



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

ABSCHLUSSBERICHT

BEWERTUNG DER FREISETZUNG VON MIKROPLASTIK AUS SPORTBÖDEN AUF KUNSTSTOFFBASIS



Maria Kittner
Korinna Altmann
Sven Hamann
Rüdiger Weyer
Ute Kalbe

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

IMPRESSUM

Förderung

Das Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: FKZ 10.08.18.7-22.02

Projektlaufzeit: 09.2022 bis 03.2025

Fachbetreuerin/Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Abteilung WB

Referat WB 3 – Forschung im Bauwesen

Dipl. Ing. Verena Kluth

Verena.kluth@bbr.bund.de

Herausgeber

Bundesanstalt für-Materialforschung und -prüfung

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Autorinnen und Autoren

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Dr. Maria Kittner

Dr. Korinna Altmann

Dr. Ute Kalbe (Projektleitung)

Polytex Sportbeläge Produktions-GmbH, Grefrath

Dr. Sven Hamann

Rüdiger Weyer

Stand

März 2025

Bildnachweis

Titelbild: Polytex Sportbeläge Produktions-GmbH, Grefrath

Lizenz

Dieses Dokument ist unter der Lizenz CC BY 4.0 veröffentlicht (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Zitierweise

Kittner, Maria; Altmann, Korinna, Hamann, Sven; Weyer, Rüdiger; Kalbe, Ute, 2025: Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis. <https://doi.org/10.26272/opus4-63311>

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	7
1. Einführung	8
1.1 Themenfeld	8
1.2 Untersuchungsgegenstand	8
2. Problem- und Zielstellung	10
2.1 Stand der Forschung	10
2.2 Forschungslücke	11
2.3 Zielstellung	12
3. Forschungsdesign	13
3.1 Konzept	13
3.2 Arbeitshypothesen	13
3.3 Methodischer Ansatz	14
3.4 Projektteam, Projektorganisation und Kooperationspartner	14
3.5 Arbeitsschritte und Meilensteine	14
3.6 Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag	15
4. Projektverlauf	16
4.1 Untersuchungsszenarien & Probenauswahl	16
4.2 Umweltsimulation	18
4.2.1 UV-Bewitterung	18
4.2.2 Mechanische Beanspruchung	20
4.3 Polymer-Charakterisierung	21
4.3.1 Mikroskopie	21
4.3.2 Rasterelektronenmikroskopie	21
4.3.3 Dynamische Differenzkalorimetrie	22
4.3.4 Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie	22
4.3.5 Thermogravimetrische Analyse	22
4.4 Mikroplastik-Emissionen	23
4.4.1 Mikroplastik-Freisetzungspotentiale	23
4.4.2 Luft-Emissionen	23
4.4.3 Mikroplastik-Austräge über den Boden-Grundwasser-Pfad	23
4.4.4 Ungebundene Tragschicht	25
4.4.5 Simultanes Probenahme-Konzept	27
4.4.6 Thermo Extraktion/Desorption- Gaschromatographie/Massenspektrometrie	27
4.4.7 Herausforderung EPDM-Analyse	29
4.4.8 Qualitätskontrolle und -sicherung	30
4.4.9 Wiederfindungsraten	30
4.4.10 Vergleich mit Realsportplatz-Ergebnissen	31
4.5 Schadstoff-Austräge	31
4.5.1 Unbeanspruchte Einzel-Komponenten	31
4.5.2 Schadstoffe aus Kunststofffrasensystemen	32
4.5.3 Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma	32

4.5.4 Gaschromatographie/Massenspektrometrie	32
4.6 Recyclierbarkeit von Altrasen	32
5. Ergebnisse	35
5.1 Polymer-Charakterisierung	35
5.1.1 EPDM-Infill	35
5.1.2 Grasfasern	38
5.1.3 Trägermaterial	42
5.1.4 Umwindgarn	45
5.1.5 Kleber	46
5.2 Schadstoff-Emissionen	47
5.2.1 Kunststoffrasen-Einzelkomponenten	47
5.2.2 Kunststoffrasen-Systeme	50
5.3 Mikroplastik-Emissionen	55
5.3.1 Mikroplastik-Freisetzungspotentiale	55
5.3.2 Luft-Emissionen	56
5.3.3 Mikroplastik-Austräge über den Boden-Grundwasser-Pfad	57
5.3.4 Vergleich mit Realsportplatz-Ergebnissen	59
5.4 Herausforderung Massenbilanzierung	60
5.5 Minimierungsmaßnahmen	60
5.6 Recyclingfähigkeit von Altrasen	61
6. Schlussworte	62
7. Anhang	63
7.1 Ergebnis-Transfer	63
7.2 Danksagung	64
7.3 Abkürzungsverzeichnis	65
7.3 Literaturverzeichnis	67
7.5 Abbildungsverzeichnis	72
7.6 Tabellenverzeichnis	74

Kurzfassung

Mikroplastik (MP) sind omnipräsente Kunststoffpartikel mit potenziellen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt. Auf Anraten der Europäischen Chemikalienagentur hat die Europäische Kommission am 25. September 2023 eine umfassende neue Verordnung zur Verringerung von MP-Emissionen in die Umwelt erlassen, die den Verkauf von MP und die Verwendung von absichtlich zugesetztem MP in Produkten einschließt. Dieses Verbot gilt auch für die Verwendung von Füllstoffen aus synthetischem Gummigranulat in Kunststoffrasensystemen, die derzeit in Deutschland überwiegend aus Ethylen-Propylen-Dien-Monomer-Kautschuk (EPDM) hergestellt werden. Dies hat weitreichende Auswirkungen auf den Breitensport, wo sich Kunststoffrasen als multifunktionaler Bodenbelag für zahlreiche Sportarten (z. B. Hockey, Fußball, Leichtathletik) durchgesetzt hat, da er ganzjährig und wetterunabhängig beispielbar ist. Allerdings gibt es bislang nur eine ungenügende Datengrundlage zur Abschätzung des MP-Austrags von Kunststoffrasensystemen in die Umwelt und damit deren Relevanz als MP-Emissionsquelle. Dieses Thema wird v. A. aufgrund der Komplexität der Probenahme, Probenaufbereitung und Detektion kontrovers diskutiert.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurden daher in diesem Projekt die MP-Emissionen aus Sportböden experimentell ermittelt, wobei der Fokus aufgrund der besonderen umweltpolitischen Bedeutung auf dem Boden-Grundwasser-Pfad gelegt wurde. Hierfür wurden insgesamt fünf Kunststoffrasen-Systeme miteinander verglichen, die drei Kunststoffrasen-Szenarien unterschiedlicher technischer Entwicklungsstände in verschiedenen Alterungszuständen (ungealtert, künstlich und in Echtzeit gealtert) repräsentieren: i) die Vergangenheit (zwei real-gealterte Kunststoffrasenproben: fossilbasiert, synthetisches Infill), ii) die Gegenwart (1. In Deutschland am häufigsten verlegte Rasen: fossilbasiert mit EPDM-Verfüllung; 2. Rasen mit biobasierten Grasfasern mit höherer Grasdichte und geringerer EPDM-Verfüllung) und iii) die Zukunft (Rasen mit recycelten Grasfasern ohne synthetisches Infill). Hierfür werden fabrik-neue Kunststoffrasensysteme unter Laborbedingungen mittels UV-Bewitterungsgerät sowie mechanischer Beanspruchung beschleunigt gealtert, um die Freiland-Beanspruchung der Lebensdauer eines Kunststoffrasens von ca. 15 Jahren abzubilden. Zur Bestimmung des Degradationszustandes und damit Evaluierung der beschleunigten Alterung erfolgten zudem polymerwissenschaftliche Analysen i) auf funktionelle Gruppen mittels Abgeschwächter Totalreflexion-Fourier Transform Infrarot Spektroskopie, ii) der Phasenstruktur mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie, iii) des thermischen Zersetzungsverhaltens mittels Thermogravimetrie sowie iv) morphologische Änderungen mittels Rasterelektronenmikroskopie. Die polymerwissenschaftlichen Ergebnisse zeigten hohe Übereinstimmungen mit den Vergleichsproben von real gealterten Rasen am Ende der Nutzungsdauer.

