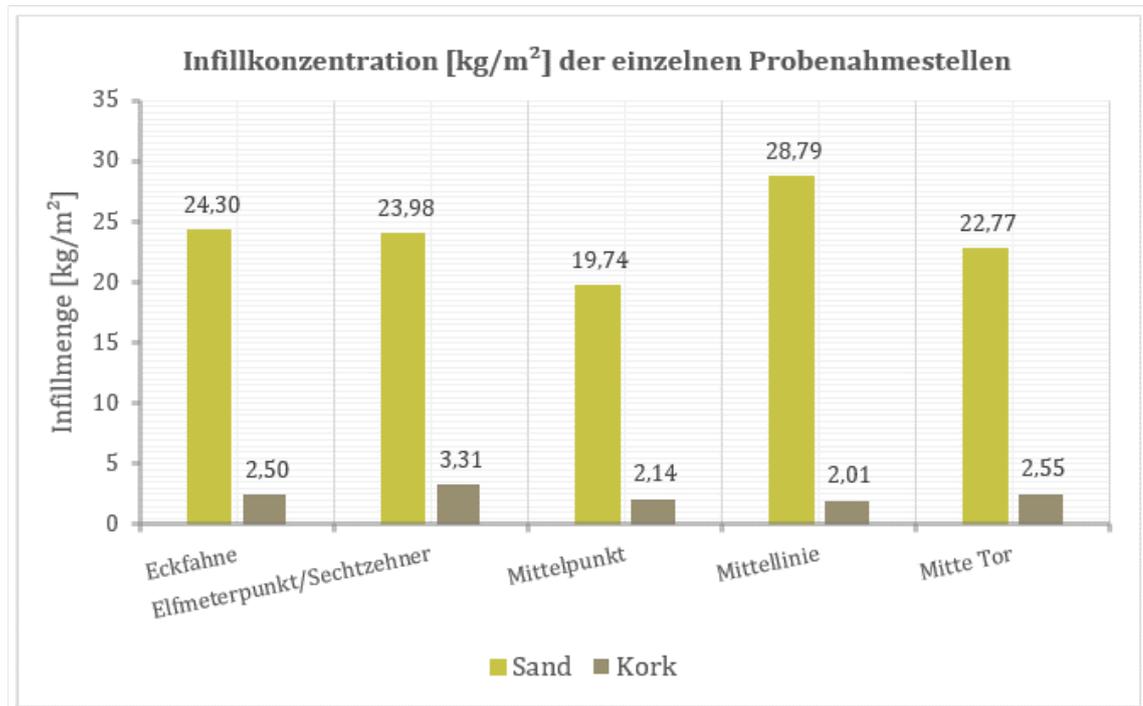


Abbildung 25: Infillkonzentration [kg/m²] an den Probenahmestellen, Aufschlüsselung des Kork- und Sandgewichts.

Abschließend lässt sich sagen, dass sowohl bei Partikelgrößenverteilungen als auch bei den punktuellen Infillkonzentrationen auf dem Platz Schwankungen zu verzeichnen sind. Bei der Partikelgrößenverteilung ist ein allgemeiner Trend auf die Fraktionsbereiche zu beobachten (Abbildung 24). Bei den Infillmengen sind geringe Konzentrationsunterschiede auf dem Platz zu beobachten (Abbildung 25). Der Mittelwert der Infillmenge an allen fünf untersuchten Punkten beträgt 26,42 kg/m². Zwei von fünf Proben lagen mit 21,88 und 25,32 kg/m² (Mittelpunkt, Mittellinie außen) der Infillmenge noch unter dem Mittelwert.

Tabelle 3 zeigt das Infillverhältnis der einzelnen Proben von Sand zu Kork auf. Das ursprüngliche auf dem KRP verfüllte Verhältnis entspricht 25:1. Die Infillproben liegen allgemein mit ihren Sandkonzentrationen nah an den ursprünglich verfüllten Verhältnissen.

Die größten Abweichungen sind bei den Proben Mittelpunkt mit 20 kg/m² und der Mittellinie mit rund 29 kg/m² zu beobachten. Die hohen Abweichungen vom Ursprungsverhältnis resultieren aus der vermutlich punktuell höheren Platzbespielung. Bei den Korkkonzentrationen aller Proben besteht ein Überschuss von 100 bis 200 % im Vergleich zur ursprünglichen Verfüllung. Eine weitere Interpretation dieser Konzentrationen erfolgt in Kap. 4.2.4 Infillverluste.

Tabelle 3: Verhältnis von Sand zu Kork. Vergleich der Proben mit der ursprünglichen verfüllten Infillmengen. Bei Platzfertigstellung Sand: 25 kg/m², Kork: 1 kg/m².

Sand zu Kork	Platzfertigstellung	Eckpunkt	Elfmeter	Mittelpunkt	Mittellinie	Mitte/ Tor
Verhältnis	25:1	24:3	24:3	20:2	29:2	23:3

4.2.3 Platzvergleich

Im Folgenden wurden beide Plätze im Hinblick auf die Siebanalysergebnisse in verschiedenen Teilaspekten miteinander verglichen, wodurch Unterschiede und Gemeinsamkeiten hervorgehoben wurden.

Gesamtinfillgewicht/Trockengewicht

Auf dem KRP in Oberhausen waren deutlich höhere Schwankungen erkennbar als auf dem KRP Osnabrück. Beispielsweise wurde an der Tormitte eine mehr als doppelt so hohe Infillmenge (in g Trockenmasse) ermittelt als am Eckpunkt. Auch beim Vergleich der Infillmengen der anderen Probenahmestellen miteinander, waren große Unterschiede zu beobachten. Die Trockenmassen unterschieden sich um 34 %. Berücksichtigt man alle Probenahmepunkte, so werden Unterschiede von bis zu 60 % deutlich. Beim KRP OS gab es hingegen nur leichte Schwankungen, was die Gesamtinfillmenge an den Probenahmestellen betrifft. Drei von fünf Werte liegen hierbei oberhalb des Mittelwertes von 1.401,82 g, die anderen beiden Werte nahe des Mittelwertes (Anhang 7.1). Unter Berücksichtigung aller Gesamtinfillgewichte waren auf dem KRP OS Massenunterschiede von maximal 29 % zu beobachten. Der Platz in Oberhausen wies somit eine doppelt so hohe Wertschwankung bei der Betrachtung der Gesamtinfillgewichte auf. Die hohen Schwankungen bestätigen ein höheres Platzalter (Bertling et al. 2021a).

Wassergehalt

Auch beim Wassergehalt waren Unterschiede zu verzeichnen. Der KRP OB besaß zum Zeitpunkt der Probennahme, unter Berücksichtigung aller Probenahmepunkte, einen mittleren Wassergehalt von 20,9 Gew.-%. Der mittlere Wassergehalt des KRP OS war mit 26,4 Gew.-% mehr als ein Viertel höher. Der KRP OS wies einen minimalen Wassergehalt am Mittelpunkt (20,5 Gew.-%) und seinen Maximalwert am Eckpunkt

(30,14 Gew.-%) auf. Beim KRP OB war dies genau umgekehrt. Der Eckpunkt stellte hier den Minimalwert (17,6 Gew.-%) dar. Der Maximalwert des Wassergehalts wurde an der Mittellinie außen (25,9 Gew.-%) festgestellt. Die Unterschiede könnten an den zeitlich vorherrschenden Witterungsbedingungen liegen. Da die Probennahme bei beiden Plätzen vormittags stattfand, kann Tau bzw. Frost (KRP OS) eine mögliche Ursache für die höheren Wassergehalte sein. Außerdem gab es an beiden Tagen der Probennahme auf den Kunstrasenplätzen keinen Niederschlag, jedoch an den Tagen davor. Weitere Ursachen könnten aus der jeweiligen Entwässerungssituation resultieren. Beispielsweise wird in Osnabrück durch die leichte Erhöhung des Mittelpunktes des Platzes (+ 0,27 %) das Oberflächenwasser zu den Eckpunkten hin abgeleitet. In Oberhausen hingegen verläuft das Platzgefälle von + 0,8 % von der langen Südseite aus Richtung lange Nordseite des Kunstrasenplatzes (Anhang 3).

Partikelgrößenverteilung

Beim Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Proben je Platz, sowie zwischen den Plätzen, wurden sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede beobachtet. Für den KRP OB wurden im Vergleich zum KRP OS höhere Schwankungen bei einzelnen Fraktionen festgestellt (Abbildung 21, Abbildung 24).

Die mengenmäßig größte Fraktion lag bei beiden Plätzen deutlich im Bereich von $> 0,5$ mm (Abbildung 21, Abbildung 24). Beim KRP OS stellte diese Fraktion an den Probenahmestellen einen Anteil von > 73 bis 80 % dar. Der Anteil beim KRP OB betrug für diesen Fraktionsbereich hingegen > 45 bis 64 %. Des Weiteren wurden für den KRP OS in den Fraktionen $> 1,0$ mm und $> 0,3$ mm die zweit- bzw. dritthäufigsten Partikelmengenanteile verzeichnet. Beim KRP OB war auffällig, dass an allen Probenahmestellen ein Partikelanteil von über 90 % im Fraktionsbereich von $0,3$ mm bis $> 1,0$ mm lag. Für beide Plätze gilt, dass grundsätzlich am wenigsten Partikel im Fraktionsbereich $< 0,1$ mm nachgewiesen wurden. Bei dieser Betrachtung wird jedoch nicht die Partikeldichte des jeweiligen Infills berücksichtigt, sondern lediglich die Anteile an den Fraktionen. Die Fraktionen > 100 μm , > 63 μm und < 63 μm der Korkproben wiesen bei der Siebanalyse zwar ein geringes Gewicht auf, dennoch waren zahlenmäßig deutlich mehr Partikel als beim EPDM-Kunstrasenplatz vorhanden. Dies resultiert aus den verschiedenen Dichten der Infilltypen. Die Dichte von Kork war mit $0,3928$ g/cm^3 deutlich niedriger als die von EPDM mit $1,5836$ g/cm^3 (s. Kap. 4.2.5, 4.2.6).

Der höhere Anteil an kleineren Partikeln durch Abrieb und die oben beschriebene ungleichmäßigere Partikelverteilung auf dem Kunstrasenplatz in Oberhausen im Vergleich zum Osnabrücker Kunstrasenplatz resultierte vermutlich aus dem etwas höheren

Platzalter (Baujahr 2019). Die Zunahme des Partikelabriebs mit steigendem Platzalter wird durch die Studie Bertling et al. 2021a gestützt. Hier wurden bei jüngeren Plätzen geringere Schwankungen und weniger Abrieb festgestellt. Der jüngere KRP OS wurde erst im Frühjahr 2020 eröffnet. Aufgrund der zusätzlichen Covid-Pandemie wurde der Platz weniger bespielt. Platzpflegemaßnahmen wie z. B. Bürste und ungleichmäßiges Auffüllen von Infill könnten außerdem eine mögliche Ursache für die vorliegende geringe Schwankung der Granulatverteilung darstellen.

Infillmenge/-konzentration

Die Massen der Infillproben wurden auf beiden Plätzen hauptsächlich durch den Quarzsand bestimmt, da der Sand im Vergleich zum Performance-Infill ein höheres Gewicht aufweist. Kork wies mit $0,3928 \text{ g/cm}^3$ eine deutlich geringere Dichte als Sand mit $2,6577 \text{ g/cm}^3$ auf und besitzt somit ein geringeres Gewicht als Sand (Anhang 7.3). Die Kork-Infillmenge betrug in allen beprobten Punkten auf dem KRP OS weniger als 1 % des Infillgewichts. Der restliche Gewichtsanteil von mehr als 99 % resultierte allein aus dem Sand. Für den KRP OB waren die Infillmengen je Probenahmestelle sehr schwankend, aber auch hier nahm der Quarzsand mit 80 % bis 93 % den größten Anteil an der Infillmenge ein. Der Anteil vom EPDM-Infill wies dem gegenüber einem Anteil von 7 % bis 20 % auf. Die Dichte für EPDM betrug $1,5836 \text{ g/cm}^3$ (Anhang 7.3). Da die Infillmenge (kg/m^2) rechnerisch eng mit der Partikelgrößenverteilung auf dem Platz und dem Gesamtinfillgewicht (g) der beprobten Punkte zusammenhängt, können auch hier die gleichen Erklärungen wie oben im Abschnitt *Partikelgrößenverteilung* als Erklärung angeführt werden. Als Begründung für den schwankenden Anteil des stabilisierenden Infills (Sand) auf dem KRP OB kann zusätzlich aufgeführt werden, dass der Platz aus Umwelt-schutzgründen nur noch mit Sand, anstatt mit EPDM-Granulat aufgefüllt wird (SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021). Daraus resultieren ebenfalls unregelmäßige Performance-Infillmengen.

Abrieb/ Digitale Mikroskopie

Da frisches Korkgranulat und EPDM-Granulat hauptsächlich im Fraktionsbereich 0,5 bis 2,0 mm (EPDM) und 1,0 bis 2,0 mm (Kork) (Anhang 3) vorliegen und nachweislich keinen Unterkornanteil $< 0,5 \text{ mm}$ besitzen, können Partikel dieser Größe als Abrieb durch Verwitterung und Spielbetrieb betrachtet werden. Dies gilt gleichermaßen für Kork und EPDM. Frischer Quarzsand befindet sich im Fraktionsbereich von 0,25 bis 1,25 mm. Der mengenmäßig größte Anteil des Kork- und EPDM-Infills befand sich in einem Größenbereich von 0,3 mm bis 1,0 mm. Mit Hilfe der digitalen Mikroskopie konnte in den Infillproben Kork und EPDM-Abrieb in der Größe von $< 63 \mu\text{m}$ nachgewiesen werden

(Anhang 6). Der Nachweis von Abrieb bestätigte die Zerkleinerung des Kunststoffgranulats und des Korks durch mechanische Beanspruchung und äußere Einflüsse. Eine weitere Ursache für den Infill-Abrieb – neben der Platznutzung (Bertling et al. 2021a) – ist die Schmirgelwirkung des Quarzsandes (Abrasion). Beide Infill-Typen waren in allen gewählten Fraktionen (2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm, 0,3 mm sowie 100 µm und (<) 63 µm) vorzufinden.

Durch die Fragmentierung des Infills, dass per Definition (s. Kap. 2.1.3.) bereits primäres Mikroplastik ist, wird durch Abrieb zusätzlich weiteres Mikroplastik frei.

In den Infillproben vom Korkrasenplatz wurden mengenmäßig deutlich mehr Partikel in den Fraktionen < 100 µm vorgefunden als beim EPDM-verfüllten Platz in Oberhausen. Dies lässt auf einen erhöhten Verschleiß und Abrieb von Kork im Vergleich zu EPDM in einer kurzen Nutzungsdauer (< 2 Jahre) schließen. Ein erhöhter Verschleiß von Kork wurde auch durch andere Studien nachgewiesen (BIR Tyre & Rubber Committee 2019; Schneider 2018). Laut der Studie von (BIR Tyre & Rubber Committee 2019) besitzt Kork nur eine Lebensspanne von 4 Jahren.

Kunstrasenfasern

Auffällig war, dass bei der Probennahme auf beiden Plätzen nur wenige Kunstrasenfasern gefunden wurden. Die Faseremission spielt im Vergleich zur Infill-Emission eine eher untergeordnete Rolle (Bertling et al. 2021a; Kerkhoff Grün - Kunst- & Rollrasen o.J.). Die Kunstrasenfasern sind fest mit dem Kunstrasenteppich verbunden – im Gegensatz zum Infill, welches als lose Schüttung auf dem Kunstrasenplatz aufliegt. Durch die Platzbespielung und -pflege werden jedoch auch Fasern ausgerissen, welche potenziell in die Umwelt emittiert werden können. Im Umkehrschluss verhindert regelmäßige Platzpflege die Emission, da ausgerissene Fasern z. B. bei der Tiefenreinigung des Platzes, direkt dem Abfall zugeführt werden (Anhang 3).

Fehlerquellen und zukünftige Forschung

Durch den hohen Wassergehalt der Infillproben bei beiden Kunstrasenplätzen kann vermutet werden, dass ein geringer Infillverlust (Granulat und Sand) durch die Überführung in verschiedene Gefäße aufgrund von Anhaftung stattgefunden hat. Ebenso verblieb ein geringer Infillanteil im Nass-Trockensauger (Anhang 4.1.4) und ein anderer Teil am Handbesen, welcher bei der Probennahme für die Infill-Überführung in andere Gefäße verwendet wurde. Das feuchte Infill blieb bei der Probenahme auch an den Schuhen haften (Anhang 4.1.3). Obwohl der Verlust gering war, galt er für jede Probe gleichermaßen und sollte daher miteinbezogen werden. Dies könnte in Zukunft minimiert werden, wenn die Probennahme an trockenen Tagen, bestenfalls im Frühjahr und Sommer

stattfindet, um präzisere Ergebnisse zu erlangen. Um die Probenahme noch aussagekräftiger zu gestalten, wäre es ebenfalls sinnvoll die Infillproben von beiden Platzhälften zu entnehmen. Ebenso sollte die Probenanzahl nach Möglichkeit erhöht werden, sodass präzisere Ergebnisse in Hinblick auf Partikelverteilung und Infillmengenverteilung innerhalb eines Platzes erzielt werden können.

4.2.4 Infillverluste

Mikroplastik-Infill gelangt auf verschiedene Art und Weise in die Umwelt (s. Kap. 2.1.6). Es wurde für beide Kunstrasenplätze eine Infillbilanzierung erstellt. Hierfür wurden die ursprünglichen Infillmengen bei Erstellung des Kunstrasenplatzes mit der Nachfüllmengen addiert (Tabelle 4) und die aktuell vorherrschende Infillmenge vom Ergebnis subtrahiert (Anhang 7.1). Pro Platz wurde so an fünf verschiedenen Stellen die aktuelle Infillmenge bilanziert. Somit konnte ein punktueller Infillverlust und -gewinn für Sand und Kork/EPDM, als auch ein mittlerer Infillverlust- bzw. -gewinn für den gesamten Platz bestimmt werden (Tabelle 5, Tabelle 6).

Tabelle 4: Grundlage Infillbilanzierung. Platzfertigstellung bis aktuelle Lage. Kunstrasenplatz OB und OS-Nahne im Vergleich. (Stadt Oberhausen 2021; Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) 2021, 2021)

Parameter	Kunstrasenplatz Oberhausen	Kunstrasenplatz OS-Nahne
Fläche KRP (brutto) [m ²]	5605	8183
Infill gesamt [kg/m ²]	24	26
Performance-Infill (EPDM/Kork) [kg/m ²]	4	1
Quarzsand [kg/m ²]	20	25
Nachfüllung jährlich Sand [kg]	1.200	unbekannt
Nachfüllung Sand jährlich [kg/m ²]	0,214	unbekannt
Nachfüllung jährlich EPDM/Kork [kg]	-	unbekannt
Nachfüllung EPDM/Kork jährlich [kg/m ²]	-	unbekannt
Nachfüllung seit 2019 bis 2021 [kg/m ²]	0,642	0
(Fertigstellung) + Nachfüllung [kg/m ²]	24,642	26

KRP OB

Beim KRP OB sind stark schwankende Infillwerte auf dem gesamten Spielfeld zu verzeichnen. Bei allen fünf Messpunkten sind Infillverluste sowohl für Sand als auch EPDM zu erkennen. Die Ausnahme bildet der Messpunkt „Tormitte“, welcher mit 4,59 kg Sand rund 9 % höher als die ursprüngliche Infillmenge lag. Es ist an dieser Stelle ein deutlicher Infillüberschuss zu verzeichnen, während an den anderen Probenahmestellen die Verlustmengen an Quarzsand zwischen 29 % (7,19 kg/m² Mittellinie) und 48 % (11,84 kg/m² Eckfahne) variierten. Der höchste Verlust betrug an der Eckfahne 11,84 kg/m². Der geringste Verlust war an der Mittellinie zu verzeichnen und betrug 7,19 kg/m². Für EPDM

wurden am Elfmeterpunkt mit $3,13 \text{ kg/m}^2$ der höchste und am Platzmittelpunkt mit $0,95 \text{ kg/m}^2$ der niedrigste Verlust vorgefunden (Tabelle 5).

Die mittlere Infillverlustmenge des KRP OB betrug für Sand $6,59 \text{ kg/m}^2$ und für EPDM $1,95 \text{ kg/m}^2$. Werden die Verluste auf die gesamte KRP Fläche (brutto) hochgerechnet, liegen diese bei 2,89 Tonnen jährlich für EPDM und bei 36,92 Tonnen für Sand. Hieraus ergibt sich ein Gesamtinfillverlust von 47,8 Tonnen/Jahr. Ein Ranking nach dem Gesamtinfillverlustmengen ergibt, dass die Tormitte die geringsten Verluste aufwies und Rang 1 besetzt. Der Eckfahnen-Messpunkt belegt mit den höchsten Verlustmengen Rang 5. Wird hingegen nur das EPDM betrachtet, so belegt der Platzmittelpunkt Rang 1 und der Elfmeterpunkt Rang 5 (Tabelle 5).

Tabelle 5: Infillbilanzierung KRP Oberhausen, von 2019 bis Oktober 2021. Rot gekennzeichnet Infillverluste (aktuelle Werte-Sollwerte). Grün gekennzeichnet Infillüberschuss (aktuelle Werte-Sollwerte). Ranking von 1 (sehr wenig Verluste/ Gewinn) bis 5 (höchsten Verluste). Angenommener Sollwert für Sand nach Platzfertigstellung und jährlicher Nachfüllung: 20,642 kg/m². Angenommener Sollwert für EPDM: 4 kg/m². Angenommener Wert für Gesamteinfill: 24,642 kg/m². Gesamtfläche KRP OB brutto: 5.605 m².

Probenahme- stelle	Sand (Soll- wert) [kg/m ²]	Sand (Ist- wert) [kg/m ²]	Differenz (=Verlust/ Gewinn) Sand [kg/m ²]	Differenz (=Verlust) [kg] mit Bezug auf KRP Ge- samtflä- che (brut- to)	EPDM (Soll- Wert) [kg/m ²]	EPDM (Ist- Wert) [kg/m ²]	Differenz (=Verlust/ Gewinn) EPDM [kg/m ²]	Differenz (=Verlust) [kg] mit Bezug auf KRP Ge- samtfläche (brutto)	Differenz (=Verlust/ Gewinn) Gesamt- infill [kg/m ²]	Differenz (=Verlust) [kg] mit Be- zug auf KRP Gesamtflä- che (brutto)	Ranking Gesamt- infill	Ranking EPDM
Eckfahne	20,642	8,80	-11,84	-66.382,94	4,0	1,98	-2,02	-11.333,85	-13,87	-77.717,79	5	3
Elfmeterpunkt/ Sechzehner	20,642	11,06	-9,58	-53.701,82	4,0	0,87	-3,13	-75,13	-12,71	-71.247,31	4	5
Mittelpunkt	20,642	11,72	-8,92	-49.994,45	4,0	3,05	-0,95	-3,81	-9,87	-55.327,79	3	1
Mittellinie	20,642	13,46	-7,19	-40.277,12	4,0	2,89	-1,11	-22,14	-8,29	-46.482,90	2	2
Tormitte	20,642	25,23	4,59	25.723,64	4,0	1,47	-2,53	-3.032,54	2,06	11.559,15	1	4
Mittelwert	20,642	14,05	-6,59	-36.926,54	4,0	2,05	-1,95	-2.893,69	-8,54	-47.843,33		

Tabelle 6: Infillbilanzierung KRP Osnabrück-Nahne von 2020 bis Oktober 2021. Rot gekennzeichnet: Infillverluste (aktuelle Werte-Sollwerte). Grün gekennzeichnet: Infillüberschuss (aktuelle Werte-Sollwerte). Ranking von 1 (sehr wenig Verluste/ Gewinn) bis 5 (höchsten Verluste). Angenommener Sollwert für Sand nach Platzfertigstellung: 25 kg/m². Angenommener Sollwert für Kork: 1 kg/m². Angenommener Wert für Gesamteinfill: 26 kg/m². Gesamtfläche KRP OS brutto: 8.183,01 m².

Probenahme- stelle	Sand (Soll- Wert) [kg/m ²]	Sand (Ist- wert) [kg/m ²]	Differenz (=Ver- lust/Ge- winn) Sand [kg/m ²]	Differenz (=Verlust) [kg] mit Be- zug auf KRP Gesamtflä- che (brutto)	Kork (Soll- Wert) [kg/m ²]	Kork (Ist- Wert) [kg/m ²]	Differenz (=Ver- lust/Ge- winn) Kork [kg/m ²]	Differenz (=Verlust) [kg] mit Be- zug auf KRP Gesamtflä- che (brutto)	Differenz (=Ver- lust/Ge- winn Ge- samt-infill [kg/m ²]	Differenz (=Verlust) [kg] mit Be- zug auf KRP Gesamtfläche (brutto)	Ranking Gesamt- infill	Ranking Kork
Eckfahne	25,0	24,30	-0,70	-5.768,79	1,0	2,50	1,50	12.267,58	0,79	6.498,79	2	1
Elfmeterpunkt/ Sechzehner	25,0	23,98	-1,02	-8.348,63	1,0	3,31	2,31	18.941,54	1,29	10.592,92	3	1
Mittelpunkt	25,0	19,74	-5,26	-43.058,49	1,0	2,14	1,14	9.356,20	-4,12	-33.702,29	5	1
Mittellinie	25,0	28,79	3,79	31.005,88	1,0	2,01	1,01	8.230,50	4,79	39.236,38	1	1
Tormitte	25,0	22,77	-2,23	-18.230,04	1,0	2,55	1,55	12.650,00	-0,68	-5.580,04	4	1
Mittelwert	25,0	23,91	-1,09	-8.880,01	1,0	2,50	1,50	12.289,16	0,42	3.409,15		

KRP OS

Beim KRP OS sind im Vergleich zum KRP OB geringere Schwankungen für Sand zu verzeichnen. Auffällig ist hier, dass bei der Betrachtung des Kork-Infills auf allen 5 Messpunkten Überschüsse zu beobachten sind. Der höchste Infillwert lag mit $2,31 \text{ kg/m}^2$ am Elfmetereckpunkt. Der geringste Wert hingegen an der Mittellinie mit $1,01 \text{ kg/m}^2$, welcher noch 1 % über dem Sollwert für die Korkverfüllung lag. Beim Sand sind die größten Verluste mit $5,26 \text{ kg/m}^2$ (21 % vom Sollwert) am Mittelpunkt und die niedrigsten Verluste am Eckpunkt mit $0,70 \text{ kg/m}^2$ (2,8 % geringer als Sollwert) festzustellen. An der Mittellinie ist der einzige Messpunkt, an welchem die Sandmenge mit $3,79 \text{ kg/m}^2$ 15 % höher lag als der Sollwert. Allgemein ist zu beobachten, dass die Sandverluste, trotz höherem Sollwert von 25 kg/m^2 im Vergleich zum Sollwert des KRP OB von 20 kg/m^2 , deutlich geringer ausfallen (Tabelle 6).