Zur Ermittlung der MP-Emissionen über den Boden-Grundwasser-Pfad wurden innerhalb dieses Projektes eine neuartige Mikroplastik Eluat Lysimeter Anlage (MEL) entwickelt und hergestellt. MEL ermöglicht erstmalig die simultane Beprobung auf partikuläre und gelöste Kontaminanten aus Kunststoffrasen-Systemen unter kontrollierten Laborbedingungen. Die Bestimmung der MP-Massengehalte erfolgte mittels Thermo Extraktion Desorption-Gaschromatographie/Massenspektrometrie (TED-GC/MS) für alle polymeren Komponenten des Kunststoffrasensystems: Infill aus EPDM/Thermoplastische Elastomere (TPE), Grasfasern aus Polyethylen (PE), mit Polyurethan (PU) verklebtes Trägertextil aus Polypropylen (PP), Umwindgarn aus Polyethylenterephthalat (PET), Kleber aus PU oder Polystyrol-basiert (PS) und die mit PU vernetzte elastische Tragschicht aus Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR). Ergänzend wurden Schütteltests der neuen Kunststoffrasen-Komponenten durchgeführt, um das MP-Freisetzungspotenzial von Kunststoffrasen zu ermitteln, und es wurde eine Siebfractionierung der EPDM-Infill-Mischungen vorgenommen, um potentielle Luft-Emissionen von den bei der mechanischen Beanspruchung frei werdenden Feinstaub-Partikel zu ermitteln. Da aus Kunststoffrasen auch gelöste umweltrelevante Schadstoffe freigesetzt werden können, wurden die Eluate zusätzlich auf Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) mittels Gaschromatographie/Massenspektrometrie und Schwermetalle mittels optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma analysiert.

Die Ergebnisse zeigten, dass keine PAK- oder Schwermetallkonzentrationen über den gesetzlichen Grenzwerten für alternative granulierten Baustoffe in Deutschland lagen, die den Boden- und Grundwasserschutz berücksichtigen. Die MP-Ergebnisse ergaben, dass aus fabrik-neuen Kunststoffrasen-Systemen nur minimale MP-Emissionen in die Grundwasserschichten ausgetragen werden ($< 1 \text{ mg/m}^2$) - sowohl bei den Gegenwarts- als auch bei dem Zukunftsszenario. Die Bewitterungen und mechanischen Beanspruchungen führten bei allen untersuchten Szenarien zu einem Anstieg der MP-Gehalte. Die höchsten MP-Emissionen wurden in dem Vergangenheits-Szenario bzw. in den zwei in Echtzeit gealterten Kunststoffrasen detektiert und entsprachen 136,4 bis 252,5 mg/m^2 . Deutlich geringere Gesamt-Emissionen wurden sowohl in beschleunigt gealterten Rasen des Gegenwarts-Szenarios bzw. des am häufigsten in Deutschland verlegten Kunststoffrasen-Systems

mit 5,4 bis 8,0 mg/m² und der niedrigste Gesamt-Gehalt in beschleunigt gealtertem Rasen des Zukunftsszenarios mit 0,2 bis 5,3 mg/m² detektiert. Im Allgemeinen waren die Rasenbestandteile mit den höchsten MP-Emissionen das Infill aus synthetischem Gummigranulat und die Grasfasern. Bei der Extrapolation der MP-Ergebnisse für einen Standard-Kunstrasenplatz (7.000 m²) entsprachen die maximal ermittelten MP-Emissionen in die Grundwasserschichten ca. 1,06 kg für das Vergangenheits-, ca. 0,06 kg für das Gegenwarts- und ca. 0,03 kg für das Zukunftsszenario. Im Allgemeinen waren die höchsten MP-Emissionen bei den Rasenkomponenten die Gummifüllung und die Grasfasern.

Abstract

Microplastics (MP) are omnipresent particles with potential effects on humans and the environment. Following the recommendation of the European Chemicals Agency, on 25 September 2023, the European Commission passed a comprehensive new regulation to reduce MP emissions into the environment, which includes the sale and use of intentionally added MP. This also applies to the application of synthetic rubber granulate infill in artificial turf systems, most of which are currently in Germany made of ethylene propylene diene monomer rubber (EPDM). This has far-reaching implications for popular sports, where artificial turf is widely used as a multifunctional surface for numerous types of sports (e. g. hockey, football, athletics), as it can be intensively played on all year round regardless of the weather conditions. So far, there is no sufficient database for estimating MP emissions from artificial turf sports pitches into the environment and thus their relevance as a source of MP pollution. This topic is controversially discussed due to the complexity of sampling, sample preparation and detection.

To close this research gap, this project experimentally determined MP emissions from artificial turf sports pitches, focusing on the soil-groundwater pathway due to its high eco-political significance. Within this study, a total of five turfs were compared. They represented three artificial turf systems of different technical development stages of three ageing states (unaged, artificially aged and aged in real time): i) the past (two old turfs: fossil based, synthetic infill), ii) the present (1. most commonly installed turf in Germany: fossil based, EPDM infill, 2. turf with bio-based grass fibres, higher grass density, less EPDM-Infill), and iii) the future (turf with recycled grass fibres, no synthetic infill). To simulate the outdoor stress during the service lifespan of an artificial turf sports pitch of approx. 15 years, brand-new artificial turfs and EPDM rubber granulates were accelerated aged using UV weathering and mechanical stress devices. To determine the degradation state and thus evaluate the accelerated aging, polymer analyses were carried out i) for functional groups using Attenuated Total Reflection-Fourier transform infrared spectroscopy, ii) of the phase structure using differential scanning calorimetry, iii) of the thermal degradation behavior using thermogravimetry and iv) morphological changes using raster electron microscopy. The polymer science results showed high correlation with the comparison samples of real aged turfs at the end of their service life.

To determine MP emissions via the soil-groundwater pathway, a novel Microplastics Eluate Lysimeter System (MEL) was developed and manufactured within this project. For the first time, MEL allows simultaneous sampling for particulate and dissolved contaminants from artificial turf systems under controlled laboratory conditions. The MP mass contents were determined using Thermal Extraction Desorption Gas Chromatography/Mass Spectrometry (TED-GC/MS) for all polymer components of the artificial turf system: infill made of EPDM/thermoplastic elastomers (TPE), grass fibres made of polyethylene (PE), polypropylene (PP) carrier textile bonded with polyurethane (PU), winding yarn made of polyethylene terephthalate (PET), adhesive backing glue made of PU or polystyrene-based (PS) and the elastic base layer made of styrene-butadiene rubber (SBR) cross-linked with PU. In addition, shake tests of new artificial turf components were carried out to determine the MP release potential of artificial turf. Further, the EPDM/infill mixtures were analysed using fractional sieving to determine potential air emissions from the fine dust particles released during the mechanical stress tests. Since dissolved environmentally relevant pollutants can also be released from artificial turf systems, the eluates were additionally analysed for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) using Gas Chromatography/Mass Spectrometry and heavy metals using Optical Emission Spectroscopy with Inductively Coupled Plasma.

The results found that no PAH or heavy metal concentrations were below the legal limits in all samples. The MP results showed that only minimal MP emissions are released into the groundwater layers from brand-new artificial turf systems ($< 1 \text{ mg/m}^2$) - both in the present and future scenarios. The weathering and mechanical stresses led to an increase in MP contents in all analysed scenarios. The highest MP emissions were detected in the past scenario in the two real-time aged artificial with 173.9 to 252.5 mg/m^2 . Significantly lower total emissions were detected in both accelerated-aged turfs. Thus, the present scenario respectively the most commonly installed synthetic turf system in Germany had MP emissions of 7.6 to 10.1 mg/m^2 . The lowest total MP contents were detected in accelerated turf of the future scenario with 0.2 to 5.3 mg/m^2 . In general, the turf components with the highest MP emissions were synthetic rubber infills and grass fibres. Extrapolating the MP results for a standard artificial turf pitch (7,000 m^2), the maximum MP emissions into the groundwater layers corresponded on average to approx. 1.06 kg for the past scenario, approx. 0.06 kg for the present scenario and approx. 0.03 kg for the future scenario.

1. Einführung

1.1 Themenfeld

Mikroplastik (MP) sind ubiquitär vorkommende kleinste Kunststoffpartikel, die in allen Umweltkompartimenten weltweit detektierbar sind und in der Umwelt nicht oder nur sehr langsam abgebaut werden (O'Brien et al., 2023, Braun et al., 2021b, Kittner et al., 2022). Zentrale Eintragspfade sind der unabsichtliche Eintrag bzw. unzureichende Abfallverwertung und Recycling. Die Europäische Kommission geht von jährlichen Emissionsmengen in die Umwelt von ca. 1,5 - 4 % der globalen Kunststoffproduktion aus (European Commission, 2018). Bei der aktuellen globalen Produktion von 400,3 Mio t entspricht dies somit ca. 6 - 16 Mio t Kunststoff-Emissionen in die Umwelt jährlich (Plastics Europe, 2023). Diese so in die Umwelt gelangten Kunststoff-Emissionen sind nach ISO/TR 21960: 2020 als feste, wasserunlösliche Partikel synthetischer Polymere definiert, die nach ihren Größenordnungen in Makro- (< 5 mm), großes Mikro- (5 - 1 mm), Mikro- und Nanoplastik (< 1 µm) unterteilt werden. Die Forschung zeigt, dass von allen Partikelgrößen potenziell Risiken für Menschen, Tiere und die Umwelt ausgehen können (Danopoulos et al., 2022, Campanale et al., 2020, Browne et al., 2015).

Daher hat die Europäische Kommission aufgrund der Omnipräsenz und aus dem Vorsorgeprinzips heraus im Rahmen des European Green Deal beschlossen, Maßnahmen zu ergreifen, die künftigen Emissionen von Kunststoffen in die Umwelt zu reduzieren (European Commission, 2020). Um den Eintrag von MP in die Umwelt zu verringern, schlägt die European Chemicals Agency (ECHA) vor, MP in EU-Produkten weitreichend zu beschränken und dadurch den bewussten Austrag von MP in die Umwelt zukünftig zu verbieten. Auf Anraten der ECHA hat daher die Europäische Kommission am 25. September 2023 die neue Verordnung 2023/2055 erlassen, die den Verkauf von MP und die Verwendung von absichtlich zugesetzten MP in Produkten regelt (European Commission, 2023a). Die ersten Maßnahmen, z. B. das Verbot von losem Glitzer und Mikrokügelchen in Kosmetikprodukten, wurden mit dem Inkrafttreten der Verordnung bereits Ende Oktober 2023 wirksam. In anderen Fällen wird das Verkaufsverbot erst nach einem längeren Zeitraum in Kraft treten, um den betroffenen Akteuren Zeit zu geben, Alternativen zu entwickeln und auf diese umzustellen.

Diese neue Verordnung findet auch für die synthetischen Füllstoffe bzw. Elastomere in Kunststoffrasensystemen Anwendung. Obwohl Elastomere per Definition keine Kunststoffe sind, werden diese in der MP-Forschung ebenfalls untersucht, da auch aus ihnen Partikel entstehen, die als synthetische Polymere identifiziert werden (ISO/TR 21960: 2020). Zusätzlich kann auch während der Nutzung von Kunststoffrasenplätzen am Rasenteppich durch Abrieb und Witterungseinflüsse MP entstehen. Noch ist allerdings unklar, wie hoch die Austräge aus Kunststoffrasen in die Umwelt sind und es fehlt eine belastbare Datengrundlage durch wissenschaftliche Studien. Dies begründet sich auch darin, dass die Analytik von MP in Umweltproben bisher nicht ausgereift war. Ebenso ist die Größenverteilung der emittierten MP-Partikel unbekannt und die Datenlage zur Freisetzung von Schadstoffen komplex. Eine Übergangsfrist von 6 Jahren nach Inkrafttreten des Verbotes ist derzeit geplant, um die Möglichkeit zu geben, Kunststoffrasenplätze unter Aufrechterhaltung des Spielbetriebes anzupassen. Diese Zeit muss genutzt werden, um die Datengrundlage für Aussagen zur MP-Freisetzung aus Sportplätzen zu verbessern sowie Materialentwicklungen und technische Maßnahmen vorzunehmen, um die MP-Emissionen zu minimieren.