Die mittleren Mengen für den gesamten KRP OS betragen für Sand $1,09 \text{ kg/m}^2$ (Verlust) und für Kork $1,50 \text{ kg/m}^2$ (Überschuss). Wird die überschüssige Kork-Infillmenge auf die gesamte KRP Fläche (brutto) hochgerechnet, so lag diese bei 12,29 t. Die Infillverlustmenge an Sand auf dem gesamten Platz betrug 8,88 t. Somit ergibt sich ein theoretischer Infillüberschuss von 3,41 t auf dem Spielfeld. Ein Ranking nach den Gesamtinfillverlustmengen bzw. -überschussmengen ergibt, dass die Mittellinie mit einem Sand- und Korküberschuss Rang 1 erreicht und der Mittelpunkt mit sowohl Kork- als auch Sandmengen Rang 5. Bezogen auf Kork wiesen alle fünf Messpunkte einen Überschuss an Kork auf und belegen somit alle Rang 1. Vereinzelt sind bis zu doppelt so hohe Korkmengen im Vergleich zum Sollwert von 1 kg/m^2 zu verzeichnen. Alle fünf Messpunkte wiesen Korküberschusswerte auf, welche sich nicht mit den ausgeschriebenen Sollwerten vereinen lassen (Tabelle 6). Eine mögliche Begründung für die dennoch hohen Korkwerte ohne Nachfüllung ist womöglich, dass wie in den Datenkennblättern (Anhang 3) des KRP OS erwähnt, eine Schüttdichte von Kork pro Quadratmeter von mind. 100 bis max. 200 kg/cm^3 bis zu einer mind. Füllhöhe von 10 mm^{38} aufgetragen wurde. Somit ist Kork bei der Platzherstellung womöglich nach diesen Vorgaben und nicht nach der Vorgabe mit 1 kg/m^2 verfüllt worden. Der ursprüngliche Wert lag vermutlich zwischen $2,5$ und 4 kg/m^2 . Auf dem KRP OS sind zurzeit keine Nachfüllmengen von Kork oder Sand bekannt. Dies liegt vermutlich am Platzalter und an der Covid-Situation der letzten zwei Jahre, in der aufgrund der eingeschränkten Bespielung nicht nachgefüllt werden musste. Die Untersuchung zeigte ebenfalls auf, dass eine Korknachfüllung aufgrund des aktuell

³⁸ Nach Fertigstellung und nach Einspielzeit

vorliegenden Überschusses nicht notwendig ist. Es ist ratsam ggf. bestimmte Stellen wie z. B. den Elfmeterpunkt mit Sand nachzufüllen, allerdings besteht hier zurzeit im Vergleich zum KRP OB nur ein geringer Bedarf. Es sollte jedoch durch weitere Untersuchungen eine genauere jährliche Nachfüllmenge für Quarzsand und Kork abgeschätzt werden, um zukünftigem Infillverlust auf dem Platz entgegenzuwirken.

Die schwankenden Infillmengen auf dem KRP OB resultieren vermutlich aus dem bereits hohen Platzalter, sodass über die Zeit eine ungleichmäßigere Verteilung die Folge sein kann. In der Kunstrasenplatzstudie 2021 konnte dieser Zusammenhang gestützt werden (Bertling et al. 2021a). Pflegemaßnahmen, Oberflächenneigungen der Plätze und ungleichmäßiges Auffüllen können ebenfalls eine Ursache dafür sein. Je jünger hingegen der KRP, desto geringer die Infillschwankungen. Dies konnte durch die generierten Daten des KRP OS untermauert werden. Die beim KRP OB in der Tormitte vorgefundenen hohen Sandmengen entsprechen den Erwartungen, da laut Herrn Isaiasz (SBO Servicebetriebe Oberhausen, Sachgebietsleiter Sport) auf dem Platz ausschließlich mit Sand nachgefüllt werde, vor allem im Bereich der Torräume und am 11 Meterpunkt (SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. 2021). Weshalb am 11 Meterpunkt nicht ebenfalls hohe Sandmengen vorgefunden wurden, könnte an der starken Beanspruchung und der dadurch resultierenden schnelleren Umverteilung von Sand auf dem Spielfeld liegen.

Infillverlustmenge und Nachfüllmenge

Die geschätzten Infillverlustmengen von Kunstrasenplätzen liegen europaweit zwischen 18.000 und 71.105 Tonnen/Jahr. Für Deutschland liegt der Wert zwischen 6.000 bis 24.000 Tonnen/Jahr (Bertling et al. 2021a; Hann et al. 2018). Durchschnittliche Performance-Infillverluste pro Kunstrasenplatz und Jahr betragen nach Bertling et al. (2021) 2,98 Tonnen (s. Kap.1.1). Dieser Verlust muss durch Auffüllen mit Granulat wieder ausgeglichen werden, um eine gute Bespielbarkeit des Platzes zu gewährleisten und Verdichtungseffekten auf dem Platz entgegenzuwirken. Unklar ist, was die Hauptursache des Infillverlustes ist. Lassen et al. (2015) und Kole et al. (2017) kommen zu der Erkenntnis, dass nur die Hälfte des nachgefüllten Infills auf den eigentlichen Granulatverlust zurückzuführen ist und der Rest auf Effekte der Infillverdichtung.

Im Allgemeinen sollten die Infill-Nachfüllmengen auf die durchschnittlichen Infillverluste eines Platzes abgestimmt sein. Dennoch geht aus KRP Untersuchungen hervor, dass die Nachfüllmengen meistens zu niedrig angesetzt sind und oftmals noch unterhalb der tatsächlichen Infillverlustmenge liegen (Bertling et al. 2021a). Eine durchschnittliche Nachfüllmenge für Performance-Infill liegt bei 2,68 Tonnen/Jahr (Bertling et al. 2021a).

Zurzeit wird auf dem KRP OB nur etwa 1,2 Tonnen/Jahr nachgefüllt, welches einer flächenbezogenen Menge von 0,214 kg/m² entspricht. Diese Menge kann die errechneten Infillverluste des Platzes für EPDM von 2,89 t und für Sand von 36,92 t nicht ausgleichen. Insbesondere, wenn laut den Angaben von Herrn Isaiasz (SBO Servicebetriebe Oberhausen, Sachgebietsleiter Sport), keine weitere Nachfüllung von EPDM aufgrund von ökologischen Aspekten hinzukommt. Die Infillverlustmenge des KRP OB liegt somit sehr nah an der durchschnittlichen ermittelten Infillverlustmenge von 2,98 Tonnen/ Jahr für Performance-Infill (Bertling et al. 2021a). Da der KRP OB aufgrund von ökologischen Aspekten nicht mehr mit EPDM verfüllt wird, ist es ratsam eine höhere Nachfüllung von Quarzsand in Kombination mit Alternativinfill wie z. B. Kork vorzunehmen, die mindestens den jährlichen Verlust an Performance-Infill ausgleicht und die positiven Spieleigenschaften des Platzes gewährleistet. Ggf. sollte durch weitere Untersuchungen eine genauere jährliche Nachfüllmenge für Quarzsand und Kork ermittelt werden.

Nach Verschoor et al. (2021) liegt der jährliche Infillaustrag eines Kunstrasenplatzes bei 600-1.200 kg (Verschoor et al. 2021) (Anhang 8). Hieraus lässt sich eine jährliche Nachfüllmenge von rund 1.000 kg jährlich pro Kunstrasenplatz ableiten, die die Infillbedarfe bzw. Infillverluste durch Verdichtungseffekte, Infillaustrag auf befestigte Oberflächen und in Entwässerungsschächte ausgleichen. Durch die Anwendung verschiedener kombinierter Maßnahmen wie optimierte Entwässerungsbedingungen, Aufstellen von Verhaltensregeln für die Platznutzung, Bewusstseinsbildung von Platznutzern, regelmäßige Wartung und einer sachgemäßen Entsorgung bzw. Rückbau von ausgedienten Plätzen kann der Granulatverlust nahezu auf null reduziert werden (Verschoor et al. 2021).

Obwohl bereits in vereinzelt Studien wie (Regnell 2019; Verschoor et al. 2021; Hann et al. 2018) versucht wurde, Aussagen über Infillmengen sowie über den Transport und Verbleib von Infill zu tätigen, müssen diese kritisch betrachtet werden, da die Probenahme- und Analysemethoden dieser Studien oftmals nicht identisch waren, was den Vergleich der Studien untereinander erschwert. Zukünftig wäre es sinnvoll, weitere Studien im Hinblick auf den Infillverlust mit identischer Methodik durchzuführen. Optimal wäre dies direkt nach Kunstrasenplatzfertigstellung und folgend über die weitere Lebensdauer eines KRPs. So kann die Aussagekraft erhöht werden und die Entwicklung der Infillverteilung und -verluste des Platzes exemplarisch im zeitlichen Verlauf dargestellt werden.

4.2.5 Rüttel- und Schüttdichtebestimmung

Die höchste Schüttdichte konnte beim Quarzsand mit 1.476 g/L ermittelt werden. Der geringste Wert hingegen wurde beim Kork-Infill mit 142 g/L verzeichnet. Zwischen beiden Werten liegt die Schüttdichte von EPDM mit 737 g/L (Anhang 7.2). Die gleiche

Reihenfolge lässt sich auch bei den Werten der Rütteldichte beobachten. Bei Quarzsand ist sie mit 1.509 g/L am höchsten, während Kork die geringste Rütteldichte von 149 g/L aufweist. Die Rütteldichte von EPDM liegt mit 796 g/L erneut zwischen beiden Werten (Anhang 7.2). Literaturwerte für die Schüttdichte von EPDM liegen bei 650 kg/m³ (Heiler GmbH & Co. KG 2022a). Bei Kork ist die Schüttdichte variabel und je nach Anforderung verschieden (Heiler GmbH & Co. KG 2022b). Die Literaturwerte der Schüttdichte von Quarzsand liegen zwischen 1400-1600 kg/m³ (EVERS GmbH & Co. KG 2022).

Aus den experimentellen Untersuchungen lässt sich erkennen, dass je stärker ein Material durch Einstampfen verdichtet werden kann, desto höher wird der Wert der Rütteldichte. Die vorhandenen Hohlräume im Materialgemisch können durch kleinere Partikel ausgefüllt werden und das Volumen sinkt, wobei die Masse konstant bleibt. Durch die Volumenabnahme durch den Rüttelvorgang und der gleichbleibenden Masse liegt die Rütteldichte immer über dem Schüttgewicht. Es ist zu beobachten, dass je stärker ausgeprägt die Verdichtung (Volumenverringern) ist, desto weiter liegen die Werte der Schüttdichte und Rütteldichte auseinander. Dieses Phänomen lässt sich an den ermittelten Werten für Kork belegen. Hierbei ist die größte Änderung zwischen der Schüttel- und Rütteldichte zu verzeichnen und somit auch die größte Volumenänderung durch den Rüttelvorgang. An zweiter Stelle folgt EPDM und die geringste Volumenänderung erfolgte beim Sand, da dieser aufgrund der bereits sehr geringen Partikelgröße kaum weiter verdichtet werden konnte. Alle Hohlräume im Sand-Gemisch sind schon nahezu komplett ausgefüllt, sodass kaum eine Volumenänderung stattfinden kann.

Auf den Kunstrasenplatz kann somit übertragen werden, dass Sand als stabilisierendes Infill mit der Zeit nur einer sehr geringen Volumenänderung unterliegt. Bei Performance-Infill sollte für das Auffüllen eines Kunstrasenplatzes beachtet werden, dass ein höherer Bedarf notwendig ist, der im Laufe der Zeit aus Platznutzung und Verdichtung resultiert (Anhang 7.2).

4.2.6 Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometrie

Mit Hilfe des Helium-Pyknometers wurde das Probenvolumen bestimmt. Anhand von Formel 2 konnte die Materialdichte der Proben (EPDM, Kork, Sand, Styropor und KRP Fasern) bestimmt werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnisse im Vergleich. Dichtebestimmung mittels Helium-Pyknometrie. Genauere Ergebnisse: s. Messprotokolle (Anhang 7.3).

Material	Dichte [g/cm ³]
Kork > 2mm	0,385
Kork (Korngrößengemisch)	0,3928
Kork 0,5-1mm	0,4335
Kork klassiert 0,5-2mm	0,4342
EPDM > 2mm	1,5952
EPDM (Korngrößengemisch)	1,5836
EPDM 0,5-1mm	1,5983
EPDM klassiert 0,5-2mm	1,5709
Sand (Korngrößengemisch)	2,6577
Styropor > 2 mm ³⁹	0,0459
KRP Fasern OB	1,1305
KRP Fasern OS	1,1135

Die Analyse hat eine Dichte von 1,5836 g/cm³ für das EPDM-Kunststoffgranulat (Korngrößengemisch) und für Kork (Korngrößengemisch) eine Dichte von 0,3928 g/cm³ ergeben. Größere und kleinere Fraktionen von EPDM und Kork wiesen ähnliche Werte auf. Die Dichte von Sand betrug 2,6577 g/cm³. Die KRP Fasern von OB, OS und Styropor wiesen Dichten von 1,1305 g/cm³, 1,114 g/cm³ und 0,0459 g/cm³ auf (Tabelle 7) (Anhang 7.3). Die Dichte der Kunstrasenfasern lag in einem ähnlichen Wertebereich, dennoch sind die Werte je nach Kombination verschiedener Faserarten leicht unterschiedlich. Die durchschnittliche Dichte der Kunstrasenfasern betrug 1,0738 g/cm³ (+/- 0,009). Kork wies eine mittlere Dichte von 0,4113 g/cm³ (+/- 0,023) auf, EPDM hingegen 1,587 g/cm³ (+/- 0,0108). Die verschiedenen Partikelgrößen besitzen nur geringe Dichteunterschiede, was sich an der Standardabweichung ablesen lässt. Die Partikelgröße der einzelnen Materialien hat nur einen geringen Einfluss auf die Dichte. Es spielt keine Rolle, ob die Proben klassiert oder unklassiert vorliegen. Es ist somit keine klare Tendenz der Dichteänderung in Abhängigkeit der Partikelgröße zu beobachten und lässt sich daher eher auf Messungenauigkeiten zurückführen.

Folgende Literaturwerte konnten für die Dichten der unterschiedlichen Materialien gefunden und größtenteils nachgewiesen werden: Sand 1,6 g/cm³ (EVERS GmbH & Co. KG 2022). Kork von 0,2 bis 0,3 oder 0,48 bis 0,52 g/cm³ (Formel-Sammlung.de & DUDEN PAETEC GmbH 2022; Wikimedia Foundation 2005). EPDM 1,6 g/cm³ (Heiler

³⁹ Relevant für Windkanalversuche

GmbH & Co. KG 2022a). Styropor 0,02 bis 0,06 g/cm³ (Kunststoff-Schweiz o. J.). Lediglich bei der Dichte von Sand lag der Literaturwert unterhalb dem, der mit der Helium-Pyknometrie ermittelt wurde. Dies könnte sich vermutlich auf unterschiedliche Korngrößen im Sand zurückführen lassen. Auch die ermittelte Dichte von Kork stimmt nicht mit dem Literaturwert überein, dies lässt sich jedoch damit begründen, dass Kork in der Dichte grundsätzlich sehr variabel ist und je nach Bedarf angepasst werden kann (Heiler GmbH & Co. KG 2022b).

4.2.7 Infill- und Partikeltransportverhalten (Luftpfad)

4.2.7.1 Windkanal Simulation

Anhand der Windkanalversuche konnte eine folgende Ablösegeschwindigkeitsreihenfolge der Partikel auf verschiedenen Oberflächen abgeleitet werden: K80 > K120 > Technikumsboden (Abbildung 26). Je größer die Testoberfläche in den Versuchen, desto höher ist in der Regel auch die Ablösegeschwindigkeit. Es konnte zudem beobachtet werden, dass sich die Ablösegeschwindigkeit durch den Einsatz der 45° oder 90° Barriere, bis auf wenige Ausnahmen, erhöht hat. Beim Einsatz der 90° Barriere waren allgemein die höchsten Ablösegeschwindigkeiten zu verzeichnen. Zwischen den großen und kleinen Korkpartikeln ist auf den getesteten Oberflächen meist ein Unterschied in der Ablösegeschwindigkeit von etwa 1 m/s festzustellen. Bei den Partikelgrößen von EPDM liegt der Unterschied deutlich über 1 m/s.

Tabelle 8: Beispielhafte Darstellung der Ablösegeschwindigkeiten verschiedener Materialien auf Technikumsboden ohne Barriere. Ablösegeschwindigkeiten stellen jeweils Mittelwerte der Messreihen (Anhang 7.4.1) dar.

Material	Ablösegeschwindigkeit [m/s]
Kork > 2 mm	1,86
Kork 0,5 – 1 mm	2,50
EPDM > 2 mm	5,06
EPDM 0,5 – 1 mm	4,54
Styroporkugeln > 2 mm	0,82

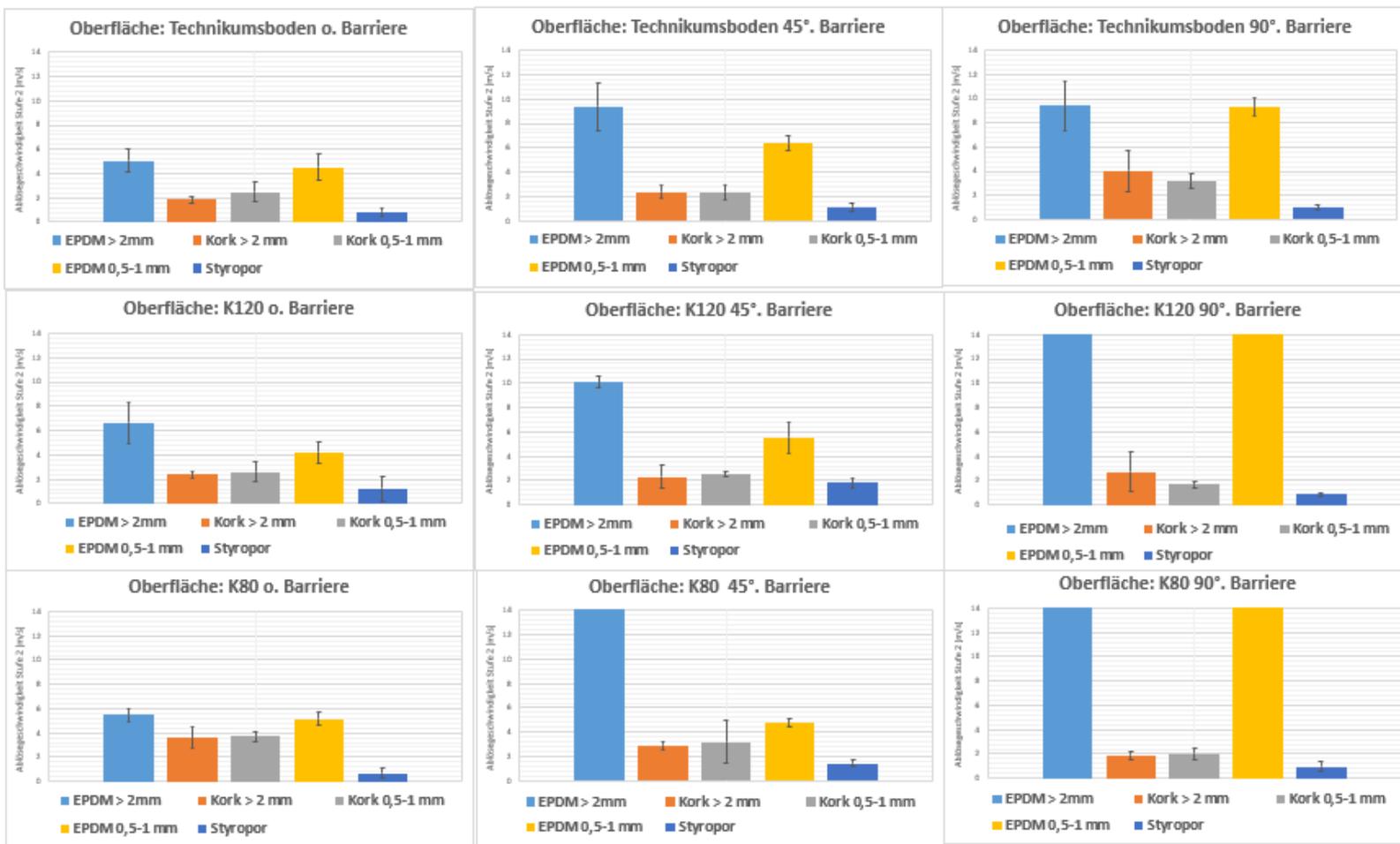


Abbildung 26: Übersicht der mittleren Ablösegeschwindigkeiten [m/s] verschiedener Materialien auf 3 verschiedenen Oberflächen (Technikumsboden, K80, K120) jeweils ohne Barriere, 45° und 90° Barriere im Vergleich. Messreihen als Datengrundlage mit je [n]=5 (Anhang 7.4). Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Bei nicht abgelösten Partikeln wurde eine Ablösegeschwindigkeit > 14 m/s angenommen. In diesem Fall Standardabweichung nicht angegeben.

Die Ablösung von großen Korkpartikeln erfolgte bei geringeren Geschwindigkeiten als bei den kleineren Korkpartikeln. Bei den EPDM Partikeln ist ein gegenteiliger Trend zu beobachten (Tabelle 8). Dies könnte vermutlich bedeuten, dass im Fall von Kork der Angriffsfläche eine bedeutendere Rolle zukommt als die Faktoren Reibung (Haftung) und Gewicht. Bei EPDM ist dies genau andersherum.

Die Ablösegeschwindigkeit für Styropor (Referenzmaterial einer idealen Kugel) war immer am niedrigsten und wies bei allen Oberflächen die wenigsten Schwankungen auf. Beim Einsatz von Barrieren lag sie immer bei einer Ablösegeschwindigkeit von etwa 1 m/s (Abbildung 26).

Durch die Analyse der aufgezeichneten Videodokumentationen aller Partikel im Windkanal (Anhang 7.4.2) konnte festgestellt werden, dass die Partikel eher die schräge 45° Barriere passieren als die 90° Barriere. Das Passieren der Barrieren geschah jedoch in den meisten Fällen nicht. Zudem ist nur teilweise eine stufenweise Ablösung der Partikel zu verzeichnen. Die erste Stufe „zittern“ wird meist übersprungen und es erfolgt die direkte Ablösung (Stufe 2) der Partikel. Bei der Ablösung der glatten KRP Fasern war zum Teil eine Änderung der Ausrichtung vor Ablösung im Vergleich zu den gekräuselten KRP Fasern zu beobachten (Anhang 7.4.2). Da unterschiedliche Fasern innerhalb eines Kunstrasens verbaut wurden, konnte durch die Wahl einer Replikanzahl von 5 Fasern (pro Faserart und KRP) ein Mittelwert für die Faserablösung für die Plätze OB und OS berechnet werden (Anhang 7.4.). Dennoch konnte bei der Ablösung der Fasern in den Versuchen beobachtet werden, dass die Fasern des KRP OS eine leicht höhere Ablösegeschwindigkeit aufweisen als die des KRP OBs. Dies liegt womöglich daran, dass bei diesem Kunstrasenplatz drei verschiedene Fasertypen verbaut wurden, in Oberhausen dagegen nur zwei. Es konnte ebenfalls beobachtet werden, dass glatte Fasern im Allgemeinen eher abgelöst wurden als gekräuselte Fasern. Die Struktur bzw. Form der Fasern hat somit Einfluss auf die Ablösegeschwindigkeit. Gekräuselte Fasern werden durch ihre Struktur durch die Strömung vermutlich eher ausgebremst. Je nach Prozentanteil am Vorkommen von glatten oder gekräuselten Fasern auf dem KRP kann es somit zu leicht unterschiedlichen Ablösegeschwindigkeiten kommen. Ein zusätzlicher Einflussfaktor könnte ebenfalls die Faserdichte sein, welche bei den beiden Plätzen nicht identisch war (s. Kap. 3.2.4).

Wurden Partikel an der Messstelle 1 (M1) nicht abgelöst, so wurden sie an Messstelle 2 (M2) bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten vermessen. Es konnte bei den Versuchen festgestellt werden, dass die Ablösegeschwindigkeiten von M2 zum Teil unrealistisch erschienen, da sie teilweise unterhalb der Strömungsgeschwindigkeiten von M1 lagen. Dabei konnten bei M2 deutlich höhere Geschwindigkeiten von 7 bis 14 m/s

erreicht werden. Eine mögliche Erklärung dafür kann eine instabilere Strömung und somit schwankende Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal sein. Da das als Diffusor (Strömungsverlangsamer/-vergleichmäßiger) eingesetzte Sieb am Kanalende nur eine bestimmte Reichweite besitzt, wird die Strömung nach der Messstelle 1 wieder ungleichmäßiger.

Anhand der Versuchsergebnisse konnten erste Vermutungen über die Einflussfaktoren der Ablösegeschwindigkeit abgeleitet werden. Die Geometrie/Partikeloberfläche, sowie Bodenoberfläche und Einsatz von Barrieren konnten als primäre Einflussfaktoren im Hinblick auf die Ablösegeschwindigkeit abgeleitet werden. Als sekundäre Einflussfaktoren sind Partikelgewicht, -dichte und -volumen zu nennen, die in einem engen mathematischen Zusammenhang zueinanderstehen.

Die Datengeneration für diesen Teilversuche erfolgte in Zusammenarbeit mit der laufenden Bachelorarbeit von Benita Naumann, Fraunhofer UMSICHT (2022). Eine weitere Auswertung der Daten und deren Zusammenhänge erfolgt in der Bachelorarbeit: „Untersuchung zu partikulären Emissionen von Kunstrasenplätzen - Strömungstechnisches Verhalten von Kunstrasenplatz-Infill“.

Die dargestellten Varianzen der Messreihen (Abbildung 26) zeigen zusätzlich, dass unterschiedliche Ablösegeschwindigkeiten innerhalb einer Messreihe zu verzeichnen sind, die vermutlich auf die Geometrie/Partikeloberfläche und Ausrichtung im Windkanal zurückzuführen sind. Alle anderen Versuchsbedingungen, bis auf leichte Gewichtsveränderungen aufgrund der Verwendung von anderen Partikeln sind konstant geblieben. Es lässt sich vermuten, dass je näher die Partikel an einer idealen Kugelform liegen, wie z. B. beim Styropor, desto eher ist die Ablösung bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten als bei anderen Formen des jeweiligen Materials möglich. Außerdem zeigen Partikel mit geringerer Dichte wie Styropor und Kork kaum Unterschiede der Ablösung in Bezug auf ihre Partikelgröße, Partikelgewicht, -dichte und -volumen an. Dies unterstreicht den Aspekt, dass die Partikelgröße und -Partikelgewicht bei leichten Stoffen eher eine sekundäre Rolle spielen.