1.2 Untersuchungsgegenstand

Kunststoffrasen sind multifunktionale Böden, die weitestgehend wetterunabhängig ganzjährig und intensiver als Naturrasen bespielt werden können. Im Vergleich zu Naturrasen erfordern Kunststoffrasen zudem einen geringeren Pflegeaufwand. Dadurch haben sie sich im Breitensport für viele Spiel- und Sportarten (z. B. Hockey, Fußball, Leichtathletik) etabliert. Kunststoffrasensysteme sind Aufbauten aus mehreren Komponenten, die sich je nach Hersteller und Produkttyp unterscheiden (DIN 18035-7: 2014). Die unterschiedlichen Kunststoffrasen werden ihrer Entwicklungsgeschichte nach Generationen unterschieden. Rasen der ersten Generation wurde seit den 1960ern verbaut und verfügte über eine sehr kurze Polschicht, was der Länge der Grasfasern über dem Trägermaterial entspricht. Ab den 1980ern wurde Rasen der zweiten Generation entwickelt, der ebenfalls eine geringe Polschicht von 25 - 30 mm aufwies, die aber hoch mit Quarzsand verfüllt wurde.

Im Breitensport hat sich der Kunststoffrasen der dritten Generation durchgesetzt, welcher in den 1990ern entwickelt wurde und schematisch in **Abb. 1** dargestellt ist. Er besteht aus Grasfasern aus Polyethylen (PE) mit einer Polhöhe > 35 mm, welche in ein Trägermaterial aus Polypropylen (PP) getuftet und mit Umwindegarn aus Polyethylenterephthalat (PET) stabilisiert werden. Dieses Geotextil ist auf der Rückseite mit Polyurethan (PU) verklebt, um den Halt der Grasfasern zu verbessern und sie zu verstärken. Für eine optimale Bespielbarkeit, wird der Kunststoffrasen auf einer elastischen oder elastisch gebundenen Tragschicht verlegt, welche aus PU verklebtem Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR, i. d. R. Altreifengranulate) besteht. Darunter wird als Drainageschicht und Frostschutz eine ungebundene Tragschicht aus mineralischer Gesteinskörnung mit einer Horizontdicke von > 20 cm über dem Baugrund ausgebracht. Die letzte Schicht ist der Baugrund, dessen Unterbau ggf. Aufschüttungen zum Höhenausgleich oder Verbesserung der Tragfähigkeit oder ein Drainagesystem zur Entwässerung enthalten kann. Darunter befindet sich der Untergrund bzw. der natürlich vorhandene Boden. Der Kunststoffrasen wird mit Quarzsand zum Beschweren und zum Aufrichten der Grasfasern verfüllt, der auch der Feuchtigkeitsaufnahme dient. Abschließend wird darauf eine Schicht aus Füllstoffen eingebracht. Hierbei handelt es sich überwiegend um synthetische Gummi-Granulate, die als sogenanntes Performance-Infill die Spieleigenschaften auf dem Feld verbessern sowie die Verletzungsgefahren minimieren sollen. Diese Granulate werden bei Austrag vom Sportplatz in die Umwelt als (großes) MP eingestuft, da die Partikel < 5 mm sind. In der Vergangenheit wurden überwiegend Granulate aus geschredderten Altautoreifen als Performance-Infill verwendet. Aufgrund der Schadstoffgehalte, v. A. an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und Schwermetallen (Kalbe et al., 2016, Kalbe et al., 2012), hat sich allerdings die Verwendung umweltverträglicherer Materialien durchgesetzt. Heute ist die am weitesten verbreitete synthetische Alternative die Verwendung von Neugranulaten aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM). Zu den Alternativen aus Naturmaterialien gehören z. B. geschredderte Olivenkerne oder Kork.

Seit den 2000ern werden Kunststoffrasensysteme der vierten Generation produziert, bei dem verschiedene Kunststoffrasen-Fasern unterschiedlicher Längen und Strukturen mit dem Ziel verbaut werden, auf Füllstoffe zu verzichten und gleichzeitig die bestmögliche Bespielbarkeit zu gewährleisten. Außerdem werden für die Rasenfasern keine Mischungen von Kunststoffen mehr verwendet, um die Recyclierbarkeit dieser Komponente zu ermöglichen.

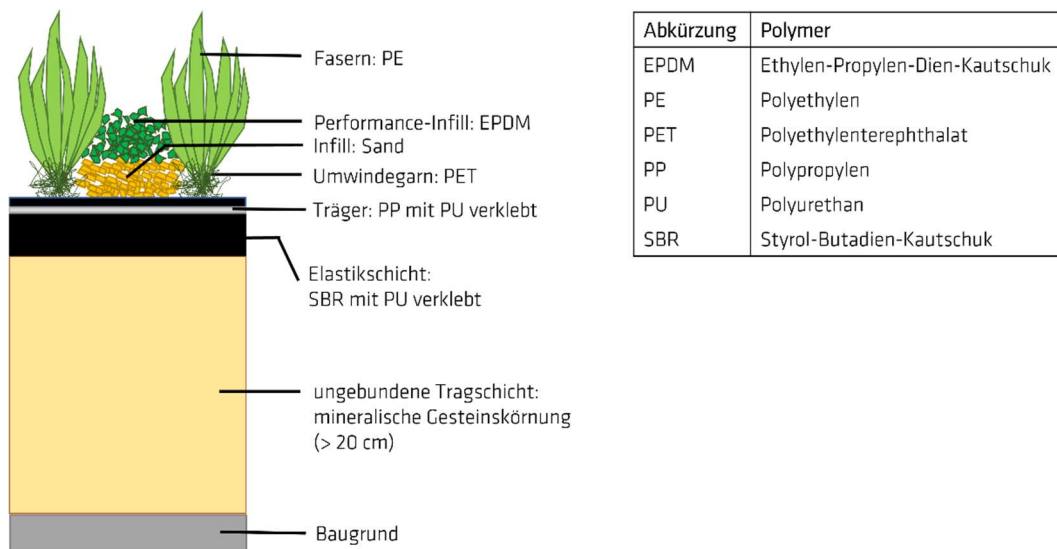


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Kunststoffrasens der dritten Generation.

2. Problem- und Zielstellung

Um den Eintrag von MP in die Umwelt zu reduzieren, ist der Einsatz von synthetischen Gummigranulaten als Füllmittel auf Kunststoffrasen seit September 2024 europaweit verboten. Es gibt eine Übergangsfrist von 6 Jahren nach Inkrafttreten des Verbotes, um die Möglichkeit zu geben, Kunststoffrasenplätze unter Aufrechterhaltung des Spielbetriebes anzupassen (European Commission, 2023a). Diese Zeit muss genutzt werden, um die Datengrundlage für Aussagen zur MP-Freisetzung aus Sportplätzen zu verbessern sowie Materialentwicklungen und technische Maßnahmen vorzunehmen, um die MP-Emissionen zu minimieren. Zahlreiche wissenschaftliche Studien zur Entstehung und Verbreitung von MP wurden weltweit begonnen. Die Spezifik der Sportböden wurde dabei bisher kaum berücksichtigt. Aufgrund des hohen umweltpolitischen Drucks müssen aber oft Entscheidungen durch Behörden gefällt werden, ohne dass ausreichende Erkenntnisse zur Relevanz und Größenordnung der Problematik vorhanden sind. Das Verbot führt grundsätzlich zur Besorgnis um die Zukunft von Spielfeldern und damit den Auswirkungen besonders auf Fußballvereine und den Breitensport. Die Umsetzung von geforderten Maßnahmen könnte Sportvereine und Kommunen vor finanzielle Probleme stellen. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sollen dazu beitragen, die Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Thematik MP-Emission aus Sportböden zu überwinden. Erkenntnisse zur Partikelgrößenverteilung ausgetragener MP aus Sportböden können dazu beitragen, Gesundheitsgefahren für Sportler zu erkennen und ggf. zu minimieren.

2.1 Stand der Forschung

Laut ECHA befanden sich 2019 in der EU 13.000 Kunststoffrasen- und 47.000 Bolzplätze, Tendenz steigend (European Chemicals Agency, 2019). Für Deutschland gibt es keine amtlichen Angaben über die Anzahl und Fläche von Kunststoffrasenplätzen (Deutscher Bundestag, 2020). Der DIN NA 005-01-22 AA Arbeitsausschuss Kunststoffflächen und Kunststoffrasenflächen hat hierzu in einer Stellungnahme von 2019 allerdings folgende Daten bereitgestellt: Es wird geschätzt, dass es in Deutschland insgesamt ca. 7.000 Kunststoffrasenplätze gibt, die in Fläche und Einfüllung variieren. Dabei handelt es sich zum größten Teil mit ca. 5.000 Feldern um Großspielfelder mit Durchschnittsgrößen (\varnothing_A) von 7.000 m², von denen ca. 3.500 Felder mit Gummigranulat (1), ca. 1.000 Felder nur mit Sand und ca. 500 Hockeyfelder unverfüllt sind. Zusätzlich gibt es ca. 200 Keinspielfelder von \varnothing_A : 700 m² (2) sowie ca. 1.400 Minispielfelder von \varnothing_A : 260 m² (3), die mit Granulat verfüllt sind. Daraus ergibt sich für das Jahr 2019 folgende Gesamt-Bestandsfläche von mit Gummi-Granulat verfüllten Kunststoffrasenflächen in Deutschland von 2.500,4 ha (4). Bei in Deutschland üblichen Flor- bzw. Faserhöhen von ca. 35 - 40 mm entspricht die durchschnittliche Einfüllmenge 4 - 6 kg/m² und daher im Mittel 5 kg/m² Granulat. Dies ergibt für die Gesamt-Bestandsflächen Mengen an Einfüllgranulat von 125.020 t in Deutschland Stand 2019 (5). Es wird davon ausgegangen, dass jährlich ca. 150 - 200 Großspielfelder aus Kunststoffrasen mit elastischer Verfüllung neu gebaut werden, was einer jährlich benötigten Gesamtmenge an elastischen Verfüllgranulaten für Neubauten/Neuerungen von ca. 6.125 t/a entspricht (6). Folglich beläuft sich die Gesamtmenge an ausgebrachtem Infill-Granulat in Spielfeldern in Deutschland mit Stand 2023 auf ca. 149.500 t (7). Bei Klein- und Minifeldern erfolgt üblicherweise keine Granulat-Auffüllung.

Der Großteil des ausgebrachten Granulats verbleibt auf den Feldern. In Deutschland wird die Menge des jährlich zu ersetzenden Einstreugranulats nicht gesondert erfasst, sodass hierzu keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen. Auf der Grundlage von Befragungen von Vereinen, Kommunen und Fachmännern aus Planung, Bau, Lieferung und Herstellung sowie Erfahrungen seiner Mitglieder schätzt der DIN NA 005-01-22 AA (2019), dass ein Großspielfeld im Durchschnitt mit ca. 300 kg/a Granulat nachbefüllt werden muss. Davon entfallen ca. 60 - 80 % bzw. 180 - 240 kg auf mangelnde oder unsachgemäße Pflegemaßnahmen sowie -techniken, ca. 5 - 15 % bzw. 15 - 45 kg auf Schneeräumungen, ca. 10 - 20 % bzw. 30 - 60 kg auf Starkregenereignisse und Winddrift und ca. 3 - 5 % bzw. 9 - 15 kg auf Anhaftung an Kleidung, Körper und Schuhen der SportlerInnen. Für Deutschland berechnet sich daraus für 3.500 mit elastischem Granulat verfüllten Großspielfeldern eine jährliche Nachfüllmenge von ca. 1.050 t/a (8). Dies ist allerdings nicht automatisch aufgrund von Vorratshaltung und unterschiedlichem Bedarf der Spielfelder mit der Granulat-Verlustmenge gleichzusetzen. Es handelt sich vielmehr um ein berechnetes maximal mögliches jährliches MP-Freisetzungspotential von Gummigranulat-Einstreuungen aus Kunststoffrasenplätzen in Deutschland.