Das kleinere Korkpartikel eine höhere Ablösegeschwindigkeit besitzen als größere könnte daraus resultieren, dass diese von der Strömung aufgrund der Bodennähe nicht angegriffen werden können oder diese in Totpunkten der Strömung liegen.

Durch die Versuche konnte bestätigt werden, dass eine Barriere um den KRP Platz herum in Form von Zinkblenden, wie z. B. auf einem untersuchten Schweizer KRP in der Fraunhofer UMSICHT Studie (Bertling et al. 2021a) sinnvoll ist, um Infill und Fasern zurückzuhalten bzw. die Ablösegeschwindigkeit des Infills dadurch zu erhöhen. Am besten

geeignet sind dafür jedoch 90° Barrieren, die mindestens eine Höhe von 2 cm aufweisen sollten.

Über den Transport von Kunststoffgranulat und die damit verbundenen quantitativen Infillverluste über den Windpfad liegen bisher keine ausreichenden Forschungsberichte vor. Somit stellt diese Studie einer der ersten Ansätze in diesem Forschungsbereich dar. Das Phänomen des Infilltransports sollte in Zukunft verstärkt erforscht werden. Es liegen außerdem nur wenige Studien mit unzureichenden Daten über den Infillverlust durch Pflege- und Wartungsarbeiten mit Laubbläsern und die Verbreitung in der Umwelt vor. Aufgrund der Größe und spezifischen Dichte von z. B. ELT-Granulat ($1,16 \text{ g/cm}^3$) als Performance-Infill wird davon ausgegangen, dass ein Transport durch Wind unwahrscheinlich ist (Verschoor et al. 2021). Dies könnte im übertragenen Sinne ebenfalls für EPDM ($1,5836 \text{ g/cm}^3$) gelten. Dieser Versuch zeigt jedoch, dass gerade einzelne Partikel bereits geringere Ablösegeschwindigkeiten besitzen und Infill in verfüllten Kunstrasenplätzen deutlich höheren Windgeschwindigkeiten standhalten können. Einzelne Partikel werden durch die Bespielung, Wartung- und Platzpflege auf umliegende befestigte Flächen transportiert. Einzeln vorliegend können sie durch geringe Windgeschwindigkeiten in die Umwelt transportiert werden (Bertling et al. 2021a). Bodenpartikel besitzen mit $1,8$ bis $3,8 \text{ g/cm}^3$ im Vergleich eine höhere Dichte als KRP Infill und werden bereits bei Windgeschwindigkeiten von 5 m/s erodiert (BMEL 2019). Mit zunehmender Bodentrockenheit nimmt auch die Abtragungsgefährdung zu. Bei Windgeschwindigkeiten von $> 4,5 \text{ m/s}$ steigt allgemein das Erosionsrisiko in Abhängigkeit der Größe der Bodenpartikel an (Wurbs und Steininger 2017). Auf dieser Grundlage und der Grundlage des Versuchs ist definitiv von einem Infillaustrag auszugehen.

4.2.7.2 Freifläche- Modellflächen des KRP OS und KRP OB

Die dargestellten Testflächen (Abbildung 27) wurden über einen Zeitraum vom insgesamt 3 Monaten beobachtet. Die wöchentlichen Wetterdaten der nächstgelegenen Wetterstation, Essen – Bredeney, sind im zeitlichen Versuchsverlauf dargestellt (Abbildung 28). Die Windgeschwindigkeit, Temperatur und Niederschlagsmengen sind für den gesamten Zeitraum aufgetragen. Die täglich aufgezeichneten Wetterdaten sind Anhang 7.5 zu entnehmen.



Abbildung 27: Ansicht der KRP Modelltestflächen vor dem C-Gebäude von Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen. Ausrichtung in Südwestlicher Windrichtung. Testflächen wurden mit Steinen an den Rändern der Planen stabilisiert.

Während des Untersuchungszeitraums konnte ein breites Spektrum verschiedener Wetterbedingungen wie starker Sturm (Orkan, ab 120 km/h oder 33 m/s⁴⁰), Schneefall und hohe Niederschlagsmengen, auch trockene, windstille Tage erfasst werden (Abbildung 28). Trotz der unterschiedlichen Wetterbedingungen blieben die Testflächen nahezu unverändert. Es wurden nur vereinzelt Infillpartikel auf den Planen in bis zu 69 cm (EPDM), aber größtenteils bis 34 bis 40 cm (Kork, EPDM) Entfernung vorgefunden (Anhang 7.5.1).

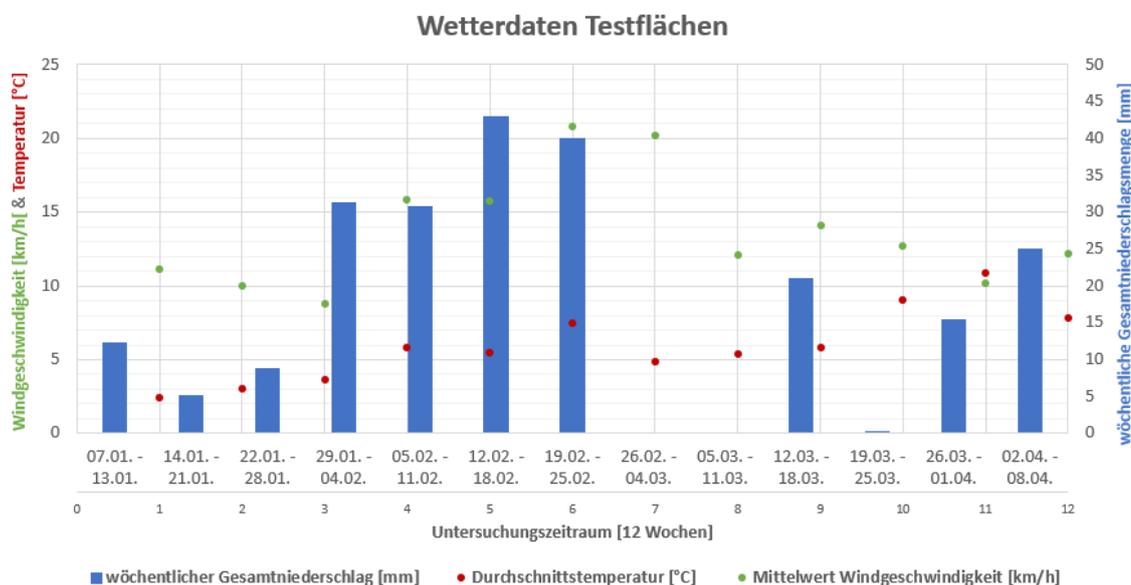


Abbildung 28: Darstellung der wöchentlichen Wetterdaten während des Untersuchungszeitraums. Niederschlag - aufsummierter wöchentlicher Gesamtniederschlag. Temperatur und Windgeschwindigkeit – Mittelwerte. Datengrundlage: tägliche Wetterdaten der Wetterstation Essen-Bredeneß (Wetter.com GmbH 2022) (Anhang 7.5). Woche 0, Witterungsbedingungen vor Versuchsbeginn.

⁴⁰ Wetterdienst 2022.

Am 18.02. (Orkans Zeynep) in der 5. Woche wurden die höchste Tagesdurchschnittsgeschwindigkeit von 27,7 km/h gemessen (Anhang 7.5). Ebenfalls in der Woche wurde die höchste Niederschlagsmenge von 43 mm aufgezeichnet und die höchste wöchentliche Durchschnittsgeschwindigkeit betrug 20,86 km/h (Abbildung 28). Trotz der hohen Niederschlagsmengen und Windgeschwindigkeiten konnte auf den Kunststoffplanen der Testflächen genauso wenig Infill gefunden werden, wie in den Wochen zuvor oder danach. Die geringste zu verzeichnende Windgeschwindigkeit während des Versuchs war mit 8,8 km/h in Woche 2. Durch den Schneefall am 01.04. (5,6 mm) und das anschließende Abtauen wurde in den darauffolgenden Tagen beobachtet, dass ein großer Teil des Kork Infills von der Testfläche abgeschwemmt wurde und danach in gefüllten Wasserkühen an der Wasseroberfläche aufschwamm. Bei der EPDM-Testfläche ergab sich durch den Schneefall keine Veränderung. Allerdings konnte hier in Woche 12 beobachtet werden, dass durch die Kombination von einer durchschnittlichen Windstärke von 17,8 m/s und einer Gesamtniederschlagsmenge von 25 mm deutlich mehr EPDM Partikel an die Seitenränder der Fläche abgeschwemmt wurden (Anhang 7.5, Anhang 7.5.1). Diese Beobachtung resultierte vermutlich durch die hier aufsummierten Wassermengen in den Kühen der Plane. Generell ist die Abschwemmung von Kork-Infill bei hohen Niederschlagsmengen deutlich höher im Vergleich zu EPDM, welches sich auf die geringe Dichte zurückführen lässt (Südkurier GmbH 2020; Bertling et al. 2021a).

Durch diesen Teilversuch konnte nachgewiesen werden, dass der Faktor Bespielung/Platznutzung bei der Freisetzung von Infill in die Umwelt zusätzlich zu den Faktoren Wind und Niederschläge eine große Rolle spielt. Diese Annahme wurde bereits in der Studie von (Bertling et al. 2021a) diskutiert und kann durch diese Studie gestützt werden. Abschließend ist zu sagen, dass beide Infillvarianten in verfüllten Kunstrasenplatzsystemen gegenüber verschiedensten Witterungsumständen sehr beständig sind. Bei Kork besteht dagegen ein höheres Abschwemmrisko bei erhöhten Niederschlagsmengen.

Wetterdaten

Die gemittelte Windgeschwindigkeit über den gesamten Versuchszeitraum von Januar bis April entsprach 14,2 km/h. Von Oktober bis April wurden in den letzten Jahren in Oberhausen durchschnittlich 16,7 km/h gemessen (Weather Spark 2021; WINDY.APP o. J.). Die gemittelte Windgeschwindigkeit entspricht mit leichten Abweichungen etwa den typischen Windgeschwindigkeiten für die Untersuchungsmonate.

Die Niederschlagsmenge in Oberhausen liegt bei durchschnittlich 73,47 mm pro Monat über den gesamten Untersuchungszeitraum. Im Vergleich zu den Literaturwerten von

monatlich 40-60 mm für die Monate Januar bis April (Weather Spark 2021) kann für dieses Jahr ein erhöhter Niederschlag für den Versuchszeitraum abgeleitet werden.

Fehlerquellen

Während des Versuchs kam es teilweise durch den starken Wind dazu, dass die ausgelegten Planen über die Testflächen wehten und täglich wieder neu befestigt werden mussten. Für zukünftige Versuche sollten bessere Fixierungsmethoden gewählt werden, da sonst der Versuch gestört wird. Eine weitere Fehlerquelle für den Versuch bildete die Umlegung der Testflächen am 03. Februar. Die Flächen mussten aufgrund von baulichen Maßnahmen am Institut um ein paar Meter von einer vorher ebenmäßigen Betonfläche auf eine unebene Rasenfläche verschoben werden. Problematisch war hier das Rasenwachstum, welches Unebenheiten unter den Testflächen verursachte. Für ein Folgeexperiment sollte nach Möglichkeit darauf geachtet werden, dass die Testflächen auf derselben Fläche verweilen, die nach Möglichkeit eben und wasserdurchlässig ist, sodass keine Plane verwendet werden muss, die das Wasser aufstaut. Der Ober- und Unterbau eines Kunstrasenplatzes ist in der Praxis auch wasserdurchlässig. Um die Aussagekraft über die Infillverluste zu erhöhen, sollte bei einem Folgeexperiment darauf geachtet werden, dass die Modellflächen mit Infillverfüllung vor Versuchsbeginn und -ende gewogen werden. Beizubehalten im Folgeversuch sind maßstabsgetreue Plätze mit realen Infillmengen, welche einen realen Bezug auf den Kunstrasenplatz ermöglichen.

4.2.8 Infill- und Partikeltransportverhalten (Wasserpfad)

Die aufgezeichneten Infillmengen und Wetterdaten während des gesamten Versuchs sind in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt. Während des Versuchs konnten viele verschiedene Witterungsbedingungen im Zusammenhang mit der Infillverlustmenge in den drei ausgewählten Entwässerungsschächten aufgezeichnet werden. Wie auch bereits beim Testflächen-Versuch (3.2.5.2 Freifläche- Modellflächen des KRP OS und KRP OB) wurden bei trockenem, windstillem Wetter, als auch bei hohen Niederschlagsmengen und starkem Sturm (Orkan) Proben entnommen.

Während des Versuchszeitraums stieg die wöchentliche Durchschnittstemperatur um etwa 5 °C (Versuchsbeginn bei 5,07 °C und Versuchsende bei 10,38 °C) an. Sie fiel nur in Woche 3, 4 und 8 auf einen geringeren Wert unterhalb von 5° C zurück. Woche 8 stellt mit einer wöchentlichen Durchschnittstemperatur von 3,36° C den tiefsten Punkt und Woche 10 mit 11,13°C den höchsten Punkt im Versuchszeitraum dar. Die höchste Tagesdurchschnittstemperatur von 13,9 °C wurde ebenfalls in der 10. Woche erreicht (Abbildung 30 D).

Die höchsten wöchentlichen Niederschlagsmengen wurden in Woche 0, 2 und 8 aufgenommen und erreichten in der zweiten Woche mit 51,5 mm ihr Maximum. Während des gesamten Versuchszeitraums fiel bis auf die Wochen 4 und 7 immer etwas Niederschlag. Die höchste Tagesniederschlagsmenge wurde in Woche 2 mit 19 mm erfasst (Abbildung 30 B).

Die höchsten wöchentlichen Durchschnittswindgeschwindigkeiten wurden in den Wochen 0, 1, 2 und 9 erfasst. Der Maximalwert mit wöchentlich durchschnittlich 31,77 m/s wurde in Woche 2 aufgezeichnet. Ebenso wurde die höchste Tagesdurchschnittswindgeschwindigkeit von 39,1 m/s (Orkan Zeynep) in Woche 2 gemessen. Woche 7 stellte mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 5,59 m/s den geringsten Wert dar (Abbildung 30 A).

Bei Betrachtung der Infillmengen ist auffällig, dass die höchste Infillmenge immer an Probenahmestelle P1 verzeichnet werden konnte. Der höchste Werte lag hier bei 10,20 g in Woche 1 und der geringste mit 0,37 g in Woche 10. Im Allgemeinen lagen die geringsten Infillmengen immer an Probenahmestelle P3 vor. Der Höchstwert lag hier mit 0,35 g in Woche 7 und der niedrigste bei 0,01 g in Woche 3. P2 lag mit den ermittelten Infillmengen im Bereich zwischen P1 und P3, jedoch deutlich unterhalb von P1. Bei P2 lag der Höchstwert von 0,47 g in Woche 2 und der geringste Wert mit 0,07 g in Woche 7 (Tabelle 9, Abbildung 30 C).

Durch die unterschiedlichen Infillmengen in den Schächten lässt sich nachweisen, dass vermutlich die Hauptwindrichtung, Platzkonstruktion, Entwässerungssituation und speziell die Platzneigung vom Mittelpunkt hin zu den Seiten, eine zusätzliche entscheidende Rolle zu den Treibern Wind, Niederschlag und Bespielung darstellen. P1 wurde deshalb für die Beprobung ausgewählt, da der Südwestwind (Hauptwindrichtung) hier auftrifft. Auch P2 liegt noch sehr nah an der Hauptwindrichtung. P3 hingegen liegt hinter dem Torraum, im Nordwesten des KRP OS, und ist nicht in Hauptwindrichtung exponiert. Die Nordostseite des KRP OS ist durch einen hohen Wall windgeschützt, während die restlichen Platzseiten umzäunt und teils von Bäumen umgeben sind. Die beprobten Gitterschächte P1 und P2 liegen am Fuß des Walles, während P3 direkt am Zaun und Bäumen im Nordwesten des Platzes liegt. Der Bereich vor dem Wall an der Nordostseite des Platzes ist aufgrund des Südwestwindes mit hohen Infillmengen (temporäre Senke) zu rechnen, da der Wall für den Wind als Barriere dient.

Parameterdarstellung im Versuchszeitraum

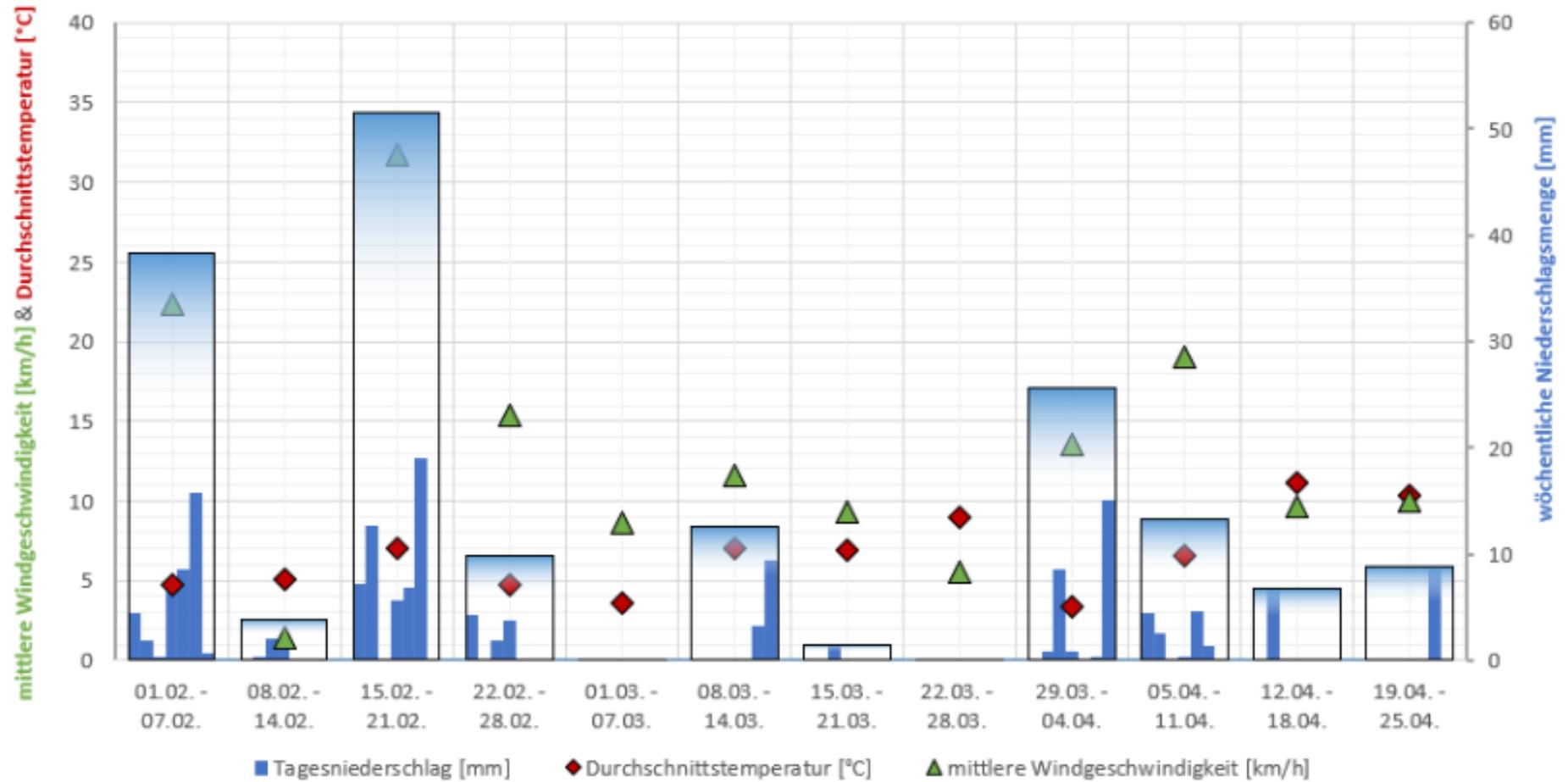


Abbildung 29: Parameterdarstellung im Untersuchungszeitraum. 01.02.-07.02. bezeichnet Woche 0, die Woche vor Versuchsbeginn. Dreiecke und Rauten stellen jeweils Datenpunkte von Mittelwerten dar. Balken stellt wöchentlichen Gesamtniederschlag mit den jeweiligen Einzelniederschlagsmengen dar. Rohdaten (Anhang 7.6).

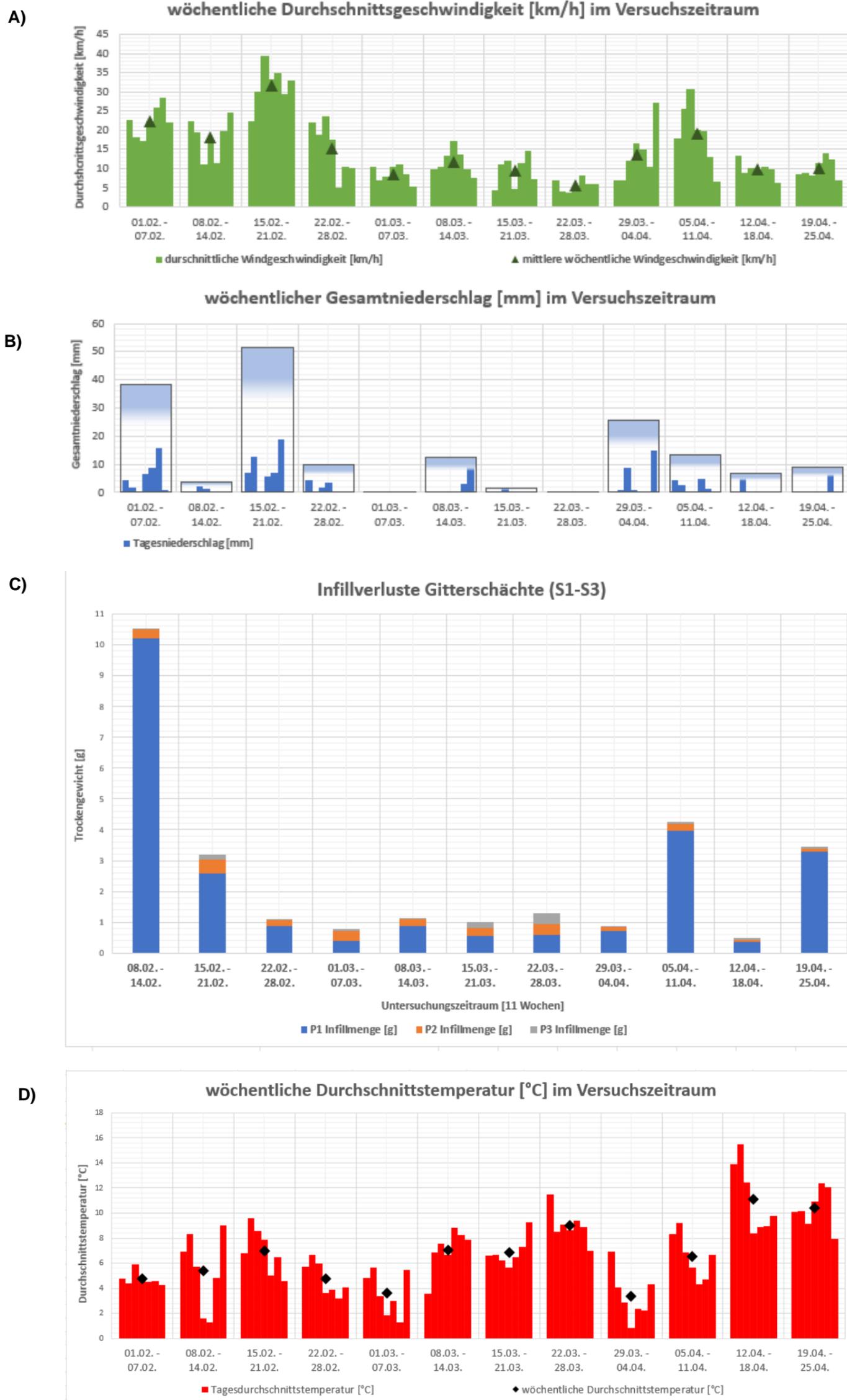


Abbildung 30: Parameterdarstellung im Untersuchungszeitraum. A) Darstellung der wöchentlichen Durchschnittsgeschwindigkeit. B) wöchentlicher Gesamtniederschlag. C) Infillverluste der Gitterschächte (P1-P3). D) wöchentliche Durchschnittstemperatur. 01.02.-07.02. bezeichnet Woche 0, die Woche vor Versuchsbeginn. Dreiecke in Abb. A und Rauten in Abb. D stellen jeweils Datenpunkte von Mittelwerten dar. Rohdaten (Anhang 7.6).

Beim Vergleich der Wetterdaten und Infillmengen wird deutlich, dass in den Wochen 0, 1, 2, 8 und 9 sowohl die höchsten Wind- und Niederschlagsmengen als auch die höchsten Infillmengen an Kork in den Entwässerungsschächten erfasst wurden. In Woche 8 war der Niederschlag etwas höher als in Woche 9, während es bei der Windgeschwindigkeit genau andersherum war. Woche 9 war sehr stürmisch (orkanähnlich) und erreichte mit durchschnittlich 19 m/s ähnlich hohe Windgeschwindigkeiten wie in Woche 0 mit 22,4 m/s und Woche 1 mit 18,04 m/s. Bei der Kombination von hohen Niederschlagsmengen und Windgeschwindigkeiten wurden ebenfalls hohe Infillmengen, besonders im P1 Schacht, vorgefunden. Bei geringeren Niederschlagsmengen, und hohen Windgeschwindigkeiten wie in Woche 9 konnten ebenfalls ähnlich hohe Infillmengen gefunden werden. Nur bei hohen Niederschlagsmengen und geringerer Windgeschwindigkeit, wie in Woche 8, war die Infillmenge in den Schächten nicht deutlich höher. Diese Beobachtung würde unter Vorbehalt implizieren, dass sowohl die Niederschlagsmenge als auch Wind Treiber des Infillverlusts sind. Ab einer gewissen Niederschlagsmenge spielt der Niederschlag im Vergleich zum Wind jedoch eher eine untergeordnete Rolle (Abbildung 30). In der Studie Breibarth et al. 2022 konnte eine Korrelation zwischen Niederschlagsmenge und Infillmenge in den Abläufen vorgefunden werden, welche den Einfluss von Niederschlag auf die Infillmenge nochmals unterstreicht.