- (1) **Großspielfelder:** $3.500 \times 7.000 \text{ m}^2 = 24.500.000 \text{ m}^2$
- (2) **Kleinspielfelder:** $200 \times 700 \text{ m}^2 = 140.000 \text{ m}^2$
- (3) **Minispielfelder:** $1.400 \times 260 \text{ m}^2 = 364.000 \text{ m}^2$
- (4) **Gesamtfläche:** $24.500.000 \text{ m}^2 + 140.000 \text{ m}^2 + 364.000 \text{ m}^2 = 25.004.000 \text{ m}^2$
- (5) **Gesamtmenge Granulat (Stand 2019):** $25.004.000 \text{ m}^2 \times 5 \text{ kg/m}^2 = 125.020 \text{ t}$
- (6) **Jährliche Neumenge an Granulat:** $\left[\frac{150+200}{2}\right] \times 7.000 \text{ m}^2 \times 5 \text{ kg/m}^2 = 6.125.000 \text{ kg} = 6.125 \text{ t/a}$
- (7) **Gesamtmenge Granulat (Stand 2023):** $125.020 \text{ t} + (4 \times 6.125 \text{ t}) = 149.520 \text{ t}$
- (8) **Jährliche Nachfüllmenge Granulat:** $3.500 \times 300 \text{ kg/a} = 1.050 \text{ t/a}$

Kalkulation für Deutschland nach DIN-NA 005-01-22 AA (2019)

Andere Schätzungen gehen mit 350 - 1.400 kg pro Spielfeld von weitaus höheren jährlichen MP-Emissionen in die Umwelt aus (Hann et al., 2018), womit Kunststoffrasenplätze eine nicht unerhebliche Emissionsquelle für MP in die Umwelt darstellen können. Ferner nennt eine Studie des Fraunhofer-Instituts UMSICHT aus dem Jahr 2018 Verwehungen von Sport- und Spielplätzen als fünftgrößte Mikroplastik-Quelle in die Umwelt mit einer Emissionsmenge von 131,8 g/(cap a). Die Einheit g/(cap a) gibt die Grammmenge pro Person pro Jahr wieder. Zur Größeneinordnung – als die vier größten Emissionsquellen werden Reifenabrieb mit 1228,5 g/(cap a), Emissionen bei der Abfallentsorgung mit 302,8 g/(cap a), Abrieb von Polymeren und Bitumen in Asphalt mit 228,0 g/(cap a) sowie Pelletverluste mit 182,0 g/(cap a) angegeben (Bertling et al., 2018). Die Datengrundlagen dieser Schätzungen werden allerdings von VertreterInnen aus Wissenschaft, Behörden und HerstellerInnen künstlicher Sportböden sehr kritisch betrachtet und für Deutschland als nicht real angesehen.

2.2 Forschungslücke

Es wurden weltweit zahlreiche wissenschaftliche Studien über die Entstehung und Verbreitung von MP in der Umwelt durchgeführt. Die Spezifik der Sportböden wurde dabei bisher kaum berücksichtigt. Zur Abschätzung des Ausmaßes des Beitrages von Sportböden auf Kunststoffbasis im Außenbereich fehlt eine belastbare Datengrundlage durch wissenschaftliche Studien. Bisher gibt es unseres Wissens nach keine verlässlichen Daten zur Abschätzung der MP-Emissionen aus dem Sickerwasser von Kunststoffrasensportplätzen. Außerdem gibt es keine ganzheitlichen Probenahmekonzepte und -geräte, die eine einfache und schnelle Analyse von gelösten und partikulären Schadstoffen in Eluaten aus Bodenmedien ermöglichen (Khan et al., 2024). Dies ist jedoch von großem politischen Interesse und regulatorischer Bedeutung im Hinblick auf die anstehende Revision der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Es wird vorgeschlagen, die Bewertung von MP-Emissionen in Oberflächengewässer und Grundwasser einzubeziehen, um einen guten qualitativen und quantitativen Zustand aller europäischen Wasserkörper zu gewährleisten (European Commission, 2022, European Union, 2000). Dies erfordert jedoch die Entwicklung geeigneter Überwachungsmethoden.

Für die Abschätzung von MP-Emissionen durch Kunststoffrasenplätze müssen die zugrunde liegenden Prozesse der potenziellen Emissionen zielgerichtet untersucht werden. Dies bedarf einer validen Massenbilanzierung, welche einerseits auf belastbaren Daten aus dem Sportplatzbau als auch auf wissenschaftlichen Untersuchungen basieren muss. Bei dieser Forschungslücke setzt dieses Projekt thematisch an und hat das Ziel, die MP-Austräge aus Kunststoffrasen zu bilanzieren und eine Einschätzung zu Schadstofffreisetzungen zu geben. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird daher untersucht, zu welchem Anteil und in welcher Partikelgröße gegenwärtig Kunststofffragmente aus Sportböden in die Umwelt freigesetzt werden.

Der Beschluss der Europäischen Kommission führt grundsätzlich zur Besorgnis um die Zukunft von Spielfeldern und damit den Auswirkungen besonders auf Fußballvereine und den Breitensport. Die Umsetzung von geforderten Maßnahmen könnte Sportvereine und Kommunen vor finanzielle Probleme stellen. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sollen dazu beitragen, die Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Thematik MP-Emission aus Sportböden zu überwinden. Erkenntnisse zur

Partikelgrößenverteilung ausgetragener MP aus Sportböden können dazu beitragen, Gesundheitsgefahren für SportlerInnen zu erkennen und ggf. zu minimieren.

2.3 Zielstellung

Mit diesem Projekt wurden folgende Ziele verfolgt:

1. Die Zuverlässigkeit der aktuellen Datengrundlage zur Risikoabschätzung des Austrages von MP aus Sportböden soll beurteilt werden.
2. Unter Berücksichtigung verschiedenen Austragspfade soll eine Massenbilanz erstellt werden.
3. Hinweise auf Risiken für die menschliche Gesundheit und Umweltverträglichkeit sollen beurteilt werden.

Die übergeordneten Projektziele waren wie folgt: Für den als Projektpartner beteiligten Hersteller und weitere Unternehmen (besonders für kleine und mittlere Unternehmen) aus dem Bereich Garten- und Landschaftsbau tragen die Ergebnisse zur Beseitigung der Unsicherheiten hinsichtlich der Zukunft von Spielfeldern auf Kunststoffbasis bei und bilden eine Grundlage für Maßnahmen zur Minimierung der Risiken für die Umwelt und die Gesundheit von Sporttreibenden.

3. Forschungsdesign

3.1 Konzept

Um die Forschungsfragen zu untersuchen, wurden drei Kunststoffrasen-Szenarien unterschiedlicher technischer Entwicklungsstände in verschiedenen Alterungszuständen (ungealtert, beschleunigt gealtert und in Echtzeit gealtert) verglichen:

1. **Vergangenheit:** zwei real-gealterte Kunststoffrasenproben: fossilbasiert, synthetisches Infill
2. **Gegenwart:**
 - a. der in Deutschland am häufigsten verlegte Kunststoffrasen: fossilbasiert, EPDM-Verfüllung
 - b. Kunststoffrasen mit biobasierten Grasfasern: höherer Grasdichte, geringerer EPDM-Verfüllung
3. **Zukunft:** Kunststoffrasen mit recycelten Grasfasern aus PE, kein synthetisches Infill

Um repräsentative und definiert gealterte Proben zu erhalten, wurde die Freiland-Beanspruchung über die Lebensdauer eines Kunststoffrasens von ca. 15 Jahren unter Laborbedingungen simuliert. Die Umweltsimulation wurde umgesetzt, indem fabrik-neue Kunststoffrasensysteme in einem zweistufigen Prozess bestehend aus initialer UV-Bewitterung und anschließender mechanischer Beanspruchung beschleunigt gealtert wurden. Um die Effekte der Umweltsimulation auf den Degradationszustand zu überprüfen, wurden polymerwissenschaftliche Analysen der einzelnen Beanspruchungszustände durchgeführt. Konkret wurden sowohl Oberflächen- als auch Bulkänderungen der einzelnen Kunststoffrasenkomponenten analysiert. Änderungen der Oberflächenmorphologie wurden mikroskopisch mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und der funktionellen Gruppen spektroskopisch mittels Abgeschwächter Totalreflexion-Fourier Transform Infrarotspektroskopie (ATR-FTIR) analysiert. Änderungen des Bulks bzw. genauer der Phasenmorphologie wurden mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) und der Zersetzungskinetik mittels Thermogravimetrischer Analyse (TGA) bestimmt.

Während der Nutzungsphase eines Kunststoffrasens gibt es verschiedene potenzielle Austragspfade für MP-Emissionen, z. B. Grund- oder Oberflächengewässer, Boden und Luft. Um diese Emissionsquellen unter Laborbedingungen zu adressieren, wurden drei experimentelle Ansätze verfolgt: i) Schüttelversuche zur Ermittlung des MP-Freisetzungspotentials und potentieller Emissionen in umgebende Oberflächengewässer, ii) potentielle Luft-Emissionen mittels Korngrößenverteilungen bzw. fraktionierter Siebung des Füllmaterials nach der beschleunigten Alterung und iii) MP-Austräge in Grundwasser- bzw. Drainage-Schichten mittels eigens für dieses Projekt neu konstruierten Mikroplastik Eluat Lysimetern. Die MP-Massengehalte wurde mittels Thermo Extraktion Desorption-Gaschromatographie/Massenspektrometrie (TED-GC/MS) durchgeführt. Die Detektion erfolgt hier anhand polymerspezifischer thermischer Zersetzungsprodukte, wodurch die MP-Emissionen nach allen sechs polymeren Komponenten des Kunststoffrasensystems aufgeschlüsselt werden können: z. B. synthetisches Infill aus EPDM, Grasfasern aus Polyethylen (PE), mit Polyurethan (PU) verklebtes Trägertextil aus Polypropylen (PP), Umwindgarn aus Polyethylenterephthalat (PET) und die mit PU vernetzte elastische Tragschicht aus Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR). Aus den so ermittelten Daten wird eine Massenbilanzierung erstellt und mit aktueller Fachliteratur verglichen. Daraus ergibt sich eine Einschätzung zur Risikoabschätzung sowie zur Minimierungsmaßnahmen. Neben den partikulären wurden ergänzend gelöste Kontaminaten untersucht. Bei Kunststoffrasen sind dies Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Schwermetalle, die mittels optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) und Gaschromatographie/ Massenspektrometrie (GC/MS) analysiert. Zudem wurde im Rahmen einer Masterarbeit als wissenschaftlicher Ausblick die Frage nach der Verwertungsphase bzw. Recyclierbarkeit von Kunststoffrasen vertiefend analysiert.

3.2 Arbeitshypothesen

Die Arbeitshypothesen bzw. Fragestellungen für dieses Projekt waren wie folgt:

- Wie hoch ist der MP-Masseaustrag bei der Nutzung von künstlichen Sportböden tatsächlich?
- Welche Austragspfade gibt es und wie ist deren Relevanz?
- Welche Prozesse tragen zur Bildung und Verbreitung von MP bei?

- Stellen künstlich gealterte und beanspruchte Modell-Sportböden ein valides Modell dar, um die MP-Austräge bei der Nutzung von Kunststoffrasenplätzen abzuschätzen?
- Welchen Einfluss haben alterungsbedingte Änderungen der Materialeigenschaften auf die Freisetzung von Schadstoffen?
- Werden die Schadstoff-Vorgaben der ECHA eingehalten?
- Kann emittiertes MP als Rohstoff, wie vom Kreislaufwirtschaftsgesetz gefordert, bei der Produktion neuer Kunststoffrasenflächen oder -Komponenten eingesetzt werden?

3.3 Methodischer Ansatz

Um die Arbeitshypothesen zu untersuchen, wurde ein breiter Methodenpool aus sieben verschiedenen wissenschaftlichen (Teil)-Disziplinen angewandt:

1. Umweltsimulation: Bewitterung, Lisport-Tester
2. Materialcharakterisierung: REM, DSC, ATR-FTIR, TGA
3. Bodenkunde: Dichte-Messungen, fraktionierte Siebungsverfahren
4. Elutionsverfahren: Neu entwickeltes Mikroplastik Eluat Lysimeter
5. Mikroplastik-Analytik: TED-GC/MS
6. Schadstoff-Analytik im Eluat: ICP-OES (Anorganik), GC/MS nach Umlösen in Acetonitril (PAK)
7. Recycling: Design of Experiment, mechanische Materialeigenschafts-Prüfungen (u.a. MFR, Materialhärte)

3.4 Projektteam, Projektorganisation und Kooperationspartner

Es handelt sich hier um ein Kooperationsprojekt aus zwei Partnern. Beteiligt sind zwei Fachbereiche der Bundesanstalt für Materialforschung- und prüfung (BAM) sowie als Industriepartner die Polytex Sportbeläge Produktions GmbH (PTX) über die auch das Schwesterunternehmen FormaTurf GmbH eingebunden ist, die beide zur Sportsgroup Holding GmbH gehören. Von der BAM sind die Fachbereiche 4.3 Schadstofftransfer und Umwelttechnologien und 6.6 Physik und chemische Analytik der Polymere involviert, die die Kompetenzen der Umwelt- und Schadstoffanalytik sowie Mikroplastik- und Polymeranalytik in das Projekt einbringen. Die Polytex als Tochterfirma der Polytan GmbH, die weltweit zu den führenden Herstellern von Kunststoffrasensystemen gehört, verfügt über die Kompetenzen der Kunststoffrasenproduktion und Materialentwicklung. Die 2023 neu gegründete FormaTurf hat Kompetenzen im Recycling von Altrasen und dessen Komponenten. Eine Zusammenarbeit der BAM mit der Polytex GmbH und dem Mutterunternehmen Polytan hinsichtlich der Bereitstellung von Materialien und des Austausches von Forschungsergebnissen bestand bereits im Zusammenhang mit vorangegangenen Forschungsvorhaben der BAM (Kalbe et al., 2016, Kalbe et al., 2012), die vom Bundesinstitut für Sportwissenschaft gefördert wurden.