Auch die Bespielung stellt einen treibenden Faktor in Bezug auf den Infillverlust dar. Diese ist bis zur 7. Woche mit wöchentlich 33 Stunden ein konstanter Faktor. Ab Woche 8 bis 11 reduziert sich die Bespielung aufgrund des Beginns der Sommersaison auf 11,5 Stunden pro Woche (Anhang 3). Da in Woche 9 aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten in Kombination mit Niederschlag und reduzierter Bespielungszeit trotzdem Infillmengen von 4,25 g (Tabelle 9) vorgefunden werden konnten, zeigt dies, dass die Bespielung zwar ein wesentlicher Faktor ist, vermutlich ähnlich wie der Niederschlag ab einer gewissen Menge eine untergeordnetere Rolle spielt. Wind kristallisiert sich anhand der Untersuchungen in Kombination mit anderen Treibern als der Haupttreiber für den Infillverlust über die Entwässerungsschächte heraus. Der Teilversuch mit den KRP-Modellflächen zeigt jedoch, dass ausschließlich Wind und Niederschlag ohne Bespielung keinen großen Einfluss auf die Infillverlustmenge haben. Die Testflächen konnten vielen Extremwetterlagen standhalten und es haben sich nur sehr geringe Mengen an Infill herausgelöst (s. Kap. 4.2.7.2). Dass die Nutzungsintensität mit der ausgetragenen Infillmenge in die Schächte korreliert, konnte ebenfalls in der Studie von Breibarth et al. 2022 nachgewiesen werden.

Die hohe Infillmenge in Woche 1 von insgesamt 10,52 g in allen Schächten lässt vermuten, dass eine Verzögerung beim Infilltransport in die Schächte besteht und sich damit

entsprechend die Wetterlage aus Woche 0 auf den Transport auswirkt. Das Infill wurde vermutlich bereits in Woche 0 in die Muldenrinnen transportiert und erreichte in Woche 1 die Entwässerungsschächte. Auch in Woche 8 und 9 lässt sich die Theorie der Verzögerung als mögliche Ursache annehmen. Die höheren Niederschlagsmengen und Windgeschwindigkeiten wurden im Vergleich beider Wochen in Woche 8 erreicht. Die Bespielung ist gleichgeblieben. Eine ähnliche Überlegung wurde auch von Breitbarth et al. 2022 aufgestellt, die vermuteten, dass das Infill direkt in die Schächte transportiert wird oder zunächst in den Muldenrinnen verbleibt, bis dieses niederschlagsbedingt wieder ausgewaschen wird.

Anhand der Abbildung 30 können mögliche „Normalzustände“ an Infillverlust abgeleitet werden. Beispiele hierfür wären die Wochen 4 und 7, in denen kein Niederschlag gefallen ist und Windgeschwindigkeiten bis max. 8,67 m/s wöchentlich erreicht wurden. Die Gesamtinfillmengen aller Schächte lagen in Woche 4 bei 0,80 g und in Woche 7 bei 1,30 g, wobei in Woche 7 der P3 Schacht seinen Maximalwert an vorgefundenem Infill aufwies (Tabelle 9). Die Ursachen hierfür sind möglicherweise umgestellte Tore im Torraum, welcher zu dieser Zeit intensiver bespielt wurde. Diese Beobachtung konnte während einer Probenahme auf dem KRP OS beobachtet werden. Auch in der Studie von Breitbarth et al. (2022) konnten Infillinträge ohne Niederschlag dokumentiert werden, welches laut der Studie für eine Effektüberlagerung mehrerer Treiber spräche.

Lediglich die höheren Infillmengen im P1 Schacht von 3,29 g in Woche 11 können durch die Bespielung oder extreme Niederschlag- und Windeinflüsse nicht erklärt werden. Da die Schächte P2 und P3 nur sehr geringe Infillmengen vorwiesen, könnte die Infillmenge in P1 möglicherweise durch die Bespielung von privaten Personen resultieren (Abbildung 30).

Abschließend lässt sich sagen, dass der allgemeine Einfluss der untersuchten Treiber in folgender Reihenfolge definiert werden kann: Wind > Niederschlag/Bespielung > Temperatur. Die Kombination der Treiber ist entscheidend, beispielsweise kommt es ohne Bespielung zu keinem hohen Infillaustrag (s. Kap. 4.2.7.2). Die Temperatur spielt nur in Punkto Feuchtigkeit des Kunstrasenplatzes eine Rolle, da diese zusammen mit der Niederschlagsmenge darüber entscheidet, wie viel Infill an den Spielern (Schuhen, Kleidung) haften bleibt und vom Spielfeld ausgetragen wird. Bei einem feuchten Spielfeld haftet mehr als doppelt so viel Granulat an Schuhen und Kleidung an als bei trockenen Bedingungen (Verschoor et al. 2021).

Nach vier Wochen Versuchslaufzeit konnte ebenfalls die Einleitungsstelle P4 beprobt werden. Optisch konnte hier kein Kork-Infill nachgewiesen werden. Anstatt der

ursprünglichen elf Wochen Versuchslaufzeit, wie bei den Schächten P1-P3, musste hier ein abweichender Zeitraum gewählt werden, da sich aufgrund ändernder Wasserstände des Baches das Metallgewebe abgelöst hatte. Infolgedessen wurde dieses erneut am 14.04. befestigt und am 12.05. hinsichtlich Infill-Rückstände begutachtet. Im Versuchszeitraum erfolgte kein Infillaustrag von P4 über Entwässerungsschächte in das Gewässer. Vermutlich sammelt sich das Kork-Infill ausschließlich in den unterirdischen Drainagerohren des Kunstrasenplatzes an. Dies würde bedeuten, dass die tatsächliche Infillmenge, welche das Gewässer auf diese Weise erreicht, nahezu Null entspricht. Für mehr Aussagekraft sollte das Experiment in einer Folgeuntersuchung für einen längeren Zeitraum wiederholt werden, um mögliche Einträge in die aquatische Umwelt auf diesem Weg ausschließen zu können. Ebenso wäre es ratsam, diese Untersuchung auf mehreren Plätzen mit unterschiedlichem Infill und Entwässerungssituationen durchzuführen.

Tabelle 9: Infillverluste der Gitterschächte P1-P3 im Versuchszeitraum. Dunkelblaue Werte kennzeichnen jeweils die Maximal- und hellblau hervorgehobene Werte die Minimalwerte. Gleiches gilt für orange unterlegte Daten, welche sich auf die Gesamtinfillmenge aller Schächte bezieht.

Versuchszeitraum	P1 Infillmenge [g]	P2 Infillmenge [g]	P3 Infillmenge [g]	Infillmenge Schächte gesamt [g]
1. Woche	10,20	0,30	0,02	10,52
2. Woche	2,58	0,47	0,16	3,21
3. Woche	0,89	0,18	0,01	1,08
4. Woche	0,39	0,34	0,07	0,80
5. Woche	0,88	0,22	0,04	1,15
6. Woche	0,56	0,26	0,19	1,01
7. Woche	0,58	0,37	0,35	1,30
8. Woche	0,73	0,12	0,02	0,87
9. Woche	3,98	0,23	0,05	4,25
10. Woche	0,37	0,07	0,05	0,49
11. Woche	3,29	0,10	0,08	3,47
Summe nach 11 Wochen	24,46	2,65	1,05	28,15
Mittelwert pro Woche	2,22	0,24	0,10	2,56
Summe pro Jahr ⁴¹	115,61	12,54	4,94	133,09

Nach elf Wochen Versuchslaufzeit konnte in den drei beprobten Entwässerungsschächten, von insgesamt 14 Entwässerungsschächten auf dem Platz, eine Gesamtinfillmenge von 28,15 g Kork vorgefunden werden. Dabei wurden 87 % des Infills am P1 Schacht entnommen, welche der Hauptwindrichtung Südwest exponiert war. Die durchschnittliche wöchentliche Infillmenge aller Schächte betrug 2,56 g. Ausgehend von den Werten

⁴¹ Mittelwert hochgerechnet auf 52 Wochen (1 Jahr)

der drei Schächte lässt sich eine jährliche Infillmenge von 128,15 g für den Wasserpfad über die Entwässerungsschächte errechnen. Die restlichen 11 Schächte des KRP OS können in die Hochrechnung nicht miteinbezogen werden, da die Infillmenge je nach Lage des Schachts auf dem KRP individuell sehr stark schwankt. Ausgehend von der höchstmöglichen jährlichen Infillmenge vom P1 von 115,61 g hochgerechnet auf alle 14 Schächte könnte unter Vorbehalt (ändernde Bespielung und Witterungsbedingungen) eine maximale Infillmenge von 1,62 kg abgeleitet werden. Die ermittelte Infillmenge pro Feld würde den bereits ermittelten Werten von anderen Studien, max. 2 kg/a (Verschoor et al. 2021), 4 bis 5 kg/a (Weijer et al. 2017) oder 0,3 kg/a bis maximal 14,5 kg/a (Breitbarth et al. 2022) nahekommen.

Methoden- /Ergebnisvergleich mit anderen Studien

Im Methodikvergleich mehrerer bisher durchgeführten Studien wurden große Unterschiede in der Methodik deutlich, die den anschließenden Ergebnisvergleich erschweren. Beispielsweise haben Verschoor et al. (2021) den Schlamm aus Entwässerungsschächten von zwei Kunstrasenplätzen und insgesamt 28 Schächte beprobt. Jedoch wurden zwei Plätze unterschiedlicher Ausgangszustände, verschiedenen Alters, Anzahl der Schächte und Reinigungssituation der Schächte miteinander verglichen. Zudem wurde kein zusätzlicher feiner Filtereinsatz in den Entwässerungsschächten installiert, sondern ausschließlich der Schlamm der Schächte untersucht. Dies könnte bedeuten, dass der Infillverlust evtl. in seiner Ganzheit nicht erfasst wurde. Die Probenaufbereitung, eine Kombination aus Sichtprüfung, Sieben, Waschen, Trocknen und Wiegen, kam der Probenaufbereitung dieser Studie sehr nah. Jedoch sind durch die unterschiedlichen Ausgangszustände der Plätze, die ermittelten Werte kritisch zu hinterfragen. In der Studie von Weijer et al. (2017) wurde direkt nach einer Platzinstallation über ein Jahr lang 7-8 mal Proben in installierten Regenwasserfallen und Sammelbrunnen mit feinen Sieben ausgelegt, entnommen und mittels SEM⁴²-EDX⁴³ und FTIR⁴⁴ untersucht. Zusätzlich wurde als Referenz ein Entwässerungssystem an einer asphaltierten Straße untersucht. In beiden Studien wurden Platzbespielung und Witterungsbedingungen nicht miteinbezogen.

Breitbarth et al. (2022) untersuchten anhand von vier Plätzen speziell Kunststoffeinträge von Kunstrasenplätzen in Entwässerungssystemen mit unterschiedlicher Ausgestaltung

⁴² Rasterelektronenmikroskop (REM) (englisch scanning electron microscope, SEM)

⁴³ Energiedispersive Röntgenspektroskopie (englisch energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX)

⁴⁴ Fourier-Transform-Infrarot, Methode der Schwingungsspektroskopie

der Niederschlags erfassung. Hierbei wurden innerhalb von 5 Versuchsreihen Proben in allen Entwässerungsschächten der Plätze entnommen und diese wie in der Studie von Verschor et al. (2021) getrocknet, gesiebt und eingewogen. Die Siebung erfolgte hier in vier Siebklassen: 1 – 2 mm, 2 – 3 mm, 3 – 5 mm und > 5 mm. Zusätzlich wurden Niederschlagsdaten, Spieleranzahl (Nutzungsintensität) und Laufwege im Versuchszeitraum erfasst. Die lokalen Windgeschwindigkeiten der Plätze wurden nicht berücksichtigt. Die Probenahme und -aufbereitung kamen dem Vorgehen dieser Studie sehr nahe, jedoch konnten Niederschläge und Windgeschwindigkeit sowie Bespielung (Nutzungsstunden) nicht in Kombination auf die Infillverluste in den Schächten betrachtet werden. Im Vergleich zu Weijer et al. (2017) und Verschoor et al. (2021) wurden hier bereits die Nutzungsintensität des Platzes und Niederschlag als Witterung miteinbezogen. Lediglich die gesiebten Proben decken keine Infillpartikel < 1 mm ab, wodurch vermutlich von einer höheren Infillmenge, als hier ermittelt, ausgegangen werden kann (Breitbarth et al. 2022). In dieser Studie wurden ebenfalls die Schmutzwasserabläufe in den Duschen und Kabinen mit Sieben (Siebgewebe 1 mm) beprobt. Es konnten Frachten von 34 kg/a bis 54 kg/a festgestellt werden, welche um den Faktor 2 bis 3 höher sind als die Frachten der Niederschlagsableitung (0,3 kg/a bis 14,5 kg/a) in die Schächte. Pro Spieler und Tag belaufen sich die Austräge auf rund 2,6 g bis 3,5 g (Breitbarth et al. 2022). Die Nutzungsintensität (hier Anzahl der Spieler) und die damit verbundene Migration von Kunststoffgranulaten und Kunstrasenfasern von den KRPs stellen einen erheblichen Einflussfaktor für den Austrag dar. Die Ausgestaltung der Niederschlagswassererfassung bestimmt, wo der Austrag stattfindet. Er konzentriert sich v. a. im Bereich der Spielerbänke und der Zugänge auf die Spielfelder auf. Niederschlagsmenge und Nutzungsintensität korrelieren in dieser Studie mit den ausgetragenen Infillmengen in die Schächte. Laut dieser Studie wurde der Faktor Wind als möglicher Treiber in Erwägung gezogen, konnte jedoch aufgrund nicht auswertbarer Winddaten nicht mit ausgewertet werden und wurde allgemein als eher unwahrscheinlicher Faktor beschrieben (Breitbarth et al. 2022).

Nur sehr wenige Studien befassten sich zurzeit mit der Ausbreitung des Infills auf umliegende befestigte Oberflächen und in Entwässerungsschächte (Verschoor et al. 2021). Die gemessene Infillmenge auf befestigten Oberflächen variierte hierbei zwischen Werten von 0,01 bis 2,9 kg/m^{2/45} Woche, welche einem jährlichen Verlust von 1 bis 60 kg/Jahr pro Kunstrasenplatz entsprechen. Es konnte bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse kein signifikanter Einfluss der geografischen Platzausrichtung auf die Infillmenge auf befestigten Flächen festgestellt werden (Verschoor et al. 2021). Die

⁴⁵ Bezugsfläche: 36 m², 3 x 12 m² (Umgebung von 3 KRPS)

Granulatmenge, die in den Gittern und Muldenrinnen aufgefangen wird, ist stark abhängig von der Art der Platzkonstruktion, Pflege- und Wartungsarbeiten, vom Bewusstsein der Spieler*innen und der Platzwarte. Als wirksame Maßnahme hat sich die Installation von Filtern in den Entwässerungssystemen zum Auffangen von Mikroplastik erwiesen. Es wurde ermittelt, dass nur 1 kg pro Feld und Jahr die Filter passiert und den Graben erreicht (Verschoor et al. 2021). Nach (Breitbarth et al. 2022) stellen eingebaute Filter, sowohl im Innen- als auch Außenbereich, die „effektivsten Maßnahmen“ dar, um Einträge in die aquatische Umwelt zu reduzieren. Es sollte sich auf Maßnahmen konzentriert werden, die der Verschleppung von Infill an Kleidung und Schuhen der Spieler entgegenwirken, da der Eintrag über den Schutzwasserpfad eine deutlich höhere Relevanz als der Niederschlagpfad besitzt (Breitbarth et al. 2022). Auch durch die regelmäßige Reinigung der Schächte, Sammelrinnen und Freiflächen können die Einträge in die Umwelt reduziert werden. Bei einem Platzneubau sollte nach Möglichkeit darauf geachtet werden, dass die Gitterschächte eine Sedimentationswirkung besitzen und räumlich vom Spielfeld getrennt sind (Breitbarth et al. 2022).

Fehlerquellen

Bereits bei der Installation der Siebe gab es erste Schwierigkeiten das Metallgewebe in den kombinierten Siebeinsätzen zu befestigen, da es wiederherausnehmbar und wasserabweisend sein sollte. In diesem Versuch wurde wasserabweisendes Klebeband verwendet, welches während des Versuchs für ausreichend Fixierung des Gewebes sorgte. Gegen Ende des Versuchs lockerte sich die Fixierung aufgrund des permanenten Kontakts mit Regenwasser. Auch bei der Probennahme verblieb immer ein geringer Infillrest im Metallgewebe der kombinierten Siebeinsätze, da das Infill nass war. Des Weiteren konnte bei der Probennahme Fremdmaterial durch umliegende Vegetation, v.a. Sedimente und Pflanzenreste in den Schächten festgestellt werden. Diese konnten bei der Probennahme nicht immer vom Infill getrennt werden, da das Kork-Infill auch oftmals an den Blättern anhaftete. Durch die Trocknung im Trockenschrank und anschließende Siebung konnte ein Großteil des Fremdmaterials wieder entfernt werden. Dennoch waren oft Rückstände von getrockneten Blätterresten in den gesiebten Fraktionen vorhanden, die das Probengewicht beeinflussten. Fraktionsbereiche, die ausschließlich Organik enthielten, wurden deshalb verworfen. Durch die oben erwähnten Fehlerquellen ergab sich ein methodischer Fehler, welcher jedoch durch gleiche Probennahme und Probenaufbereitung aller Proben ausgeglichen wurde und deshalb vernachlässigt werden kann.

Ausblick

Um exakte jährliche Infillmengen für einen KRP kalkulieren zu können, sollten im Optimalfall mindestens ein Jahr lang in einem definierten Zeitraum direkt nach Platzfertigung alle Schächte erfasst werden. Es sollte ein einheitliches methodisches Vorgehen entwickelt und angewendet werden, um Plätze miteinander vergleichen zu können. Zusätzlich Forschungsmöglichkeiten in Bezug auf die Kalkulierung von Infillverlustmengen könnte eine Beprobung des Drainagesystems am Ende einer KRP Lebenszeit sein, um festzustellen, wie viel Infill sich dort über die gesamte Lebensdauer eines Platzes in den Rohren abgesetzt hat. Ebenso interessant ist es, die Einleitungsstelle der Drainagerohre direkt zu beproben, um die Menge des Infills zu quantifizieren, die tatsächlich in die Umwelt freigesetzt wird und nicht evtl. doch im unterirdischen Drainagesystem verbleibt.

„Studien haben gezeigt, dass Kunstrasenplätze als eine spezielle Quelle für Kunststoffeinträge weniger relevant sind, als bisher diskutiert.“ (Breitbarth et al. 2022). Der Eintrag von Kunstrasenplatz Infill in die aquatische Umwelt wird, zumindest für Deutschland, als sehr gering eingeschätzt. Als Senke dienen Kläranlagen, wodurch die Granulate in den Klärschlamm absedimentieren und nur in geringen Mengen im Abwasser nachgewiesen werden können (Breitbarth et al. 2022). Mikroplastikquellen wie verkehrsbedingte Polymerpartikel, Textilien und Mikroplastik-Pellets sind wesentlich relevanter für den Wasserpfad als Kunstrasenplatzinfill (Regnell 2019).

Die Studie von Verschoor et al. 2021 zeigt, dass in der Umgebung eines Kunstrasenplatzes Infill nur einen kleinen Bruchteil am gesamten Mikroplastikvorkommen in Drainagewasser, Regenfallen und Sammelbrunnen ausmacht. Nur je 5 % des jährlichen europäischen Kunstrasenplatzgranulats landet in Oberflächenabflüssen und inneren Rohrleitungen. 45 % des Infills gelangen in die Abfallentsorgung und weitere 45 % verbleiben im Boden bzw. der oberen Vegetation (Gras) (Hann et al. 2018).

5 Fazit

Siebanalyse Ermittlung Korngrößenverteilung

Durch den Vergleich der beiden Kunstrasenplätze wurde eine ungleichmäßigere Infillverteilung auf dem Kunstrasenplatz Oberhausen deutlich, welche sich nach (Bertling et al. 2021a) auf das höhere Platzalter zurückführen lässt. Der jüngere Kunstrasenplatz Osnabrück wies hingegen geringere Infillschwankungen auf. Es konnte auf beiden Plätzen EPDM- und Kork-Abrieb $< 63 \mu\text{m}$ mittels Digitalmikroskopie nachgewiesen werden. Mikropartikulärer Kork und Mikroplastik liegen somit in sehr kleinen Fraktionsbereichen vor und können leicht durch Wind und Wetter in die Umwelt emittieren. Auf dem Kunstrasenplatz Osnabrück wurden im Vergleich zum Kunstrasenplatz Oberhausen mengenmäßig deutlich mehr Partikel $< 100 \mu\text{m}$ gefunden. Diese Beobachtung bestätigt, dass bei Kork bereits nach kürzerer Nutzungsdauer ein erhöhter Verschleiß entsteht, dieser somit eine geringere Lebensdauer besitzt und nach etwa 4 Jahren ausgetauscht werden sollte. (BIR Tyre & Rubber Committee 2019; Schneider 2018).

Infillverluste

Die Infillverluste des Kunstrasenplatzes Oberhausen betragen 2,89 Tonnen/Jahr und liegen somit sehr nah an der durchschnittlichen jährlichen Infillverlustmenge von 2,98 Tonnen/Jahr für Performance-Infill (Bertling et al. 2021a). Auf dem Kunstrasenplatz Osnabrück hingegen ist eine Korknachfüllung aufgrund des Korküberschusses auf dem gesamten Platz zurzeit nicht notwendig. Unterschiedliche Angaben der dort verfüllten Korkmengen lassen darauf schließen, dass das Kork-Infill, statt auf ein fixes Gewicht pro Quadratmeter, auf eine mind. Füllhöhe von 10 mm mit einem Schüttgewicht von 100 bis 200 kg/cm^3 aufgefüllt wurde (Anhang 3). Hier ist es eventuell ratsam bestimmte Stellen mit Sand nachzubessern. Bei beiden Plätzen sollte ggf. durch weitere Untersuchungen eine genauere jährliche Nachfüllmenge für Quarzsand, Kork und oder anderes Alternativinfill abgeschätzt werden, um zukünftigen Infillverlusten und Faserverschleiß entgegenzuwirken und um mindestens die theoretische Lebensdauer der Plätze erreichen zu können.

Nach den Untersuchungen der jährlichen Ein- und Austräge von Infill von Verschoor et al. 2021 lässt sich eine jährliche Nachfüllmenge von mind. 600-1.200 kg pro Kunstrasen ableiten. Durch die Anwendung verschiedener kombinierter Maßnahmen wie optimierte Entwässerungsbedingungen, Aufstellen von Verhaltensregeln für die Platznutzung, Bewusstseinsbildung bei Platznutzern, regelmäßige Wartung und einer sachgemäßen Entsorgung bzw. Rückbau von ausgedienten Plätzen kann der Infillverlust nahezu auf null reduziert werden (Verschoor et al. 2021).

KRP-Testflächen

Der Versuch mit den KRP-Modellflächen hat gezeigt, dass sowohl Kork-, als auch EPDM- und Sand-Infill in verfüllten Systemen ohne Bespielung den natürlich ausgesetzten Wetterbedingungen gut standhalten können. Selbst bei Tagesdurchschnittsgeschwindigkeiten bis zu 27,7 km/h (Orkan Zeynep) konnte nur ein sehr geringer Partikelabtrag von den Flächen auf die umliegenden Planen verzeichnet werden. Auch hohen Niederschlagsmengen von wöchentlich bis zu 43 L/m² konnten die Plätze gut überstehen. Der Faktor Bespielung muss beim Infillaustrag somit eine entscheidende Rolle spielen.

Windkanal

Der Windkanalversuch hat gezeigt, dass je gröber die Bodenoberfläche ist, desto höher ist im Allgemeinen auch die Ablösegeschwindigkeit. Durch den Einsatz von den Barrieren, besonders von 90° Barrieren, nahm die Ablösegeschwindigkeit der Partikel zu. Als primäre Einflussfaktoren für die Ablösegeschwindigkeiten lassen sich die Geometrie/Partikeloberfläche und Ausrichtung der Partikel im Windkanal bestimmen. Partikelgröße und -Partikelgewicht, Partikeldichte (damit verbunden Volumen, Masse) hingegen stellen vermutlich sekundäre Einflussfaktoren dar.

Auffällig ist im Allgemeinen, dass Einzelpartikel bei deutlich geringeren Ablösegeschwindigkeiten abgelöst werden und Infill in verfüllten Kunstrasenplätzen deutlich höheren Windgeschwindigkeiten standhalten kann. Einzelne EPDM-Partikel wiesen mit 5,02 m/s (> 2 mm, Technikumsboden) im Vergleich zu Kork-Partikeln mit 1,86 m/s (> 2 mm, Technikumsboden) höhere Ablösegeschwindigkeiten auf, sodass abgeleitet werden kann, dass einzelne EPDM-Partikel höheren Windgeschwindigkeiten standhalten können als einzelne Korkpartikel. Dies gilt auch für anderen Testoberflächen. Zudem eignen sich aufgrund des geometrischen Einflusses der Form nicht-ideale, kugelförmige Partikel besser, um die Ablösegeschwindigkeit zu erhöhen.

Infill- und Transportverhalten Wasserpfad

Die Ergebnisse der Teilversuche des Partikeltransports Wasserpfad zeigen, dass Wind und Niederschlag einen besonderen Einfluss auf die ausgetragene Infillmenge haben. Zusätzlich spielt in Kombination für den Infillaustrag der Faktor Bespielung eine wesentliche Rolle, da das Granulat zunächst auf umliegende befestigte Oberflächen ausgetragen wird und von dort durch Niederschlag und Wind in die Umwelt, z. B. Entwässerungssysteme gelangt. Die allgemeine Reihenfolge der Treiber kann also wie folgt abgeleitet werden: Wind > Niederschlag/Bespielung > Temperatur. Alle Faktoren stehen miteinander in Wechselwirkung und es kommt zu einer Effektüberlagerung. Dieses Phänomen

lässt sich v. a. an den Infillverlusten in den Wochen ohne Niederschlag und geringen Windgeschwindigkeiten verdeutlichen. Unter Vorbehalt lässt sich nach dieser Studie ein maximal jährlicher Infillverlust von 1,62 kg über die Entwässerungsschächte am Beispiel des KRP OS ableiten.

Aufgrund des ECHA-Beschränkungsvorschlags, welcher noch nicht entschieden ist, werden Alternativen zu dem zurzeit eingesetzten Kunstrasen-Infill auf den bereits erbauten 3 G Plätzen gesucht. Neue Plätze werden bereits nach dem Bau mit alternativem Infill (3 G Modell) bestückt oder werden bereits als 4 G Modell erbaut. Finanzielle Förderungsmittel werden sich gegenüber Kunstrasenplätzen mit Kunststoff-Infill verschlechtern und stehen demnach ausschließlich nur noch für Sanierungen alter Plätze oder neuen Plätzen mit alternativem Infill zur Verfügung (Hentschel et al. 2022).

Obwohl der zukünftige Neubau von Kunstrasenplätzen ohne Kunststoff-Infill erfolgen soll und Deutschland nur sehr geringfügig an dem Mikroplastikeintrag durch Kunstrasenplätze mitwirkt, stehen durch die alten Plätze erhebliche Mengen an Infill als potenzielle Emissionsquelle zur Verfügung. Deshalb sollten unbedingt die beschriebenen Maßnahmen zur Infillverlustreduzierung ergriffen werden, um die Umwelt präventiv zu schützen.

Zudem sollte unbedingt die Ökobilanz der alternativen Infillmaterialien ganzheitlich betrachtet werden, um eine nachhaltig sinnvolle Entscheidung zu treffen, welches Infill als geeigneter Ersatz von Kunststoff-Infill in Frage kommt.

6 Literaturverzeichnis

Alayo, Jorge (2019a): Lebensdauer von Kunststoffen: Haltbarkeit & Degradation. In: *Sinplastic* 2019, 06.01.2019. Online verfügbar unter <https://sinplastic.com/lebensdauer-von-kunststoffen/>, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

Alayo, Jorge (2019b): Plastikfressende Bakterien und andere Organismen. In: *Sinplastic* 2019, 13.06.2019. Online verfügbar unter <https://sinplastic.com/plastikfressende-organismen/>, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

Alfred-Wegner-Institut (2021): Müll im Meer. Hg. v. Alfred-Wegner-Institut. Online verfügbar unter <https://www.awi.de/im-fokus/muell-im-meer/litterbase.html>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2021, zuletzt geprüft am 11.10.2021.

Allen, Steve; Allen, Deonie; Phoenix, Vernon R.; Le Roux, Gaël; Durántez Jiménez, Pilar; Simonneau, Anaëlle et al. (2019): Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. In: *Nat. Geosci.* 12 (5), S. 339–344. DOI: 10.1038/s41561-019-0335-5.

Andrady, Anthony L. (2011): Microplastics in the marine environment. In: *Marine Pollution Bulletin* 62 (8), S. 1596–1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.

Andrady, Anthony L.; Neal, Mike A. (2009): Applications and societal benefits of plastics. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* 364 (1526), S. 1977–1984. DOI: 10.1098/rstb.2008.0304.

Arthur, C., J. Baker and H. Bamford (eds). (2009): Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. Sept 9-11, 2008. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30.

Barnes, David K. A.; Galgani, Francois; Thompson, Richard C.; Barlaz, Morton (2009): Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* 364 (1526), S. 1985–1998. DOI: 10.1098/rstb.2008.0205.

Bertling, J.; Dresen, B.; Bertling, R.; Aryan, V.; Weber, T. (2021a): Kunstrasenplätze – Systemanalyse. unter Berücksichtigung von Mikroplastik- und Treibhausgasemissionen, Recycling, Standorten und Standards, Kosten sowie Spielermeinungen 2021, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Bertling, Jürgen; Bannick, C. G.; Barkmann, L.; Braun, U.; Knoblauch, D.; Kraas, C. et al. (2021b): Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium. Online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-03/Kompendium_Kunststoff-in-der-Umwelt_26Mar2021.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2022.

Bertling, Jürgen; Zimmermann, Till; Rödig, Lisa (2021c): Kunststoffe in der Umwelt: Emissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Bertling, Ralf (o.J.): Präsentationen zu „Kunststoffemissionen von Kunstrasenplätzen“. Hg. v. Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen.

Bertling et al. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie., zuletzt geprüft am 11.10.2021.

Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (2022): TIM-online. Topographie Oberhausen. Online verfügbar unter <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/index.html?flurstueck=05493800201834>, zuletzt aktualisiert am 11.01.2022, zuletzt geprüft am 02.02.2022.

BIR Tyre & Rubber Committee (2019): microplastic restriction. Hg. v. BIR Tyre & Rubber Committee. Online verfügbar unter <https://deutschland.iaks.sport/sites/default/files/downloads/Best%20practices/2019-07/BIR%20document%20microplastic%20restriction%20-%20BIR.pdf>, zuletzt geprüft am 22.11.2021.

BMEL (2019): Boden - Bodenerosion durch Wind - Entstehen, Prozesse, Schäden. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/bodenerosion-durch-wind.htm>, zuletzt aktualisiert am 08.04.2020, zuletzt geprüft am 12.04.2022.

Bohl, W. (1998): Technische Strömungslehre. Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, inkompressible Strömungen, kompressible Strömungen, Strömungsmeßtechnik. 11., durchges. Aufl. Würzburg: Vogel (Vogel-Fachbuch Kamprath-Reihe).

Breitbarth, M.; Hentschel, A.; Kaser, S. (2022): Kunststoffeinträge von Kunstrasenplätzen in Entwässerungssysteme Aufkommen, Rahmenbedingungen und Möglichkeiten der Eintragsminderung. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/360748448_Kunststoffeintrage_von_Kunstrasenplätzen_in_Entwässerungssysteme_Aufkommen_Rahmenbedingungen_und_Möglichkeiten_der_Eintragsminderung, zuletzt geprüft am 30.05.2022.

Brinkmann & Deppen GbR: Entwässerungssituation Kunstrasenplatz Osnabrück. 15.10.2021. schriftlich an Sophie Rischmüller. E-Mail.

BUND für Naturschutz und Umwelt in Deutschland (2019): Mit Wäschebeuteln Mikroplastik abfangen. BUND für Naturschutz und Umwelt in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bund.net/bund-tipps/detail-tipps/tip/mit-waeschebeuteln-mikroplastik>

abfangen/?gclid=CjwKCAjwuYWSBhByEiwAKd_n_rxt-rEN_U37zLSXrrjjB6jwL43g9M_HRTpQbKG_CyOJNFuHdc9oIDhoC4z0QAvD_BwE, zuletzt aktualisiert am 28.03.2022, zuletzt geprüft am 28.03.2022.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2019): Plastikatlas. Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. 2. Aufl. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung. Online verfügbar unter https://www.boell.de/sites/default/files/2021-09/Plastikatlas%202019%206.Auflage%20web.pdf?dimension1=ds_plastikatlas, zuletzt geprüft am 18.11.2021.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (o.J.a): Hormonaktive Substanzen im Wasser. Online verfügbar unter https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluesse/fluesse_hormonaktive_substanzen_hintergrund.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (o.J.b): Mikroplastik und andere Kunststoffe – eine große Gefahr für unsere Umwelt. Hg. v. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) –, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 14.10.2021.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (2019a): Verbot von Kunststoffgranulat auf Kunstrasenplätzen unausweichlich. Hg. v. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Online verfügbar unter <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/verbot-von-kunststoffgranulat-auf-kunstrasenplaetzen-unausweichlich/>, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (2019b): BUND-Hintergrund: Umweltbelastung durch Mikroplastik aus Kunstrasenplätzen 2019. Online verfügbar unter https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/meere/meere_mikroplastik_kunstrasen_hintergrund.pdf, zuletzt geprüft am 10.08.2021.

Bundesministerium für Umwelt, natur, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2018): Sehr hohe Konzentrationen von Mikroplastik im arktischen Meereis. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/bildung-beteiligung/bildung/aus-der-wissenschaft/mikroplastik-im-arktischen-ozean>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2022, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

Bürger, Tasia (2019): »Entscheidend is auf'm Platz«. Rasentypen, die jeder Fußballer kennen sollte. Hg. v. teamurlaub.com GR GmbH. Online verfügbar unter <https://www.teamurlaub.com/magazin/19/10/naturrasen-kunstrasen-hybridrasen>, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

Burgstaller, M.; Potrykus, A.; Weißenbacher, J.; Kabasci, S.; Merrettig-Bruns, U.; Sayer, B. (2018): Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe 2018. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/18-07-25_abschlussbericht_bak_final_pb2.pdf, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

Bußmann, J.; Müller, B.; Thieme-Hack; M. (2019): Verschleiß von Kunststoffrasen. In: *Neue Landschaft* 2019.

Claessens, Michiel; Meester, Steven de; van Landuyt, Lieve; Clerck, Karen de; Jansen, Colin R. (2011): Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast. In: *Marine Pollution Bulletin* 62 (10), S. 2199–2204. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.06.030.

Deutsche Forschungsgemeinschaft (2017): DFG-Stellungnahme zur Replizierbarkeit von Forschungsergebnissen. Online verfügbar unter https://www.dfg.de/foerderung/info_wissenschaft/2017/info_wissenschaft_17_18/index.html, zuletzt aktualisiert am 05.05.2022, zuletzt geprüft am 05.05.2022.

Deutscher Fußballbund (DFB) (2021): DFB-Handlungsempfehlung für Fussballvereine & Kommunen. Mikroplastikaustrag bei bestehenden Kunststoffrasenplätzen. Hg. v. DFB. Online verfügbar unter https://assets.dfb.de/uploads/000/245/080/original_Mikroplastik-Handlungsempf_03-08-2021_final.pdf?1629388272, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Deutsches Windenergie-Institut (DEWI GmbH) (2012): Flächenhafte Ermittlung des Windpotenzials für den Landkreis Osnabrück - PDF Kostenfreier Download. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/44835217-Flaechenhafte-ermittlung-des-windpotenzials-fuer-den-landkreis-osnabrueck.html>, zuletzt aktualisiert am 02.02.2022, zuletzt geprüft am 02.02.2022.

DFB - Deutscher Fußball-Bund e.V. (2021): Kunststoffrasen/Mikroplastik. Online verfügbar unter <https://www.dfb.de/sportstaetten-fussballinfrastruktur/kunststoffrasenmikroplastik/>, zuletzt aktualisiert am 02.09.2021, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

DFB GmbH (2022): SC 1920 Oberhausen. Mannschaften und Spielzeiten. Online verfügbar unter <https://www.fussball.de/verein/sc-1920-oberhausen-niederrhein/-/id/00ES8GN8VS00005DVV0AG08LVUPGND5I#!/>, zuletzt aktualisiert am 02.02.2022, zuletzt geprüft am 02.02.2022.

DIN e. V. (2019a): DIN 66137-2 Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie. Hg. v. DIN e. V. Online verfügbar unter

<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:300301091>, zuletzt aktualisiert am 28.03.2022, zuletzt geprüft am 28.03.2022.

DIN e. V. (2019b): "Kunststoffflächen und Kunststoffrasenflächen". Hg. v. DIN e. V. Online verfügbar unter <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/presse/mitteilungen/kunststofflaechen-und-kunststoffrasenflaechen--340382>, zuletzt geprüft am 20.10.2021.

Domo Sports Grass (2021a): Domo Sports Grass. Online verfügbar unter <https://domosportsgrass.com/de>, zuletzt aktualisiert am 23.11.2021, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

Domo Sports Grass (2021b): Auskunft über Infill (Sank/Kork), 20.10.2021. E-Mail. E-Mail.

Dris, Rachid; Gasperi, Johnny; Mirande, Cécile; Mandin, Corinne; Guerrouache, Mohamed; Langlois, Valérie; Tassin, Bruno (2017): A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 221, S. 453–458. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.12.013.

DWD (2004): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Windkarten zur mittleren Windgeschwindigkeit, 80 m Referenzhöhe. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html, zuletzt aktualisiert am 16.06.2022, zuletzt geprüft am 16.06.2022.

Eunomia Research & Consulting Ltd (2017): Environmental Impact Study on Artificial Football Turf. by Eunomia Research & Consulting Ltd for FIFA March 2017. Online verfügbar unter <https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/environmental-impact-study-on-artificial-football-turf/>, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

European Committee for Standardization (CEN) (2020): Surfaces for sports areas - Synthetic turf sports facilities - Guidance on how to minimize infill dispersion into the environment. technical report. Online verfügbar unter <https://www.estc.info/wp-content/uploads/2020/03/FprCENTR-17519-Public.pdf>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.

EVERS GmbH & Co. KG (2022): Quarzsand und Quarzkies | EVERS GmbH & Co. KG. Hg. v. EVERS GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.evers.de/produkte/everzitr-filtermaterialien/filtration/quarzsand-und-quarzkies>, zuletzt aktualisiert am 23.03.2022, zuletzt geprüft am 23.03.2022.

Farrell, Paul; Nelson, Kathryn (2013): Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 177, S. 1–3. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.01.046.

Fath, Andreas (2019a): Mikroplastik. Verbreitung, Vermeidung, Verwendung. 1. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflucht-1615649>.

Fath, Andreas (Hg.) (2019b): Mikroplastik kompakt. Wissenswertes für alle. Wiesbaden: Springer Spektrum.

Fleming, Paul Richard; Watts, Charlie; Forrester, Stephanie (2020): A new model of third generation artificial turf degradation, maintenance interventions and benefits. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 175433712096160. DOI: 10.1177/1754337120961602.

Formel-Sammlung.de & DUDEN PAETEC GmbH (2022): Dichte von festen Stoffen und Flüssigkeiten Wertetabellen. Hg. v. Formel-Sammlung.de & DUDEN PAETEC GmbH. Online verfügbar unter <https://www.formel-sammlung.de/formel-Dichte-von-festen-Stoffen-und-Fl%C3%BCssigkeiten-3-25-136.html>, zuletzt aktualisiert am 25.03.2022, zuletzt geprüft am 25.03.2022.

Fußballtraining.de (2017): Vorteil Kunstrasen. In: *Fussballtraining.de* 2017, 07.12.2017. Online verfügbar unter <https://www.fussballtraining.de/allgemein/vorteil-kunstrasen/25129/>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Galloway, Tamara S.; Cole, Matthew; Lewis, Ceri (2017): Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. In: *Nature ecology & evolution* 1 (5), S. 116. DOI: 10.1038/s41559-017-0116.

GENAN Inc. (2020): Maintenance-of-synthetic-turf-fields-with-rubber-infill-. Online verfügbar unter <https://www.genan.us/wp-content/uploads/2020/02/Maintenance-of-synthetic-turf-fields-with-rubber-infill-Genan-Inside.pdf>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.

Google Maps (2022): Kartendaten/GeoBasis-DE/BKG. Online verfügbar unter <https://www.google.com/maps/>, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

GreenFields (o. J.): The history and evolution of artificial sport pitches. Online verfügbar unter <https://www.greenfields.eu/pitch-construction/the-evolution-of-surfaces>, zuletzt aktualisiert am 03.05.2022, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Hägerbäumer, Arne (2018): Vorlesung Mikroplastik. Ökotoxikologie. Universität Bielefeld, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

- Hamann, L. (2016): A Biomimetic Approach for Separating Microplastics from Water. - Theoretical and Practical Studies. Online verfügbar unter https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3997875.pdf, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- Hann, S.; Sherrington, C.; Kershaw, P.; Cole, G (2018): Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products. Final report. Online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2018-04/microplastics_final_report_v5_full.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.2021.
- HAURATON GmbH & Co. KG (o. J.): Mikroplastik in Kunstrasen | SPORTFIX CLEAN als Lösung. Online verfügbar unter https://www.hauraton.de/de/aktuelles/produkte/sportfix_clean.php, zuletzt aktualisiert am 03.05.2022, zuletzt geprüft am 03.05.2022.
- Haymarket Media GmbH (2019): Kunstrasen und Mikroplastik – alles halb so wild? Hg. v. Haymarket Media GmbH. Online verfügbar unter <https://taspo.de/gruene-branche/kunstrasen-und-mikroplastik-alles-halb-so-wild/>.
- Heiler GmbH & Co. KG (2022a): EPDM - heiler Sportplatzbau. Online verfügbar unter <https://www.heiler-sport.de/de/infill/epdm.html>, zuletzt aktualisiert am 23.03.2022, zuletzt geprüft am 23.03.2022.
- Heiler GmbH & Co. KG (2022b): Naturkork von heiler für Kunstrasen - heiler Sportplatzbau. Online verfügbar unter <https://www.heiler-sport.de/de/infill/naturkork.html>, zuletzt aktualisiert am 16.05.2022, zuletzt geprüft am 16.05.2022.
- Helmut Haas GmbH (2015): Kunstrasen oder Naturrasen. Die Fachwelt diskutiert. Hg. v. Rasen-Kunststoff-Sport. Online verfügbar unter <https://rasen-kunststoff-sport.com/2015/07/05/kunstrasen-oder-naturrasen-die-fachwelt-diskutiert/>, zuletzt geprüft am 03.08.2021.
- Hemstedt GmbH (2022): Rasenheizung für Sportstadien. Online verfügbar unter <https://www.hemstedt.de/produkte/haustechnik-gebaeudetechnik/rasenheizung-fuer-sportstadien/>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Hermann Kutter GmbH & Co. KG (2018): Kunstrasen-Spielfelder, Neubau und Umbau. Online verfügbar unter <https://www.kutter-galabau.de/sportanlagenbau/kunstrasen-spielfelder/neubau-umbau/>, zuletzt aktualisiert am 17.01.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Holm, P.; Schulz, G.; Athanasopulu, K. (2013): Mikroplastik - ein unsichtbarer Störenfried : Meeresverschmutzung der neuen Art.

IAKS (2019): Stellungnahme Mikroplastik in Kunstrasen. Online verfügbar unter <https://deutschland.iaks.sport/sites/default/files/downloads/Whitepaper/2019-07/Stellungnahme%20Mikroplastik%20in%20Kunstrasen%20-%20IAKS%20Deutschland%20final.pdf>, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

IAKS (2020): Kunstrasen mit Korkverfüllung. Anzeige von IAKS Mitglied Hermann Kutter GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://deutschland.iaks.sport/news/kunstrasen-mit-korkverfuellung>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Imhof, Hannes K.; Ivleva, Natalia P.; Schmid, Johannes; Niessner, Reinhard; Laforsch, Christian (2013): Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles. In: *Current biology : CB* 23 (19), R867-8. DOI: 10.1016/j.cub.2013.09.001.

Janczura, Sarah (2019): Kritik an Kunstrasen: Wie umweltschädlich sind sie und welche Alternativen gibt es? Granulat im Sport. Hg. v. VDI Verlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/kritik-an-kunstrasen-wie-umweltschaedlich-sind-sie-und-welche-alternativen-gibt-es/#>.

Jayanthi Barasarathi; Agamuthu, P.; Emenike C.U; Fauziah S.H (2014): Microplastic Abundance in selected mangrove forest in Malaysia. Proceeding of The ASEAN Conference on Science and Technology 2014. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/271191025_MICROPLASTIC_ABUNDANCE_IN_SELECTED_MANGROVE_FOREST_IN_MALAYSIA.

Joachim Herz Stiftung (2022): Allgemeines Gasgesetz. Boyle-Mariotte (Selbstbau) | LEIFIPhysik. Online verfügbar unter <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/allgemeines-gasgesetz/versuche/boyle-mariotte-selbstbau>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2022, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Kerkhoff Grün - Kunst- & Rollrasen (o.J.): Kunstrasen als Ursache für Mikroplastik. Hg. v. Kerkhoff Grün - Kunst- & Rollrasen. Online verfügbar unter <https://www.kunstrasenversand.de/kunstrasen-als-ursache-fuer-mikroplastik>.

KIMO Fidra (2018a): Pitch In to reduce microplastic loss from artificial pitches: Guidelines for Designers and Procurement Specialists. Hg. v. KIMO Fidra. Online verfügbar unter <https://www.kimointernational.org/pitch-in/>, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

KIMO Fidra (2018b): Pitch In to reduce microplastic loss from artificial sports pitches: Guidelines for Owners and Maintenance Teams. Hg. v. KIMO Fidra. Online verfügbar unter <https://www.kimointernational.org/pitch-in/>, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

- KIMO Fidra (2021): Pitch In to reduce microplastic loss from artificial pitches: Guidelines for Pitch Users. Hg. v. KIMO Fidra. Online verfügbar unter <https://www.kimointernational.org/pitch-in/>, zuletzt geprüft am 21.10.2021.
- Klärwerk.Info Bioserve GmbH (2020): Bionischer Filter zur Trennung von Mikroplastik | Klärwerk.info. Hg. v. Klärwerk.Info Bioserve GmbH. Online verfügbar unter <https://klaerwerk.info/nuetzliches/allgemeine-meldungen-und-berichte/bionischer-filter-zur-trennung-von-mikroplastik/>, zuletzt aktualisiert am 28.03.2022, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- Knauer, Roland (2019): Die Kunstrasen-Kontroverse. Hg. v. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/news/die-kunstrasen-kontroverse/1666024>.
- Koelmans, Albert A.; Besseling, Ellen; Foekema, Edwin; Kooi, Merel; Mintenig, Svenja; Ossendorp, Bernadette C. et al. (2017): Risks of Plastic Debris: Unravelling Fact, Opinion, Perception, and Belief. In: *Environ. Sci. Technol.* 51 (20), S. 11513–11519. DOI: 10.1021/acs.est.7b02219.
- Kole, Pieter Jan; Löhr, Ansje J.; van Belleghem, Frank G. A. J.; Ragas, Ad M. J. (2017): Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. In: *IJERPH* 14 (10), S. 1265. DOI: 10.3390/ijerph14101265.
- Kooi, Merel; van Nes, Egbert H.; Scheffer, Marten; Koelmans, Albert A. (2017): Ups and Downs in the Ocean: Effects of Biofouling on Vertical Transport of Microplastics. In: *Environ. Sci. Technol.* 51 (14), S. 7963–7971. DOI: 10.1021/acs.est.6b04702.
- Kunststoff-Schweiz (o. J.): Polystyrol. Hg. v. Kunststoff-Schweiz. Online verfügbar unter <https://www.kunststoff-schweiz.ch/html/polystyrol.html#:~:text=Die%20Dichte%20von%20solidem%20Polystyrol,0%2C06%20g%2Fcm%2%B3.>, zuletzt geprüft am 25.03.2022.
- Kvale, K.; Prowe, A. E. F.; Chien, C-T; Landolfi, A.; Oeschler, A. (2020): The global biological microplastic particle sink. In: *Sci Rep* 10 (1), S. 16670. DOI: 10.1038/s41598-020-72898-4.
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) (2022): NIBIS Kartenserver : powered by cardo.Map. Online verfügbar unter <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2022, zuletzt geprüft am 21.01.2022.
- Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2022): Windkarten für NRW mittlere Windgeschwindigkeit, 100 m Referenzhöhe. It.nrw. Online verfügbar

unter https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/klima/ea_wind/, zuletzt aktualisiert am 07.06.2022, zuletzt geprüft am 16.06.2022.

Landessportverband Schleswig Holtstein e.V. (2019): Konferenzfließtext 22.-23.03.2019 Deutscher Olympischer Sportbund. Online verfügbar unter https://www.lsv-sh.de/fileadmin/Content/LSV-PDF_und_Word-Dokumente/2._Sportwelten_und_Projekte/Sport_und_Umwelt/Konferenz_der_LSB-22.03.-23.03.19_-_Anlage_zu_TOP_5.2_CSI-Mikroplastik-18032019.pdf, zuletzt geprüft am 18.11.2021.

Lechner, Aaron; Keckeis, Hubert; Lumesberger-Loisl, Franz; Zens, Bernhard; Krusch, Reinhard; Tritthart, Michael et al. (2014): The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 188, S. 177–181. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.02.006.

Lenz, M. (o.J.): Kein Plastik! Hg. v. VenOli. Online verfügbar unter <https://venoli.de/kein-plastik/>, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Liebmann, Bettina (2015): Mikroplastik in der Umwelt. Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf. Unter Mitarbeit von Heike Brielmann, Holger Heinfellner, Philipp Hohenblum, Sebastian Köppel, Stefan Schaden und Maria Uhl. Wien (Report / Umweltbundesamt, REP-0550). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0550.pdf>, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Liebmann, Bettina; Sexlinger, Katharina (2020): Mikroplastik in der Umwelt. Statusbericht 2019. Hg. v. Umweltbundesamt. Wien (Report / Umweltbundesamt, REP-0727). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0727.pdf>, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Lumitos AG (o.J.): Kunststoffe. Hg. v. Lumitos AG. Online verfügbar unter <https://www.chemie.de/lexikon/Kunststoff.html>, zuletzt geprüft am 11.10.2021.

Magnusson, Kerstin; Norén, Fredrik (2014): Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:773505>.

Mansfeld's World Database of Agricultural and Horticultural Crops (2001): Database Query (Quercus suber L.). Hg. v. Mansfeld's World Database of Agricultural and Horticultural Crops. Online verfügbar unter https://mansfeld.ipk-gatersleben.de/apex/f?p=185:46:781663974789756::NO::module,mf_use,source,akzanz,rehm,akzname,taxid:mf,,botnam,0,,Quercus%20suber,17870, zuletzt aktualisiert am 23.03.2022, zuletzt geprüft am 23.03.2022.

Mason, Sherri A.; Welch, Victoria G.; Neratko, Joseph (2018): Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. In: *Front. Chem.* 6, S. 407. DOI: 10.3389/fchem.2018.00407.

Miklos, D.; Obermaier, N.; Prof. Dr. Jekel, M (2016): Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzepts (32/2016). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_32_2016_mikroplastik_entwicklung_eines_umweltbewertungskonzeptes.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2021.

Mintening, Svenja (2014): Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des OOWV in Niedersachsen 2014. Online verfügbar unter https://muell-im-meer.de/sites/default/files/2020-08/Mintening%20et%20al%20%282014%29_Mikroplastik%20in%20ausgew%C3%A4hlten%20KI%C3%A4ranlagen%20des%20OOWV%20in%20Niedersachsen.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Mölter, Kerstin (2010): Was ist eigentlich Schluff? Hg. v. Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation. Online verfügbar unter <https://www.ds.mpg.de/115858/23>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Mortimer, Charles E.; Müller, Ulrich; Beck, Johannes (2015): Chemie. Das Basiswissen der Chemie : 410 Abbildungen, 545 Formelbilder. 12., korrigierte und aktualisierte Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.

Müller, Tobias (2019a): Kunstrasen-Sportplatzbau richtig planen – Expertentipps inklusive. In: *Polytan GmbH*, 29.03.2019. Online verfügbar unter <https://www.polytan.de/blog/sportplatzbau/kunstrasen-sportplatzbau-richtig-planen/>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Müller, Tobias (2019b): Polytan-Kunstrasenplatz: nachhaltig und umweltfreundlich. In: *Polytan GmbH*, 04.09.2019. Online verfügbar unter <https://www.polytan.de/blog/kunstrasenplatz/polytan-kunstrasenplatz-nachhaltig-und-umweltfreundlich/>, zuletzt geprüft am 23.03.2022.

NABU-Bundesverband (2021): Kunststoffe in der Umwelt: Emissionen in landwirtschaftlich genutzte Böden. Studie von Fraunhofer UMSICHT und Ökopol im Auftrag des NABU e. V. 2021. Online verfügbar unter https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/211102-mp-boeden-studie_nabu-zusammenfassung_nabu_final.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Naumann, Martina (2020): Klärschlamm: Entstehung, Verwertung und Entsorgung des Abfallprodukts. In: *Utopia*, 17.05.2020. Online verfügbar unter

<https://utopia.de/ratgeber/klaerschlamm-entstehung-verwertung-und-entsorgung-des-abfallprodukts/>, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

PlasticsEurope Deutschland e. V. (2021): Plastics-the Facts 2020. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Hg. v. PlasticsEurope Deutschland e. V. Online verfügbar unter <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>, zuletzt geprüft am 11.10.2021.

Platzwart KRP OS (Peters, Udo) (2021): Daten Kunstrasenplatz Osnabrück. Osnabrück, 10.11.2021. mündlich.

Polytan (2021): LigaGrass Pro. Online verfügbar unter <https://www.polytan.de/produkte/kunstrasen/ligagrass/ligagrass-pro/>, zuletzt aktualisiert am 06.09.2021, zuletzt geprüft am 02.02.2022.

Polytan GmbH (2019): DIN und RAL widerlegen Fraunhofer-Studie über Mikroplastik auf Kunstrasenplätze. Hg. v. Polytan GmbH. Online verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/134850/4329760>.

Polytan GmbH (2020): Drohendes EU-Kunststoff-Granulat-Verbot im Kunstrasen: Sport Group und Polytan gut gerüstet. In: *Presseportal.de* 2020, 15.06.2020. Online verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/134850/4624065>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Polytan GmbH (Pajak, M.) (2021): Auskunft Daten Kunstrasenplatz, 10.12.2021. mündlich, schriftlich.

Porter, Adam; Lyons, Brett P.; Galloway, Tamara S.; Lewis, Ceri (2018): Role of Marine Snows in Microplastic Fate and Bioavailability. In: *Environ. Sci. Technol.* 52 (12), S. 7111–7119. DOI: 10.1021/acs.est.8b01000.

Private Greens & FiberGrass International GmbH (2017): Haltbarkeit - Kunstrasen. Online verfügbar unter <http://kunstrasen-partner.de/kunstrasen/haltbarkeit.html>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Regnell, Fredrick (2019): Dispersal of microplastic from a modern artificial turf pitch with preventive measures. Case study Bergaviks IP, Kalmar. Online verfügbar unter <https://www.genan.eu/wp-content/uploads/2020/02/MP-dispersal-from-Bergavik-IP-Kalmar-Report.pdf>, zuletzt geprüft am 19.11.2021.

Richter Sportstättenkonzepte GmbH (2019): Kunstrasen vs. Naturrasen. Hg. v. Richter Sportstättenkonzepte GmbH. Online verfügbar unter <https://www.sportstaettenkonzepte.de/wissen/details/kunstrasen-vs-naturrasen>.

SBO Servicebetriebe Oberhausen: Isaiasz, T. (2021): jährliche Nachfüllmenge Infill, KRP OB, 30.11.2021. schriftlich. E-Mail.

Schimmelpfennig, Oliver R. (DomoSportsgrass) (2021): Daten Kunstrasenplatz Osnabrück, 03.12.2021. schriftlich. per Mail.

Schneider, O. (2018): Pilotprojekt Korkgranulat in Hamburg pro und Contra der Verwendung als Infill. Hg. v. Fachamt bezirklicher Sportstättenbau. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/173681938-Pilotprojekt-korkgranulat-in-hamburg-pro-und-contra-der-verwendung-als-infill.html>, zuletzt geprüft am 22.11.2021.

Schwarz, Otto; Ebeling, Friedrich Wolfhard; Huberth, Harald; Richter, Frank; Schirber, Harald; Schlör, Norbert (1987): Kunststoffkunde. Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. 10., überarbeitete Auflage. Würzburg: Vogel Business Media. Online verfügbar unter https://ebooks.ciano.com/book/index.cfm/bok_ID/2007045.

Science for Environment Policy (2011): Plastic Waste: Ecological and Human Health Impacts. In-Depth Report. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/IR1_en.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Seidel, Wolfgang W. (2007): Werkstofftechnik. Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung ; mit zahlreichen Tabellen, Beispielen, Übungen und Testaufgaben. 7., aktualisierte Aufl. München, Wien: Hanser (Lernbücher der Technik).

Sexlinger, K. (2019): Kunststoffe im Boden. Untersuchungen zu Kunststoffverunreinigungen in landwirtschaftlichen Böden Vorarlbergs 2019. Online verfügbar unter <https://vorarlberg.at/documents/302033/472824/Kunststoffe+im+Boden.pdf/94e510ee-974e-c8db-0f0b-0b784d9f43ba?t=1616159196641>, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

Shah, Aamer Ali; Hasan, Fariha; Hameed, Abdul; Ahmed, Safia (2008): Biological degradation of plastics: a comprehensive review. In: *Biotechnology Advances* 26 (3), S. 246–265. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.

Sharma, Prateek; Fleming, Paul; Forrester, Steph; Gunn, Jon (2016): Maintenance of Artificial Turf – Putting Research into Practice. In: *Procedia Engineering* 147, S. 830–835. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.298.

SHEAR-TEST.com - physical properties of bulk solids (o. J.): Shear-Test- Schüttgutedichte von Pulvern und Schüttgütern. Online verfügbar unter <https://www.shear-test.de/doc/dichtemessung.php>, zuletzt aktualisiert am 02.02.2022, zuletzt geprüft am 02.02.2022.

Spektrum Akademischer Verlag (2018): Venturi-Düse. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/venturi-duese/15119>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 05.05.2022.

Sportstättenrechner (o. J.a): Aktuelle Diskussion: Mikroplastik auf Kunstrasenplätzen. Hg. v. Sportstättenrechner. Online verfügbar unter <https://www.sportstaettenrechner.de/wissen/kunstrasen/mikroplastik-kunstrasenplatz/><https://www.sportstaettenrechner.de/wissen/kunstrasen/mikroplastik-kunstrasenplatz/>.

Sportstättenrechner (o. J.b): Kunstrasen Recycling: Kosten für Rückbau und Sanierung kalkulieren. Hg. v. Sportstättenrechner. Online verfügbar unter <https://www.sportstaettenrechner.de/wissen/kunstrasen/kunstrasen-recycling-kosten/>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Sportstättenrechner (o. J.c): Was kostet ein Kunstrasenplatz? | Sportstättenrechner. Online verfügbar unter <https://www.sportstaettenrechner.de/wissen/kunstrasen/was-kostet-ein-kunstrasenplatz/>, zuletzt aktualisiert am 16.06.2021, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Sportstättenrechner (2021a): Kunstrasen für Sportplätze – Nutzungskonzepte und Lebensdauer. Hg. v. Sportstättenrechner. Online verfügbar unter <https://www.sportstaettenrechner.de/wissen/kunstrasen/nutzungskonzepte-und-lebensdauer/>, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Sportstättenrechner (2021b): Kunstrasen Recycling: Mit welchen Kosten müssen Vereine kalkulieren? Hg. v. Sportstättenrechner. Online verfügbar unter <https://www.sportstaettenrechner.de/wissen/kunstrasen/kunstrasen-recycling-kosten/>, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Stadt OB: Fachbereich Sport (Hinz, U.) (2022): Nutzungsdauer und Eckdaten KRP OB, 31.10.2022. schriftlich. E-Mail.

Stadt Oberhausen (2021): Sportstättenlandschaft in Alt-Oberhausen-Ost - Mellinghofer Str. Online verfügbar unter <https://www.oberhausen.de/de/index/rathaus/buergerbeteiligung/projekte/sportstaettenlandschaft-in-alt-oberhausen-ost-vorhaben.php>, zuletzt aktualisiert am 05.01.2021, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Stadt Osnabrück (Borm, J.) (2021): Geodaten Kunstrasenplatz, Kanalsystem, 21.10.2021. schriftlich an Sophie Rischmüller. E-Mail.

Stadt Osnabrück (Remest, S.): Platzbelegung, Sommer- und Wintersaison 21/22. schriftlich. Mail.

Stadt Osnabrück (Schirmbeck, J.) (2021, 2021): Daten Kunstrasenplatz Osnabrück, 04.08.2021, 01.07.2021. mündlich, schriftlich.

Statista Research Department (2022): Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2020 (in Millionen Tonnen). Hg. v. Statista Research Department. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/>, zuletzt aktualisiert am 21.04.2022, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

Stiess, M. (2009): Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink Bücher). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz252947673err.htm>.

STOAG Stadtwerke Oberhausen GmbH (2021): STOAG | Nahverkehr in Oberhausen - Stoag. mündliche Auskunft über Kanalnetz. Online verfügbar unter <https://www.stoag.de/index.html>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2022, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Südkurier GmbH (2020): Wasserschaden nach Wolkenbruch beim SV Waldhaus. Gewitterregen spült das Granulat auf dem Kunstrasenplatz auf. Hg. v. Südkurier GmbH. Online verfügbar unter <https://www.suedkurier.de/regionalsport/regionalsport-hochrhein/wasserschaden-nach-wolkenbruch-beim-sv-waldhaus-mit-video;art3111,10578486>, zuletzt geprüft am 16.10.2021.

SWO Netz GmbH (2022): Das Abwassernetz in Osnabrück. Hg. v. SWO Netz GmbH - Ein Unternehmen der Stadtwerke Osnabrück AG. Online verfügbar unter <https://www.swo-netz.de/netze-anlagen/abwassernetz>, zuletzt aktualisiert am 17.03.2022, zuletzt geprüft am 17.03.2022.

Tamari, S.; Aguilar-Chávez, A. (2005): Optimum Design of Gas Pycnometers for Determining the Volume of Solid Particles. In: *J. Test. Eval.* 33 (2), S. 12674. DOI: 10.1520/JTE12674.

Thieme-Hack, M.; Karle, M.; Pöhler, P. (2021): UKuRa Umweltgerechter Kunststoffrasen durch verringerten Kunststoffaustrag und -verbrauch. Hg. v. Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur. Online verfügbar unter <https://www.hs-osnabrueck.de/ukura#c12281743>, zuletzt geprüft am 04.11.2021.

Thompson, Richard C.; Swan, Shanna H.; Moore, Charles J.; vom Saal, Frederick S. (2009): Our plastic age. In: *Phil. Trans. R. Soc. B* 364 (1526), S. 1973–1976. DOI: 10.1098/rstb.2009.0054.

UEFA (2018): UEFA-Richtlinien zur Spielfeldqualität: Aufbau und Instandhaltung von Naturrasenfeldern Ausgabe 2018. Online verfügbar unter https://de.uefa.com/MultimediaFiles/Download/uefaorg/Stadium&Security/02/55/38/68/2553868_DOWNLOAD.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Umweltbundesamt (2018): Was ist Feinstaub? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-ist-feinstaub>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2022, zuletzt geprüft am 25.04.2022.

Valsesia, Andrea; Parot, Jeremie; Ponti, Jessica; Mehn, Dora; Marino, Rita; Melillo, Daniela et al. (2021): Detection, counting and characterization of nanoplastics in marine bioindicators: a proof of principle study. In: *Micropl.&Nanopl.* 1 (1), S. 1–13. DOI: 10.1186/s43591-021-00005-z.

Venghaus, D.; Schmerwitz, F.; Reiber, J.; Sommer, H.; Lindow, F.; Herper, D. et al. (2021): RAU Reifenabrieb in der Umwelt. Abschlussbericht zum Projekt. Online verfügbar unter https://www.rau.tu-berlin.de/fileadmin/fg118/RAU/20210728_Abschlussbericht_RAU_FINAL_Team.pdf, zuletzt geprüft am 28.03.2022.

Verein für Ökologie und Umweltbildung Osnabrück e. V. (2007): Die HASE neu entdecken - Nebenbäche der Hase. Online verfügbar unter <https://www.bne.uni-osnabrueck.de/Hase/Nebenbaeche>, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Verschoor, Anja J.; van Gelderen, Alex; Hofstra, Ulbert (2021): Fate of recycled tyre granulate used on artificial turf. In: *Environ Sci Eur* 33 (1), S. 1–15. DOI: 10.1186/s12302-021-00459-1.

Wagner, Martin; Scherer, Christian; Alvarez-Muñoz, Diana; Brennholt, Nicole; Bourrain, Xavier; Buchinger, Sebastian et al. (2014): Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. In: *Environ Sci Eur* 26 (1), S. 12. DOI: 10.1186/s12302-014-0012-7.

Waldschläger, Kryss (Hg.) (2019): Mikroplastik in der aquatischen Umwelt. Quellen, Senken und Transportpfade: Springer Vieweg.

Weather Spark (2021): Klima für Oberhausen, Wetter nach Monat, durchschnittliche Temperatur (Deutschland) - Weather Spark. Online verfügbar unter <https://de.weather-spark.com/y/54713/Durchschnittswetter-in-Oberhausen-Deutschland-das-ganze-Jahr-%C3%BCber>, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Weijer, A.; Knol, J.; Hofstra, U. (2017): Rapportage-Verspreiding-van-infill-en-indicatie-massabalans 2017. Online verfügbar unter <https://www.bsnc.nl/wp->

content/uploads/2017/05/Rapportage-Verspreiding-van-infill-en-indicatieve-massabalans.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2021.

wetter.com (2022): Wetterrückblick Nahne. Online verfügbar unter https://www.wetter.com/wetter_aktuell/rueckblick/deutschland/osnabrueck/nahne/DE2867148.html, zuletzt aktualisiert am 28.03.2022, zuletzt geprüft am 28.03.2022.

Wetter.com GmbH (2022): Wetterdaten Oberhausen-tagesaktuelle Wetterdaten der Messtation Essen-Bredeney. Online verfügbar unter https://www.wetter.com/wetter_aktuell/rueckblick/deutschland/oberhausen/DE0007740.html, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Wetterdienst, Deutscher (2022): Deutscher Wetterdienst - Windwarnskala. Online verfügbar unter <https://www.wettergefahren.de/warnungen/windwarnskala.html>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2022, zuletzt geprüft am 20.06.2022.

Wikimedia Foundation, Inc (2005): Tabellensammlung Chemie/ Dichte fester Stoffe – Wikibooks, Sammlung freier Lehr-, Sach- und Fachbücher. In: *Wikimedia Foundation, Inc*, 29.04.2005. Online verfügbar unter https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Dichte_fester_Stoffe, zuletzt geprüft am 25.03.2022.

Wikipedia (2020): Gaspyknometer. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gaspkyknometer&oldid=196939059>, zuletzt aktualisiert am 18.02.2020, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

WINDY.APP (o. J.): Oberhausen Wind- und Wetterstatistiken — Windy.app. Online verfügbar unter <https://windy.app/de/forecast2/spot/444159/Oberhausen/statistics>, zuletzt aktualisiert am 12.04.2022, zuletzt geprüft am 12.04.2022.

Wolf, Helmut (1961): Spannungsoptik. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Forschung, Technik und Unterricht. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Wright, Stefaphanie; Thompson, Richard; Galloway, T. (2013): The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. In: *Environmental Pollution*, S. 483–492. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>, zuletzt geprüft am 12.10.2021.

Wurbs, D.; Steininger, M. (2017): Bodenerosion durch Wind. Sachstand und Handlungsempfehlung zur Gefahrenabwehr. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/merkblatt_bodenerosion_durch_wind_web.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2022.

Zettler, Erik R.; Mincer, Tracy J.; Amaral-Zettler, Linda A. (2013): Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. In: *Environ. Sci. Technol.* 47 (13), S. 7137–7146. DOI: 10.1021/es401288x.

Zubris, Kimberly Ann V.; Richards, Brian K. (2005): Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. In: *Environmental Pollution* 138 (2), S. 201–211. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.04.013.

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Kostenvergleich von Natur-, Kunst- und Hybridrasen.....	114
Anhang 2: Begehungsprotokolle und Fotos der Kunstrasenplätze.....	114
Anhang 3: Kenndaten und Kartenmaterial zu den Kunstrasenplätzen.....	114
Anhang 3.1: Entwässerungsplan KRP OS.....	115
Anhang 3.2: Entwässerungsplan KRP OB.....	116
Anhang 4: Bilder zur Methodik.....	117
Anhang 4.1: Siebanalyse - Ermittlung der Korngrößenverteilung.....	117
Anhang 4.1.1: Probenahme für Siebanalyse auf dem KRP OB.....	117
Anhang 4.1.2: Aufbau Siebanalyse.....	117
Anhang 4.1.3: Feuchtes Kork-Infill.....	118
Anhang 4.1.4: Ansicht nasses Infill im Sauger.....	118
Anhang 4.1.5: Beispiel klassierte Proben Siebanalyse.....	119
Anhang 4.2: Versuchsaufbau Stampfvolumeter.....	119
Anhang 4.3: Ansicht Helium-Pyknometer.....	120
Anhang 4.4: Windkanal - Simulation.....	120
Anhang 4.4.1: Ansicht Anemometer (testo 405i).....	120
Anhang 4.4.2: Aufbau Windkanal.....	121
Anhang 4.4.3: Beispielbild. Messung der Ablösegeschwindigkeit.....	122
Anhang 5: Entwässerungsschächte KRP OB.....	123
Anhang 6: Mikroskopbilder Siebanalyse.....	124
Anhang 6.1: EPDM-Abrieb.....	124
Anhang 6.2: Kork Abrieb.....	124
Anhang 7: Messdaten der Versuche.....	125
Anhang 7.1: Rohdaten Siebanalyse KRP OS & OB.....	125
Anhang 7.2: Rohdaten Schütt- und Rütteldichtebestimmung.....	126
Anhang 7.3: Messprotokolle Helium-Pyknometrie.....	127
Anhang 7.4: Rohdaten Messreihen Windkanal.....	135
Anhang 7.4.1: Mittelwerte der Messreihen aus „Rohdaten Messreihen Windkanal“ und Diagramme.....	135
Anhang 7.4.2: Videoaufnahmen, Bestimmung der Partikelablösung im Windkanal.	135

Anhang 7.4.3: Versuchsergebnisse Windkanal.....	135
Anhang 7.4.4: Digitalmikroskopaufnahmen der Partikel.....	136
Anhang 7.5: Rohdaten der Modellflächen der KRP OB und KRP OS.	137
Anhang 7.5.1: Protokolle Modellflächen der KRP OB und KRP OS.	138
Anhang 7.6: Rohdaten Entwässerungsschächte.....	138
Anhang 8: Geschätzter jährlicher Input und Output von ELT-Granulat auf Kunstrasenplätzen.....	138

Anhang 1: Kostenvergleich von Natur-, Kunst- und Hybridrasen

Typ	Naturrasen	Kunstrasen	Hybridrasen
Baukosten [€]	200 000 – 250 000	420 000 – 550 000	400 000 – 450 000
Pflegekosten [€/a]	25 000 – 35 000	12 000 – 24 000	25 000 – 60 000
End of Life und Kosten [€]	Aufbereitung: 22 000	Recycling: 65 000	Kompostierung: 40 000 Entsorgung: 400 000
Gesamtkosten [€]	247 000 – 307 000	507 000 – 649 000	535 000 – 965 000
Nutzungsstunden [h/a]	800	1800	1000

Quelle: (Bertling et al. 2021).

Anhang 2: Begehungsprotokolle und Fotos der Kunstrasenplätze.

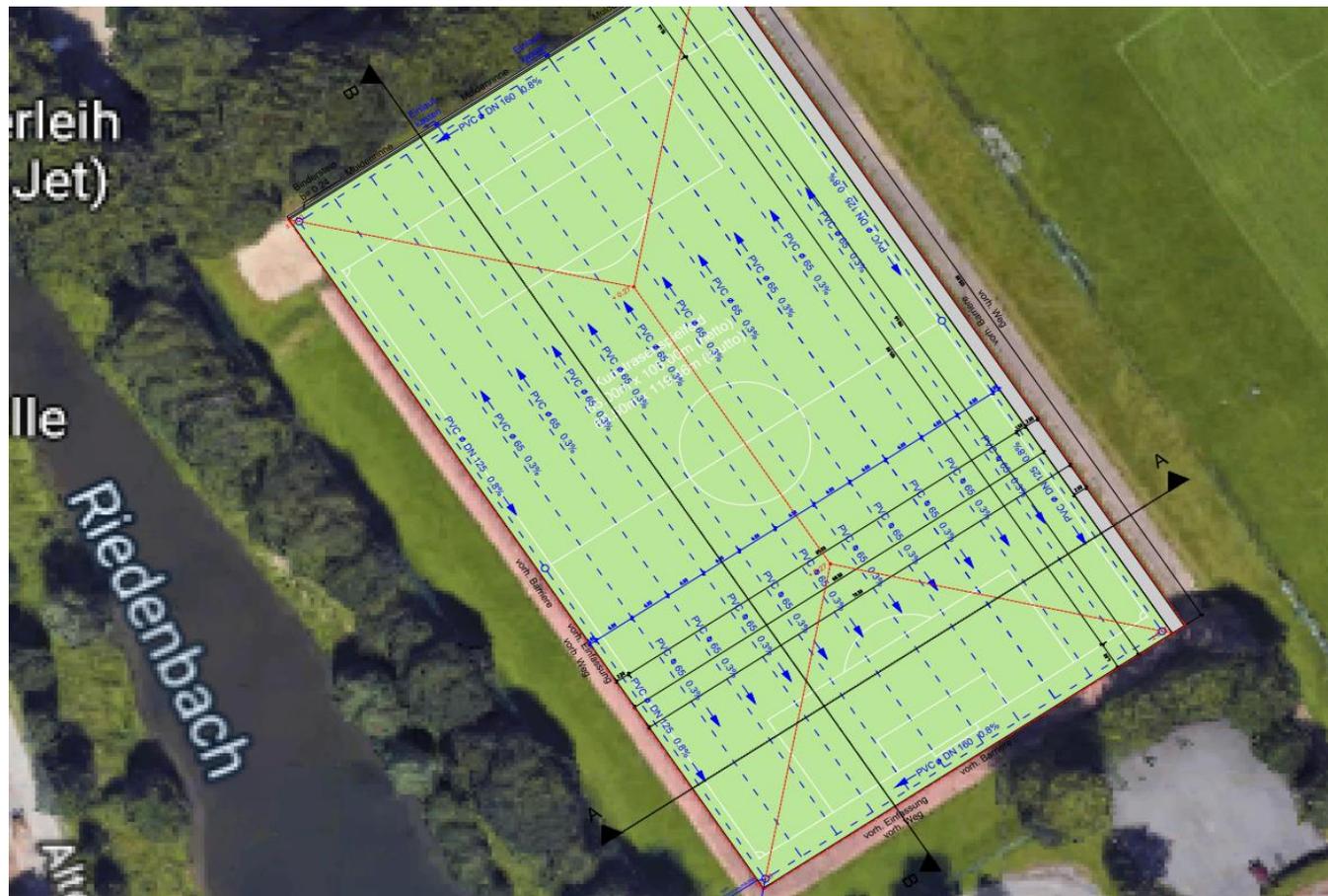
Begehungsprotokolle von Kunstrasenplätzen. Ansichten der Kunstrasenplätze, Fotodokumentation. Zusammenfassung der Platzbegehungen beider Plätze. Dateien auf USB-Stick.

Anhang 3: Kenndaten und Kartenmaterial zu den Kunstrasenplätzen.

(Lage- und Architektenpläne, Platzaufbau, Kenndaten zu den Plätzen, Entwässerungspläne, Belegungspläne, Tiefenreinigungsbericht, etc.). Dateien auf USB-Stick

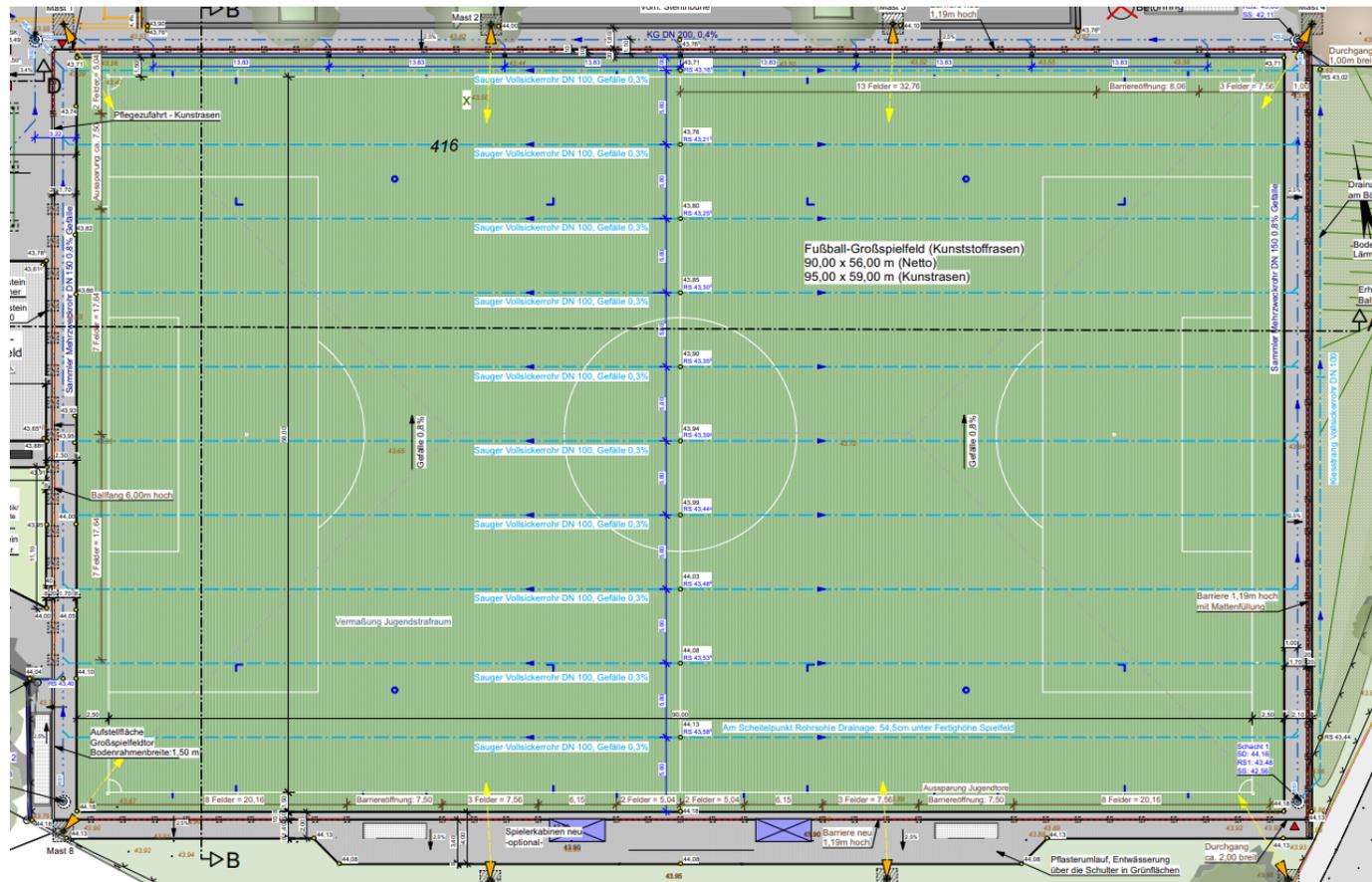
Anhang 3.1: Entwässerungsplan KRP OS.

In besserer Auflösung s. USB-Stick (Anhang 3).



Anhang 3.2: Entwässerungsplan KRP OB.

In besserer Auflösung s. USB-Stick (s. Anhang 3).



Anhang 4: Bilder zur Methodik

Anhang 4.1: Siebanalyse - Ermittlung der Korngrößenverteilung

Anhang 4.1.1: Probenahme für Siebanalyse auf dem KRP OB.

Links: Aufbau der Probenahme. Rechts: Ansicht Infill im Sauger.



Anhang 4.1.2: Aufbau Siebanalyse.

Siebturm und Analysensiebmaschine (Retsch, AS 2000).



Anhang 4.1.3: Feuchtes Kork-Infill.

Probennahme KRP OS für Siebanalyse. Infill haftet unter den Schuhen an.



Anhang 4.1.4: Ansicht nasses Infill im Sauger.

Probennahme KRP OS, feuchter Kunstrasenplatz.



Anhang 4.1.5: Beispiel klassierte Proben Siebanalyse.

Probe Eckpunkt vom Kunstrasenplatz Osnabrück.



Anhang 4.2: Versuchsaufbau Stampfvolumeter.

Rüttel- und Schüttdichtebestimmung, links: mit Quarzsand und Kork; rechts mit Kunststoffgranulat (EPDM).



Anhang 4.3: Ansicht Helium-Pyknometer

(Thermo Fisher Scientific, Pyknomatik-ATC).



Anhang 4.4: Windkanal - Simulation

Anhang 4.4.1: Ansicht Anemometer (testo 405i).

Messinstrument zur Messung der Ablösegeschwindigkeit im Windkanal.



Anhang 4.4.2: Aufbau Windkanal.



Anhang 4.4.3: Beispielbild. Messung der Ablösegeschwindigkeit.

Ablösegeschwindigkeitsbestimmung von Kork als Haufwerk mit Barriere.



Anhang 5: Entwässerungsschächte KRP OB

(eigene Darstellung in Google Maps, Luftbild).

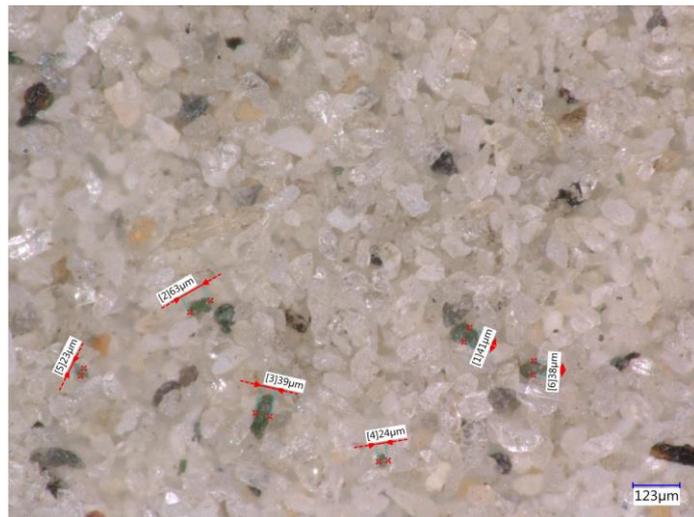


Anhang 6: Mikroskopbilder Siebanalyse.

Ermittlung der Korngrößenverteilung. Kork und EPDM Abrieb.

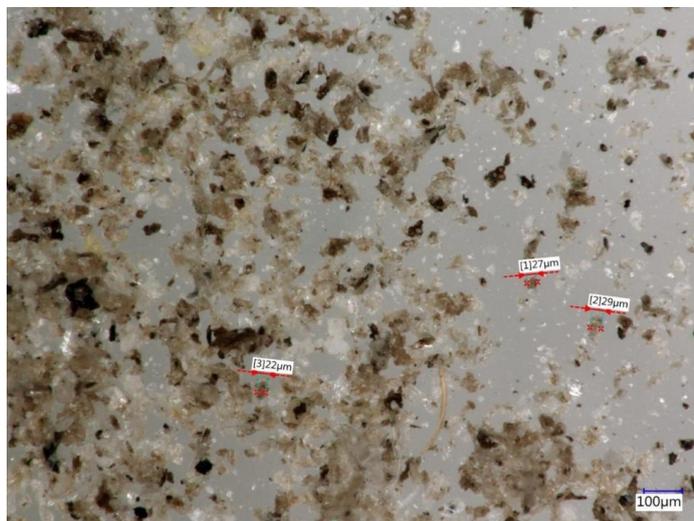
Anhang 6.1: EPDM Abrieb.

EPDM-Sandgemisch (Fraktion < 63 μm) (VHX 6000 Keyence, Digitalmikroskop).



Anhang 6.2: Kork Abrieb.

Kork-Sandgemisch (Fraktion < 63 μm Elfmeterpunkt) (VHX 6000 Keyence, Digitalmikroskop).



Anhang 7: Messdaten der Versuche.

Anhang 7.1: Rohdaten Siebanalyse KRP OS & OB.

Siehe zusätzlich auf USB-Stick.

Platz Osnabrück-Nahne	Sand+Kork	Dichte Kork			
Probe	Eckfahne	Elfmeterpunkt/Sechzehner	Mittelpunkt	Mittellinie	Mitte Tor
Feuchtgewicht (in g)	1882,3	1839,65	1402,92	2287,88	1723,97
Trockengewicht (in g)	1446,33	1450	1164,29	1809,6	1346,61
Wassergehalt (in g)	435,97	389,65	238,63	478,28	377,36
Wassergehalt (in %)	30,14	26,87	20,50	26,43	28,02
Probe	Eckfahne	Elfmeter/Sechzehner	Mittelpunkt	Mittellinie/Rand	Mitte Tor
Fraktion					
					Trockengewicht (in g)
> 2mm	1,27		0,9		0,95
> 1 mm	131,35		175	112,79	105,1
> 0,5 mm	1041,5		1161,80	933,32	1361,6
> 0,3 mm	153,35		71,3	92,62	95,7
> 0,1 mm	89,66		33,1	18,84	64,9
> 63 µm	3,7		3,27	1,66	2,9
< 63 µm	1,03		3,04	0,98	2,6
Summe	1421,86		1448,41	1161,16	1634,16
Probe	Eckfahne	Elfmeter/Sechzehner	Mittelpunkt	Mittellinie/Rand	Mitte Tor
> 2mm	0,09		0,06	0,08	0,08
> 1 mm	9,24		12,08	9,71	6,43
> 0,5 mm	73,25		80,21	80,38	83,32
> 0,3 mm	10,79		4,92	7,98	5,86
> 0,1 mm	6,31		2,29	1,62	3,97
> 63 µm	0,26		0,23	0,14	0,18
< 63 µm	0,07		0,21	0,08	0,16
Summe	100,00		100,00	100,00	100,00
Sand + EPDM	Dichte EPDM				
Probe	Eckpunkt	16er/Elfmeter	Mitte/Tor	Mittelpunkt	Mittellinie Rand/z. Nordseite
Feuchtgewicht (in g)	672,45	767,42	1653,22	966,39	1092,57
Trockengewicht (in g)	571,85	633,82	1418,00	783,30	868,02
Wassergehalt (in g)	100,60	133,60	235,22	183,09	224,55
Wassergehalt (in %)	17,59	21,08	16,59	23,37	25,87
Probe	Eckpunkt	16er/Elfmeter	Mitte/Tor	Mittelpunkt	Mittellinie Rand/z. Nordseite
Fraktion					
					Trockengewicht (in g)
> 2mm	13,52	7,61	11,47	19,03	16,16
> 1 mm	91,43	38,54	66,69	142,74	137,35
> 0,5 mm	368,28	285,35	851,44	373,13	461,02
> 0,3 mm	79,61	252,24	389,66	190,70	180,60
> 0,1 mm	18,90	49,16	96,75	57,89	71,42
> 63 µm	0,08	0,20	0,86	0,31	0,85
< 63 µm	0,03	0,01	0,22	0,03	0,17
Summe	571,85	633,11	1417,09	783,83	867,57
Probe	Eckpunkt	16er/Elfmeter	Mitte/Tor	Mittelpunkt	Mittellinie Rand/z. Nordseite
Fraktion					Anteile (in %)
> 2mm	2,3643	1,2020	0,8094	2,4278	1,8627
> 1 mm	15,9885	6,0874	4,7061	18,2106	15,8316
> 0,5 mm	64,4015	45,0712	60,0837	47,6034	53,1392
> 0,3 mm	13,9215	39,8414	27,4972	24,3293	20,8168
> 0,1 mm	3,3051	7,7648	6,8274	7,3855	8,2322
> 63 µm	0,0140	0,0316	0,0607	0,0395	0,0980
< 63 µm	0,0052	0,0016	0,0155	0,0038	0,0196
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Anhang 7.2: Rohdaten Schütt- und Rütteldichtebestimmung.

Siehe zusätzlich auf USB-Stick.

Schüttichte Bestimmung						
Vorarbeiten:		Trocknung des Infill im Trockenschrank bei 60°C				
Dauer:		über Nacht				
Infilltyp	Gewicht Einwaage [g]	Gewicht nach Trocknung [g]	Wassergehalt [g]	Wassergehalt [%]		
Sand	500	499,33	0,67	0,13		
Kork	250	176,82	73,18	41,39		
EPDM	250	233,9	16,1	6,88		
Schüttichte:						
ERWEKA Gerät	10 min	1250 Hübe				
250 ml Standzylinder [g]	205,1					
		1 Messung		Mittelwert		
Infilltyp	Startvolumen Standzylinder [l]	Gewicht Standzylinder [g]	Endvolumen Standzylinder [ml]	Gewicht Standzylinder [g]	Endvolumen Standzylinder [ml]	Endvolumen Standzylinder [ml]
Sand	250	369,2	242	369,17	244,67	244,67
Kork	250	35,1	236	35,50	238,67	238,67
EPDM	250	184,8	231	184,33	231,67	231,67
		2 Messung				
		Gewicht Standzylinder [g]	Endvolumen Standzylinder [ml]			
Sand	250	369,2	248			
Kork	250	36,1	240			
EPDM	250	183,5	232			
		3 Messung				
		Gewicht Standzylinder [g]	Endvolumen Standzylinder [ml]			
Sand	250	369,1	244			
Kork	250	35,3	240			
EPDM	250	184,7	232			
Mittelwert Schüttichte [g/ml]		Mittelwert Schüttichte [g/L]	Mittelwert Schüttichte [kg/m³]	Mittelwert Rütteldichte [g/L]		
Sand	1,48	1476,7	1476,7	1508,9		
Kork	0,142	142,0	142,0	148,7		
EPDM	0,74	737,3	737,3	795,7		

Anhang 7.3: Messprotokolle Helium-Pyknometrie.

(Thermo Fisher Scientific, Pyknomatik-ATC).

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für Kork:

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : Kork
 Comment :
 Operator : brch
 Analysis start : 05.11.21 12:14
 Analysis end : 05.11.21 12:50
 Vessel Correction : 0.00000 cc
 Vessel ID number : 0
 Vessel weight : 5.61960 g
 Total weight before : 7.45780 g
 Sample weight before : 1.83820 g
 Total weight after : 7.45780 g
 Sample weight after : 1.83820 g
 Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume : 20.95766 cc (I)
 Cell volume : 25.25597 cc
 Filler volume : 0.00000 cc
 Repeated analyses number : 1
 Flow cleaning time : 60 sec
 Number of cleaning cycles : 6
 Sample cleaning time : 20 sec
 Atm stabilization time : 20 sec
 Restriction delta pressure : 0.20000 bar
 Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
 Equilibrium delta time : 10 sec
 Standard deviation % : 0.500 %
 Number of good measurements : 3
 Number of max. measurements : 10
 High precision : Yes
 Temperature set : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume : 4.67983 cc
 Volume Standard Deviation : 0.00309 cc
 % Standard Deviation on Volume : 0.06595 %
 Average Sample Density : 0.39279 g/cc
 Density Standard Deviation : 0.00026 g/cc
 % Standard Deviation on Density: 0.06594 %
 Average Sample Density after : 0.39279 g/cc

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.
bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc
1.01581	2.03524	1.52931	19.99	4.60774	4.60774	0.00000
1.01581	2.03475	1.52910	19.99	4.61002	4.60888	0.00161
1.01575	2.03255	1.52809	19.99	4.62068	4.61282	0.00691
1.01574	2.03204	1.52789	19.99	4.62578	4.61883	0.00904
1.01578	2.03090	1.52778	19.99	4.66189	4.63612	0.02246
1.01573	2.03117	1.53200	19.99	4.66761	4.65176	0.02268
1.01569	2.03258	1.52871	19.99	4.67212	4.66721	0.00513
1.01571	2.03232	1.52865	19.99	4.67710	4.67228	0.00474
1.01565	2.03195	1.52846	19.99	4.67922	4.67615	0.00364
1.01561	2.03148	1.52825	19.99	4.68118	4.67983	0.00309

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für EPDM:

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : Kunststoff
 Comment :
 Operator : brch
 Analysis start : 05.11.21 13:20
 Analysis end : 05.11.21 13:41
 Vessel Correction : 0.00000 cc
 Vessel ID number : 0
 Vessel weight : 5.62060 g
 Total weight before : 15.71220 g
 Sample weight before : 10.09160 g
 Total weight after : 15.71220 g
 Sample weight after : 10.09160 g
 Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume : 20.95766 cc (I)
 Cell volume : 25.25597 cc
 Filler volume : 0.00000 cc
 Repeated analyses number : 1
 Flow cleaning time : 60 sec
 Number of cleaning cycles : 6
 Sample cleaning time : 20 sec
 Atm stabilization time : 20 sec
 Restriction delta pressure : 0.20000 bar
 Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
 Equilibrium delta time : 10 sec
 Standard deviation % : 0.500 %
 Number of good measurements : 3
 Number of max. measurements : 10
 High precision : Yes
 Temperature set : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume : 6.37257 cc
 Volume Standard Deviation : 0.00275 cc
 % Standard Deviation on Volume : 0.04321 %
 Average Sample Density : 1.58360 g/cc
 Density Standard Deviation : 0.00068 g/cc
 % Standard Deviation on Density: 0.04322 %
 Average Sample Density after : 1.58360 g/cc

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.
bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc
1.01483	2.03680	1.55244	19.99	6.37468	6.37468	0.00000
1.01485	2.03849	1.55328	19.99	6.36946	6.37207	0.00369
1.01483	2.04043	1.55434	19.99	6.37358	6.37257	0.00275

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für KRP Fasern-Oberhausen (OB):

```

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : riso KRP OB
Comment      :
Operator     : riso
Analysis start : 13.01.22 11:41
Analysis end   : 13.01.22 12:16
Vessel Correction : 0.00000 cc
Vessel ID number : 0
Vessel weight : 5.61000 g
Total weight before : 6.77000 g
Sample weight before: 1.16000 g
Total weight after : 6.77000 g
Sample weight after : 1.16000 g
Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume : 20.95766 cc (I)
Cell volume      : 25.25597 cc
Filler volume    : 0.00000 cc
Repeated analyses number : 1
Flow cleaning time : 60 sec
Number of cleaning cycles : 6
Sample cleaning time : 20 sec
Atm stabilization time : 20 sec
Restriction delta pressure : 0.20000 bar
Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
Equilibrium delta time : 10 sec
Standard deviation % : 0.500 %
Number of good measurements : 3
Number of max. measurements : 10
High precision : Yes
Temperature set : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume : 1.02606 cc
Volume Standard Deviation : 0.00115 cc
% Standard Deviation on Volume : 0.11165 %

Average Sample Density : 1.13054 g/cc
Density Standard Deviation : 0.00126 g/cc
% Standard Deviation on Density: 0.11159 %

Average Sample Density after : 1.13054 g/cc
    
```

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc
1.03387	2.04308	1.50207	19.99	1.03871	1.03871	0.00000
1.03385	2.04273	1.50188	19.99	1.03708	1.03789	0.00115
1.03382	2.03915	1.50016	19.99	1.03327	1.03635	0.00279
1.03378	2.03953	1.50033	19.99	1.03461	1.03499	0.00193
1.03379	2.03890	1.50005	19.99	1.03536	1.03441	0.00106
1.03378	2.04133	1.50112	19.99	1.03084	1.03360	0.00243
1.03373	2.04103	1.50091	19.99	1.02594	1.03071	0.00471
1.03373	2.03893	1.49995	19.99	1.02736	1.02805	0.00252
1.03368	2.03758	1.49928	19.99	1.02561	1.02630	0.00093
1.03366	2.04049	1.50061	20.01	1.02520	1.02606	0.00115

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie KRP Fasern-Osnabrück (OS):

```

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : riso KRP OS
Comment      :
Operator     : riso
Analysis start : 13.01.22 13:00
Analysis end   : 13.01.22 13:20
Vessel Correction : 0.00000 cc
Vessel ID number : 0
Vessel weight : 5.61000 g
Total weight before : 6.82000 g
Sample weight before: 1.21000 g
Total weight after : 6.82000 g
Sample weight after : 1.21000 g
Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume : 20.95766 cc (I)
Cell volume      : 25.25597 cc
Filler volume    : 0.00000 cc
Repeated analyses number : 1
Flow cleaning time : 60 sec
Number of cleaning cycles : 6
Sample cleaning time : 20 sec
Atm stabilization time : 20 sec
Restriction delta pressure : 0.20000 bar
Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
Equilibrium delta time : 10 sec
Standard deviation % : 0.500 %
Number of good measurements : 3
Number of max. measurements : 10
High precision : Yes
Temperature set : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume : 1.08581 cc
Volume Standard Deviation : 0.00175 cc
% Standard Deviation on Volume : 0.16160 %

Average Sample Density : 1.11438 g/cc
Density Standard Deviation : 0.00180 g/cc
% Standard Deviation on Density: 0.16163 %

Average Sample Density after : 1.11438 g/cc
    
```

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc
1.02101	2.03464	1.58581	19.99	8.60111	8.60111	0.00000
1.02093	2.03132	1.58394	19.99	8.60279	8.60195	0.00119
1.02091	2.03100	1.58375	19.99	8.60253	8.60214	0.00091
1.02083	2.03473	1.58577	19.99	8.60098	8.60210	0.00098

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für Quarzsand:

```

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : RISO Sand
Comment      : OE320
Operator     : brch
Analysis start : 20.12.21 11:09
Analysis end   : 20.12.21 11:32
Vessel Correction : 0.00000 cc
Vessel ID number : 0
Vessel weight  : 5.62010 g
Total weight before: 28.48190 g
Sample weight before: 22.86180 g
Total weight after : 28.48190 g
Sample weight after : 22.86180 g
Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume      : 20.95766 cc (I)
Cell volume          : 25.25597 cc
Filler volume        : 0.00000 cc
Repeated analyses number : 1
Flow cleaning time   : 60 sec
Number of cleaning cycles : 6
Sample cleaning time : 20 sec
Atm stabilization time : 20 sec
Restriction delta pressure : 0.20000 bar
Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
Equilibrium delta time : 10 sec
Standard deviation % : 0.500 %
Number of good measurements : 3
Number of max. measurements : 10
High precision       : Yes
Temperature set      : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume      : 8.60210 cc
Volume Standard Deviation  : 0.00098 cc
% Standard Deviation on Volume : 0.01136 %

Average Sample Density     : 2.65770 g/cc
Density Standard Deviation : 0.00030 g/cc
% Standard Deviation on Density: 0.01136 %

Average Sample Density after : 2.65770 g/cc
    
```

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie Styroporkugeln:

```

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : styropor
Comment      :
Operator     : ben66999
Analysis start : 18.01.22 16:48
Analysis end   : 18.01.22 17:30
Vessel Correction : 0.00000 cc
Vessel ID number : 0
Vessel weight  : 5.61000 g
Total weight before: 6.01000 g
Sample weight before: 0.40000 g
Total weight after : 6.01000 g
Sample weight after : 0.40000 g
Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume      : 20.95766 cc (I)
Cell volume          : 25.25597 cc
Filler volume        : 0.00000 cc
Repeated analyses number : 1
Flow cleaning time   : 60 sec
Number of cleaning cycles : 6
Sample cleaning time : 20 sec
Atm stabilization time : 20 sec
Restriction delta pressure : 0.20000 bar
Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
Equilibrium delta time : 10 sec
Standard deviation % : 0.500 %
Number of good measurements : 3
Number of max. measurements : 10
High precision       : Yes
Temperature set      : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume      : 8.71168 cc
Volume Standard Deviation  : 0.06351 cc
% Standard Deviation on Volume : 0.72897 %

Average Sample Density     : 0.04592 g/cc
Density Standard Deviation : 0.00033 g/cc
% Standard Deviation on Density: 0.72650 %

Average Sample Density after : 0.04592 g/cc
    
```

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc
1.02101	2.03464	1.58581	19.99	8.60111	8.60111	0.00000
1.02093	2.03132	1.58394	19.99	8.60279	8.60195	0.00119
1.02091	2.03100	1.58375	19.99	8.60253	8.60214	0.00091
1.02083	2.03473	1.58577	19.99	8.60098	8.60210	0.00098

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc
1.02882	2.03417	1.58362	19.99	8.23660	8.23660	0.00000
1.02881	2.03840	1.59143	19.99	8.60665	8.42162	0.26166
1.02878	2.03850	1.59299	19.99	8.70750	8.51691	0.24794
1.02874	2.03859	1.59348	19.99	8.73778	8.68397	0.06866
1.02869	2.03864	1.59412	19.99	8.77988	8.74172	0.03635
1.02861	2.03879	1.59430	19.99	8.78859	8.76875	0.02717
1.02855	2.03861	1.59413	19.99	8.78571	8.78472	0.00444
1.02849	2.03683	1.59307	19.99	8.78340	8.78590	0.00260
1.02843	2.03655	1.59108	19.99	8.66260	8.74391	0.07042
1.02836	2.03947	1.59307	19.99	8.68903	8.71168	0.06351

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für EPDM 0,5-1 mm	Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für EPDM > 2 mm:																																																								
<p> PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT Sample Name : <i>sort-epdm 0,5-1 mm</i> Comment : Operator : ben66999 Analysis start : 08.03.22 14:34 Analysis end : 08.03.22 15:23 Vessel Correction : 0.00000 cc Vessel ID number : 0 Vessel weight : 5.62000 g Total weight before : 16.50000 g Sample weight before: 10.88000 g Total weight after : 16.50000 g Sample weight after : 10.88000 g Weight difference : 0.00000 g </p> <p> ANALYTICAL PARAMETERS Reference volume : 20.95766 cc (I) Cell volume : 25.25597 cc Filler volume : 0.00000 cc Repeated analyses number : 1 Flow cleaning time : 120 sec Number of cleaning cycles : 12 Sample cleaning time : 60 sec Atm stabilization time : 30 sec Restriction delta pressure : 0.20000 bar Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar Equilibrium delta time : 30 sec Standard deviation % : 0.500 % Number of good measurements : 3 Number of max. measurements : 10 High precision : Yes Temperature set : 20.00 Celsius </p> <p> RESULTS Average Sample Volume : 6.80713 cc Volume Standard Deviation : 0.00043 cc % Standard Deviation on Volume : 0.00635 % Average Sample Density : 1.59833 g/cc Density Standard Deviation : 0.00010 g/cc % Standard Deviation on Density: 0.00635 % Average Sample Density after : 1.59833 g/cc </p>	<p> PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT Sample Name : EPDM g2 Comment : Operator : ben66999 Analysis start : 22.03.22 07:43 Analysis end : 22.03.22 08:31 Vessel Correction : 0.00000 cc Vessel ID number : 0 Vessel weight : 5.62000 g Total weight before : 15.87000 g Sample weight before: 10.25000 g Total weight after : 15.87000 g Sample weight after : 10.25000 g Weight difference : 0.00000 g </p> <p> ANALYTICAL PARAMETERS Reference volume : 20.95766 cc (I) Cell volume : 25.25597 cc Filler volume : 0.00000 cc Repeated analyses number : 1 Flow cleaning time : 120 sec Number of cleaning cycles : 12 Sample cleaning time : 60 sec Atm stabilization time : 30 sec Restriction delta pressure : 0.20000 bar Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar Equilibrium delta time : 30 sec Standard deviation % : 0.500 % Number of good measurements : 3 Number of max. measurements : 10 High precision : Yes Temperature set : 20.00 Celsius </p> <p> RESULTS Average Sample Volume : 6.42573 cc Volume Standard Deviation : 0.00160 cc % Standard Deviation on Volume : 0.02486 % Average Sample Density : 1.59515 g/cc Density Standard Deviation : 0.00040 g/cc % Standard Deviation on Density: 0.02486 % Average Sample Density after : 1.59515 g/cc </p>																																																								
<p> MEASUREMENT RAW DATA </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Patmh bar</th> <th>Prh bar</th> <th>Pch bar</th> <th>Temp Celsius</th> <th>Volume cc</th> <th>Aver.Vol. cc</th> <th>Aver.Dev. cc</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.01159</td> <td>2.03164</td> <td>1.55408</td> <td>19.99</td> <td>6.80666</td> <td>6.80666</td> <td>0.00000</td> </tr> <tr> <td>1.01150</td> <td>2.03160</td> <td>1.55403</td> <td>19.99</td> <td>6.80751</td> <td>6.80708</td> <td>0.00060</td> </tr> <tr> <td>1.01149</td> <td>2.03147</td> <td>1.55395</td> <td>19.99</td> <td>6.80721</td> <td>6.80713</td> <td>0.00043</td> </tr> </tbody> </table>	Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc	1.01159	2.03164	1.55408	19.99	6.80666	6.80666	0.00000	1.01150	2.03160	1.55403	19.99	6.80751	6.80708	0.00060	1.01149	2.03147	1.55395	19.99	6.80721	6.80713	0.00043	<p> MEASUREMENT RAW DATA </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Patmh bar</th> <th>Prh bar</th> <th>Pch bar</th> <th>Temp Celsius</th> <th>Volume cc</th> <th>Aver.Vol. cc</th> <th>Aver.Dev. cc</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.02439</td> <td>2.03644</td> <td>1.55748</td> <td>19.99</td> <td>6.42640</td> <td>6.42640</td> <td>0.00000</td> </tr> <tr> <td>1.02429</td> <td>2.03437</td> <td>1.55631</td> <td>19.99</td> <td>6.42391</td> <td>6.42516</td> <td>0.00176</td> </tr> <tr> <td>1.02422</td> <td>2.03341</td> <td>1.55581</td> <td>19.99</td> <td>6.42689</td> <td>6.42573</td> <td>0.00160</td> </tr> </tbody> </table>	Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc	1.02439	2.03644	1.55748	19.99	6.42640	6.42640	0.00000	1.02429	2.03437	1.55631	19.99	6.42391	6.42516	0.00176	1.02422	2.03341	1.55581	19.99	6.42689	6.42573	0.00160
Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc																																																			
1.01159	2.03164	1.55408	19.99	6.80666	6.80666	0.00000																																																			
1.01150	2.03160	1.55403	19.99	6.80751	6.80708	0.00060																																																			
1.01149	2.03147	1.55395	19.99	6.80721	6.80713	0.00043																																																			
Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc																																																			
1.02439	2.03644	1.55748	19.99	6.42640	6.42640	0.00000																																																			
1.02429	2.03437	1.55631	19.99	6.42391	6.42516	0.00176																																																			
1.02422	2.03341	1.55581	19.99	6.42689	6.42573	0.00160																																																			

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für EPDM klassiert	Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für Kork klassiert																																																																						
<p>PICNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT</p> <p>Sample Name : epdm klassiert Comment : Operator : ben66999 Analysis start : 08.03.22 13:04 Analysis end : 08.03.22 13:53 Vessel Correction : 0.00000 cc Vessel ID number : 0 Vessel weight : 5.62000 g Total weight before : 16.22000 g Sample weight before : 10.60000 g Total weight after : 16.22000 g Sample weight after : 10.60000 g Weight difference : 0.00000 g</p> <p>ANALYTICAL PARAMETERS</p> <p>Reference volume : 20.95766 cc (1) Cell volume : 25.25597 cc Filler volume : 0.00000 cc Repeated analyses number : 1 Flow cleaning time : 120 sec Number of cleaning cycles : 12 Sample cleaning time : 60 sec Atm stabilization time : 30 sec Restriction delta pressure : 0.20000 bar Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar Equilibrium delta time : 30 sec Standard deviation % : 0.500 % Number of good measurements : 3 Number of max. measurements : 10 High precision : Yes Temperature set : 20.00 Celsius</p> <p>RESULTS</p> <p>Average Sample Volume : 4.74767 cc Volume Standard Deviation : 0.00342 cc % Standard Deviation on Volume : 0.95069 % Average Sample Density : 1.57087 g/cc Density Standard Deviation : 0.00080 g/cc % Standard Deviation on Density: 0.05071 % Average Sample Density after : 1.57087 g/cc</p>	<p>PICNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT</p> <p>Sample Name : kork klassiert Comment : Operator : ben66999 Analysis start : 22.03.22 08:35 Analysis end : 22.03.22 09:24 Vessel Correction : 0.00000 cc Vessel ID number : 0 Vessel weight : 5.62000 g Total weight before : 7.41000 g Sample weight before : 1.79000 g Total weight after : 7.41000 g Sample weight after : 1.79000 g Weight difference : 0.00000 g</p> <p>ANALYTICAL PARAMETERS</p> <p>Reference volume : 20.95766 cc (1) Cell volume : 25.25597 cc Filler volume : 0.00000 cc Repeated analyses number : 1 Flow cleaning time : 120 sec Number of cleaning cycles : 12 Sample cleaning time : 60 sec Atm stabilization time : 30 sec Restriction delta pressure : 0.20000 bar Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar Equilibrium delta time : 30 sec Standard deviation % : 0.600 % Number of good measurements : 3 Number of max. measurements : 10 High precision : Yes Temperature set : 20.00 Celsius</p> <p>RESULTS</p> <p>Average Sample Volume : 4.12293 cc Volume Standard Deviation : 0.00488 cc % Standard Deviation on Volume : 0.11824 % Average Sample Density : 0.43416 g/cc Density Standard Deviation : 0.00051 g/cc % Standard Deviation on Density: 0.11822 % Average Sample Density after : 0.43416 g/cc</p>																																																																						
<p>MEASUREMENT RAW DATA</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Patmh</th> <th>Prh</th> <th>Pch</th> <th>Temp</th> <th>Volume</th> <th>Aver.Vol.</th> <th>Aver.Dev.</th> </tr> <tr> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>Celsius</th> <th>cc</th> <th>cc</th> <th>cc</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.01371</td> <td>2.03562</td> <td>1.55641</td> <td>19.99</td> <td>6.75050</td> <td>6.75050</td> <td>0.00000</td> </tr> <tr> <td>1.01367</td> <td>2.03572</td> <td>1.55636</td> <td>19.99</td> <td>6.74401</td> <td>6.74725</td> <td>0.00459</td> </tr> <tr> <td>1.01359</td> <td>2.03280</td> <td>1.55484</td> <td>19.99</td> <td>6.74911</td> <td>6.74787</td> <td>0.00342</td> </tr> </tbody> </table>	Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.	bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc	1.01371	2.03562	1.55641	19.99	6.75050	6.75050	0.00000	1.01367	2.03572	1.55636	19.99	6.74401	6.74725	0.00459	1.01359	2.03280	1.55484	19.99	6.74911	6.74787	0.00342	<p>MEASUREMENT RAW DATA</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Patmh</th> <th>Prh</th> <th>Pch</th> <th>Temp</th> <th>Volume</th> <th>Aver.Vol.</th> <th>Aver.Dev.</th> </tr> <tr> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>Celsius</th> <th>cc</th> <th>cc</th> <th>cc</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.02391</td> <td>2.03559</td> <td>1.52770</td> <td>19.99</td> <td>4.12803</td> <td>4.12803</td> <td>0.00000</td> </tr> <tr> <td>1.02375</td> <td>2.03562</td> <td>1.52757</td> <td>19.99</td> <td>4.12244</td> <td>4.12524</td> <td>0.00395</td> </tr> <tr> <td>1.02370</td> <td>2.03248</td> <td>1.52593</td> <td>19.99</td> <td>4.11832</td> <td>4.12293</td> <td>0.00488</td> </tr> </tbody> </table>	Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.	bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc	1.02391	2.03559	1.52770	19.99	4.12803	4.12803	0.00000	1.02375	2.03562	1.52757	19.99	4.12244	4.12524	0.00395	1.02370	2.03248	1.52593	19.99	4.11832	4.12293	0.00488
Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.																																																																	
bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc																																																																	
1.01371	2.03562	1.55641	19.99	6.75050	6.75050	0.00000																																																																	
1.01367	2.03572	1.55636	19.99	6.74401	6.74725	0.00459																																																																	
1.01359	2.03280	1.55484	19.99	6.74911	6.74787	0.00342																																																																	
Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.																																																																	
bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc																																																																	
1.02391	2.03559	1.52770	19.99	4.12803	4.12803	0.00000																																																																	
1.02375	2.03562	1.52757	19.99	4.12244	4.12524	0.00395																																																																	
1.02370	2.03248	1.52593	19.99	4.11832	4.12293	0.00488																																																																	

Dichtergebnisse der He-Pyknometrie für Kork 0,5-1 mm	Dichtergebnisse der He-Pyknometrie für Kork > 2 mm:																																																																						
<p> PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT Sample Name : kork klein <i>0,5-1 mm</i> Comment : Operator : ben6999 Analysis start : 08.03.22 15:28 Analysis end : 08.03.22 16:17 Vessel Correction : 0.00000 cc Vessel ID number : 0 Vessel weight : 5.62000 g Total weight before : 6.87000 g Sample weight before: 1.25000 g Total weight after : 6.87000 g Sample weight after : 1.25000 g Weight difference : 0.00000 g </p> <p> ANALYTICAL PARAMETERS Reference volume : 20.95766 cc (I) Cell volume : 25.25597 cc Filler volume : 0.00000 cc Repeated analyses number : 1 Flow cleaning time : 120 sec Number of cleaning cycles : 12 Sample cleaning time : 60 sec Atm stabilization time : 30 sec Restriction delta pressure : 0.20000 bar Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar Equilibrium delta time : 30 sec Standard deviation % : 0.500 % Number of good measurements : 3 Number of max. measurements : 10 High precision : Yes Temperature set : 20.00 Celsius </p> <p> RESULTS Average Sample Volume : 2.88372 cc Volume Standard Deviation : 0.00938 cc % Standard Deviation on Volume : 0.32520 % Average Sample Density : 0.43347 g/cc Density Standard Deviation : 0.00141 g/cc % Standard Deviation on Density: 0.32462 % Average Sample Density after : 0.43347 g/cc </p>	<p> PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT Sample Name : kork gross <i>> 2 mm</i> Comment : Operator : ben6999 Analysis start : 08.03.22 16:26 Analysis end : 08.03.22 17:10 Vessel Correction : 0.00000 cc Vessel ID number : 0 Vessel weight : 5.62000 g Total weight before : 7.87000 g Sample weight before: 2.25000 g Total weight after : 7.87000 g Sample weight after : 2.25000 g Weight difference : 0.00000 g </p> <p> ANALYTICAL PARAMETERS Reference volume : 20.95766 cc (I) Cell volume : 25.25597 cc Filler volume : 0.00000 cc Repeated analyses number : 1 Flow cleaning time : 120 sec Number of cleaning cycles : 12 Sample cleaning time : 60 sec Atm stabilization time : 30 sec Restriction delta pressure : 0.20000 bar Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar Equilibrium delta time : 30 sec Standard deviation % : 0.500 % Number of good measurements : 3 Number of max. measurements : 10 High precision : Yes Temperature set : 20.00 Celsius </p> <p> RESULTS Average Sample Volume : 5.84419 cc Volume Standard Deviation : 0.01338 cc % Standard Deviation on Volume : 0.22897 % Average Sample Density : 0.38500 g/cc Density Standard Deviation : 0.00088 g/cc % Standard Deviation on Density: 0.22887 % Average Sample Density after : 0.38500 g/cc </p>																																																																						
<p>MEASUREMENT RAW DATA</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Patmh</th> <th>Prh</th> <th>Pch</th> <th>Temp</th> <th>Volume</th> <th>Aver.Vol.</th> <th>Aver.Dev.</th> </tr> <tr> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>Celsius</th> <th>cc</th> <th>cc</th> <th>cc</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.01119</td> <td>2.02924</td> <td>1.50372</td> <td>19.99</td> <td>2.89447</td> <td>2.89447</td> <td>0.00000</td> </tr> <tr> <td>1.01107</td> <td>2.03424</td> <td>1.50588</td> <td>19.99</td> <td>2.87726</td> <td>2.88586</td> <td>0.01217</td> </tr> <tr> <td>1.01104</td> <td>2.03446</td> <td>1.50600</td> <td>19.99</td> <td>2.87942</td> <td>2.88372</td> <td>0.00938</td> </tr> </tbody> </table>	Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.	bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc	1.01119	2.02924	1.50372	19.99	2.89447	2.89447	0.00000	1.01107	2.03424	1.50588	19.99	2.87726	2.88586	0.01217	1.01104	2.03446	1.50600	19.99	2.87942	2.88372	0.00938	<p>MEASUREMENT RAW DATA</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Patmh</th> <th>Prh</th> <th>Pch</th> <th>Temp</th> <th>Volume</th> <th>Aver.Vol.</th> <th>Aver.Dev.</th> </tr> <tr> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>bar</th> <th>Celsius</th> <th>cc</th> <th>cc</th> <th>cc</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.01115</td> <td>2.02996</td> <td>1.54025</td> <td>19.99</td> <td>5.85831</td> <td>5.85831</td> <td>0.00000</td> </tr> <tr> <td>1.01112</td> <td>2.04098</td> <td>1.54560</td> <td>19.99</td> <td>5.83170</td> <td>5.84501</td> <td>0.01882</td> </tr> <tr> <td>1.01111</td> <td>2.04121</td> <td>1.54586</td> <td>19.99</td> <td>5.84257</td> <td>5.84419</td> <td>0.01338</td> </tr> </tbody> </table>	Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.	bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc	1.01115	2.02996	1.54025	19.99	5.85831	5.85831	0.00000	1.01112	2.04098	1.54560	19.99	5.83170	5.84501	0.01882	1.01111	2.04121	1.54586	19.99	5.84257	5.84419	0.01338
Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.																																																																	
bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc																																																																	
1.01119	2.02924	1.50372	19.99	2.89447	2.89447	0.00000																																																																	
1.01107	2.03424	1.50588	19.99	2.87726	2.88586	0.01217																																																																	
1.01104	2.03446	1.50600	19.99	2.87942	2.88372	0.00938																																																																	
Patmh	Prh	Pch	Temp	Volume	Aver.Vol.	Aver.Dev.																																																																	
bar	bar	bar	Celsius	cc	cc	cc																																																																	
1.01115	2.02996	1.54025	19.99	5.85831	5.85831	0.00000																																																																	
1.01112	2.04098	1.54560	19.99	5.83170	5.84501	0.01882																																																																	
1.01111	2.04121	1.54586	19.99	5.84257	5.84419	0.01338																																																																	

Dichteergebnisse der He-Pyknometrie für Kork 0,5-2 mm

PYCNOMATIC - DENSITY MEASUREMENT REPORT

Sample Name : 0.5 2mm kork
 Comment :
 Operator : riso
 Analysis start : 10.03.22 11:45
 Analysis end : 10.03.22 12:41
 Vessel Correction : 0.00000 cc
 Vessel ID number : 0
 Vessel weight : 5.62000 g
 Total weight before : 8.00000 g
 Sample weight before: 2.38000 g
 Total weight after : 8.00000 g
 Sample weight after : 2.38000 g
 Weight difference : 0.00000 g

ANALYTICAL PARAMETERS

Reference volume : 20.95766 cc (I)
 Cell volume : 25.25597 cc
 Filler volume : 0.00000 cc
 Repeated analyses number : 1
 Flow cleaning time : 120 sec
 Number of cleaning cycles : 12
 Sample cleaning time : 60 sec
 Atm stabilization time : 30 sec
 Restriction delta pressure : 0.20000 bar
 Equilibrium delta pressure : 0.00500 bar
 Equilibrium delta time : 30 sec
 Standard deviation % : 0.500 %
 Number of good measurements : 3
 Number of max. measurements : 10
 High precision : Yes
 Temperature set : 20.00 Celsius

RESULTS

Average Sample Volume : 4.59291 cc
 Volume Standard Deviation : 0.01363 cc
 % Standard Deviation on Volume : 0.29677 %
 Average Sample Density : 0.51819 g/cc
 Density Standard Deviation : 0.00154 g/cc
 % Standard Deviation on Density: 0.29699 %
 Average Sample Density after : 0.51819 g/cc

MEASUREMENT RAW DATA

Patmh bar	Prh bar	Pch bar	Temp Celsius	Volume cc	Aver.Vol. cc	Aver.Dev. cc
1.01714	2.03584	1.53013	19.99	4.59619	4.59619	0.00000
1.01699	2.03548	1.52972	19.99	4.58337	4.58978	0.00907
1.01687	2.03503	1.52937	19.99	4.57828	4.58595	0.00923
1.01654	2.03952	1.53168	19.99	4.59519	4.58561	0.00867
1.01650	2.03822	1.53113	20.00	4.60526	4.59291	0.01363

Anhang 7.4: Rohdaten Messreihen Windkanal.

Siehe USB-Stick. Darstellung einer Beispielmessreihe. Messdaten bilden Datengrundlage für Abbildung 26. Rote Markierung nicht abgelöst. Teilweise keine Ablösung zu beobachten bei Stufe 1.

Messreihe Nr. 1						
Material	EPDM					
Größe	> 2 mm					
Dichte	1,5836 g/cc					
Boden	Technikumsboden					
Barriere mit Gitter	/					
Probennummer	Gewicht [g]	Partikelvolumen [cm ³]	Partikeldurchmesser [cm]	Ablösegeschwindigkeit [m/s] Stufe 1	Ablösegeschwindigkeit [m/s] Stufe 2	
1	0,0091	0,005746401	0,222228161	5,52	6,2	
2	0,00805	0,005083354	0,213329339		4,8	
3	0,00762	0,004811821	0,209461215		3,68	
4	0,00825	0,005209649	0,215081609		4,47	
5	0,01003	0,00633367	0,229554392			
6	0,01053	0,006649406	0,23330717		6,16	
Mittelwert	0,00893	0,00564	0,22049	5,52000	5,06200	
Mittelwert	Stufe 1		Stufe 2			
	5,52		5,062			
Standardabweichun	0		0,982820431			

Anhang 7.4.1: Mittelwerte der Messreihen aus „Rohdaten Messreihen Windkanal“ und Diagramme.

Siehe USB-Stick.

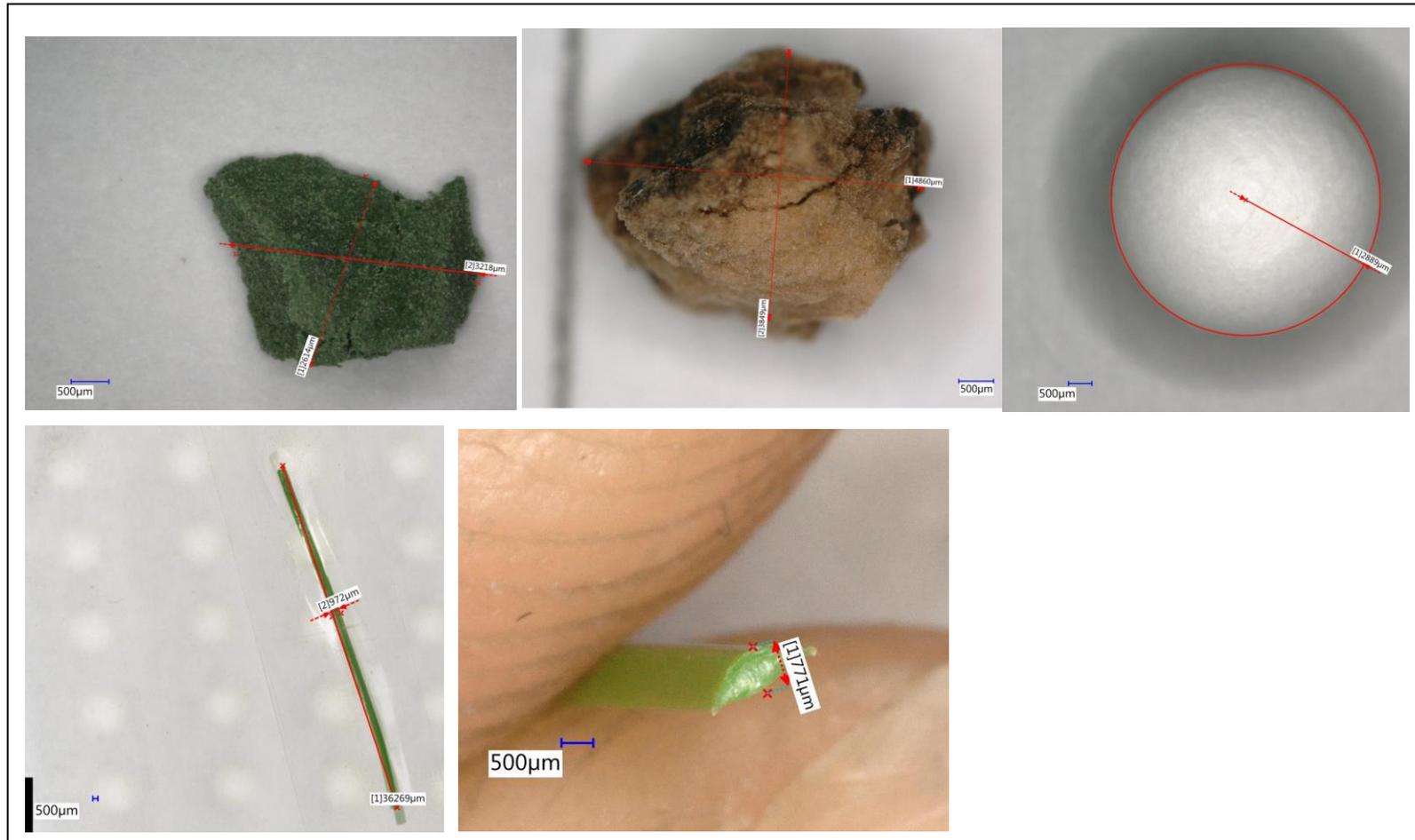
Anhang 7.4.2: Videoaufnahmen, Bestimmung der Partikelablösung im Windkanal.

Siehe USB-Stick.

Anhang 7.4.3: Versuchsergebnisse Windkanal.

Siehe USB-Stick.

Anhang 7.4.4: Digitalmikroskopaufnahmen der Partikel.



Ausmessung der Partikel für die Windkanalversuche.

Bespielfotos von Partikeln (EPDM, Kork, Styropor, KRP Faserdurchmesser und -länge). Siehe USB-Stick.

Anhang 7.5: Rohdaten der Modellflächen der KRP OB und KRP OS.

Datum	durchschnittliche Temperatur [°C]	Mittelwert Windgeschwindigkeit [km/h]	Niederschlag [mm]
14.01.	1,35	7,2	0
15.01.	1,95	7,8	0
16.01.	2,75	14,4	0,5
17.01.	5,7	11	1,5
18.01.	5,55	5,9	0
19.01.	2,95	13,5	2,9
20.01.	1,9	12,8	0,2
21.01.	2,1	7,4	0
Mittelwert	3,03125	10	5,1
22.01.	4,2	7,5	3,8
23.01.	4,7	4,1	0,2
24.01.	3,65	6,6	0
25.01.	2,15	4,9	0
26.01.	1,65	10,6	0
27.01.	4,45	17,2	4
28.01.	4,65	10,5	0,8
Mittelwert	3,635714	8,771429	8,8
29.01.	7,6	19,4	0,9
30.01.	4,85	11,6	4,1
31.01.	3,3	19,3	15,1
01.02.	5	14,8	6,2
02.02.	7,4	10,8	0,4
03.02.	6,5	14,9	1,3
04.02.	5,4	20,2	3,3
Mittelwert	5,807143	15,85714	31,3
05.02.	4,75	19,8	0
06.02.	5	24,9	25
07.02.	4,35	13,3	1,2
08.02.	7,2	17,2	0,7
09.02.	8,45	14	0
10.02.	5	8,3	3,4
11.02.	3,6	13	0,4
Mittelwert	5,478571	15,78571	30,7
12.02.	2,85	12,8	0
13.02.	5,5	18,8	0
14.02.	8,4	20,8	0
15.02.	6,8	16,7	12,5
16.02.	9,55	23,6	18,2
17.02.	9,65	25,6	10,7
18.02.	9,45	27,7	1,6
Mittelwert	7,457143	20,85714	43
19.02.	5,65	25,8	7
20.02.	7,1	27,6	14,6
21.02.	4,55	26,7	5,8
22.02.	6,4	17,8	2,2
23.02.	1,35	12,9	1,6
24.02.	5,55	17,8	3,9
25.02.	3,75	12,7	4,8
Mittelwert	4,907143	20,21429	39,9
26.02.	3,4	6,6	0
27.02.	4,6	18,8	0
28.02.	7	17,2	0
01.03.	6,1	12,6	0
02.03.	6,45	9	0
03.03.	5,85	10,5	0
04.03.	4,5	9,8	0
Mittelwert	5,414286	12,07143	0
05.03.	3,65	7	0
06.03.	2	10,6	0
07.03.	2,85	10,8	0
08.03.	4,55	17,7	0
09.03.	8,1	14,2	0
10.03.	10,15	15,6	0
11.03.	9,45	22,7	0
Mittelwert	5,821429	14,08571	0
12.03.	10,35	17,8	0
13.03.	11,3	13,8	5,2
14.03.	9,15	9,6	5,3
15.03.	7,95	7,6	0,3
16.03.	7,75	17	1,2
17.03.	8,7	10,6	9
18.03.	8,15	12,8	0
Mittelwert	9,05	12,74286	21
19.03.	7,9	16,7	0
20.03.	6,6	14,4	0,2
21.03.	11,2	6,7	0
22.03.	14,05	10,6	0
23.03.	12,85	5,3	0
24.03.	12,15	6	0
25.03.	11,65	11,5	0
Mittelwert	10,91429	10,17143	0,2
26.03.	11,7	10,8	0
27.03.	11,8	10,6	0
28.03.	11,45	7,1	0
29.03.	8,5	11,1	0
30.03.	7,3	12,4	0,8
31.03.	3,55	10,9	9
01.04.	0,5	22,3	5,8
Mittelwert	7,828571	12,17143	15,4
02.04.	2,3	18,1	0
03.04.	2,05	8,3	0
04.04.	4,1	22,9	5,7
05.04.	9,2	14,5	3,7
06.04.	9,25	22,3	2,4
07.04.	9,15	25,9	13,2
08.04.			
Mittelwert	6,008333	18,66667	25

Untersuchungszeitraum [Wochen]	durchschnittliche Temperatur [°C]	Mittelwert Windgeschwindigkeit [km/h]	wöchentlicher Gesamtniederschlag [mm]
1 Woche	3,03	10,00	5,10
2 Woche	3,64	8,77	8,80
3 Woche	5,81	15,86	31,30
4 Woche	5,48	15,79	30,70
5 Woche	7,46	20,86	43,00
6 Woche	4,91	20,21	39,90
7 Woche	5,41	12,07	0,00
8 Woche	5,82	14,09	0,00
9 Woche	9,05	12,74	21,00
10 Woche	10,91	10,17	0,20
11 Woche	7,83	12,17	15,40
12 Woche	6,01	18,67	25,00

Wetterdaten. Messstation Essen-Bredeneu, nächste Wetterstation an Oberhausen. Siehe zusätzlich auf USB-Stick.

Anhang 7.5.1: Protokolle Modellflächen der KRP OB und KRP OS.

Wetterdaten und Beobachtungen. Siehe USB-Stick.

Anhang 7.6: Rohdaten Entwässerungsschächte.

Wetterdaten. Messstation Osnabrück-Belm. Siehe auf USB-Stick.

Anhang 8: Geschätzter jährlicher Input und Output von ELT-Granulat auf Kunstrasenplätzen.

Abgeleitete jährliche Nachfüllmenge von 600-1.200 kg (Verschoor et al. 2021).