3.5 Arbeitsschritte und Meilensteine

Das Projekt wurde in folgende sechs Arbeitspakete gegliedert:

1. Probenahme
2. Simulation Bewitterung und Beanspruchung von Sportböden
3. Kunststoffanalytik
4. Elutionsversuche
5. Erstellung von Stoffbilanzen
6. Projektmanagement/Öffentlichkeitsarbeit/Berichterstattung

Für den beteiligten Hersteller und weitere Unternehmen (besonders kleine und mittlere Unternehmen) aus dem Bereich Garten- und Landschaftsbau tragen die Ergebnisse zur Beseitigung der Unsicherheiten hinsichtlich der Zukunft von Spielfeldern auf Kunststoffbasis bei und bilden eine Grundlage für Maßnahmen zur Minimierung der Risiken für die Umwelt und die Gesundheit von Sporttreibenden. Die erfolgreiche Umsetzung der

aufgeführten Projektziele lässt sich mittels folgender Ziele überprüfen, die als Meilensteine zeitlich eingeordnet sind:

1. Identifizierung der relevanten Austragspfade von MP aus Kunststoffrasen
2. Einschätzung der Eignung der künstlichen Bewitterung zur Simulation des Austrages von MP
3. Bewertung der Partikelgröße der MP-Partikel in Feinstaub als Grundlage zur Bewertung des potenziellen Gesundheitsrisikos von Kunststoffrasen
4. Erstellung einer Massenbilanz zum Austrag von MP aus typischen Kunststoffrasenplätzen
5. Beurteilung der Einhaltung der Vorgaben (ECHA, BBodSchV) zum Schadstoffaustrag aus Kunststoffrasensystemen an einem typischen Beispiel und Maßnahmenkatalog zur Minimierung des MP-Austrages
6. Identifizierung möglicher Modifizierungen der Ausgangskunststoffe von Kunststoffrasen zur Reduzierung des MP-Austrages und Prüfung der Auswirkungen auf die sporttechnischen Kriterien
7. Einschätzung der Recyclingfähigkeit gesammelter MP-Austräge von Kunststoffrasen
8. Ergebnistransfer zu UBA/ECHA /Normung
9. Ergebnis Workshop nach Ende des Projektes
10. Abschlussbericht

3.6 Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Antrag

Entgegen des ursprünglichen Antrag wurde der Projektfokus auf die MP-Ermittlung von verschiedenen Kunststoffrasenproben unter Laborbedingungen gelegt. Hintergrund ist, dass zeitgleich ein thematisch sehr ähnliches Forschungsprojekt mit dem Titel "Bestimmung und Minderung von Mikroplastik- und Schadstoffemissionen aus Kunststoffrasensportplätzen" (MiMiK, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Projekt 37917/01) des Instituts für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) angelaufen ist. Der Fokus von MiMiK liegt auf der Beprobung der Drainageabwässer von ca. 20 Realsportplätzen. Zur inhaltlichen Abgrenzung und Ergänzung wurde daher in diesem Projekt in Abstimmung mit dem Auftraggeber auf Realbeprobungen verzichtet und stattdessen der Schwerpunkt auf die Umweltsimulation unter Laborbedingungen gelegt. Da die MP-Bestimmung sowohl bei diesem Projekt als auch bei MiMiK mittels TED-GC/MS erfolgte, war die Idee die Labor- mit denen der Feldergebnissen zu vergleichen. Die Auswahl der Proben und der experimentellen Parameter für die Laborversuche erfolgte daher in Absprache mit den Projektverantwortlichen des MiMiK-Projektes, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Allerdings kam es beim MiMiK-Projekt aufgrund von Schwierigkeiten bei der Probenahme zu starken zeitlichen Verzögerungen, sodass bis zum Projektende von MP-Sport keine Ergebnisse von MiMiK zur Verfügung standen.

Alternativ kam mit dem Amt für Technischen Umweltschutz des Kreises Viersen/NRW ein Austausch zustande, das Untersuchungen zur Gefährdungsabschätzung von MP aus Kunststoffrasen bei der SAKOSTA GmbH in Auftrag gegeben und Grundwasser-Messstellen auf Sportplätzen mit Kunststoffrasen errichtet hat. Hier wurden Realsport-Plätze mit dem Fokus Grundwasser beprobt und mittels Partikel-basierter Raman-Spektroskopie analysiert. Der Austausch ermöglicht erstmalig den Vergleich von Labor- mit Feldergebnissen von MP-Austrägen aus Sportplätzen. Die experimentellen Details und Ergebnisse hierzu sind im Abschlussbericht in Kapitel 4.4.10 und 5.3.4 zu finden. Der detaillierte gemeinsame Artikel hierzu ist bereits verfasst und die Veröffentlichung im Fachmagazin Bodenschutz im Herbst 2025 geplant (Kittner et al., subm.).

4. Projektverlauf

4.1 Untersuchungsszenarien & Probenauswahl

Im Rahmen des Projektes wurden drei relevante Untersuchungsszenarien mit unterschiedlichen Kunststoffrasen-Konfigurationen in verschiedenen Alterungszuständen (ungealtert, künstlich und in Echtzeit gealtert) analysiert, die drei Kunststoffrasensysteme unterschiedlicher technischer Entwicklungsstände repräsentieren.

Als Gegenwartszenario wird einerseits das am häufigsten in Deutschland verbaute Kunststoffrasensystem abgebildet, das aus fossilbasierten PE-Fasern (fRasen, **Abb. 2a+b**) und EPDM-Infill (fEPDM, **Abb. 2c+d**) besteht. Zudem wird Rasen mit biobasierten Grasfasern (bRasen) und EPDM-Verfüllung mit Hanffaseranteil (bEPDM) untersucht, um eine Vergleichbarkeit von Labor- zu Feldergebnissen mit dem MiMiK-Projekt zu ermöglichen. Bei bRasen und bEPDM handelt es sich um Rückstellproben von einem realen Sportplatz, wo das Drainagewasser von MiMiK beprobt wird.

Als mögliches Zukunftsszenario wurde Kunststoffrasen mit recycelten PE-Fasern (rRasen, **Abb. 2e+f**) ohne EPDM-Infill gewählt. Die Proben von fRasen, rRasen, EPDM, Sand-Infill sowie die elastische Tragschicht aus mit PU vernetzten SBR (EL) wurden als fabrik-neue Proben von Polytex bereitgestellt.

Um die Vergangenheit abzubilden und als Vergleichsproben, wurden zwei real gealterte Altrasen-Proben von fossilbasierten Kunststoffrasen (aRasen¹, aRasen²) nach Ablauf ihrer Lebensdauer analysiert, die noch mit EPDM- (aEPDM) oder SBR-Granulat und Sand-Infill verfüllt waren. Beide Altrasen wurden von der Kunststoffrasenrecycling-Firma FormaTurf bereitgestellt.

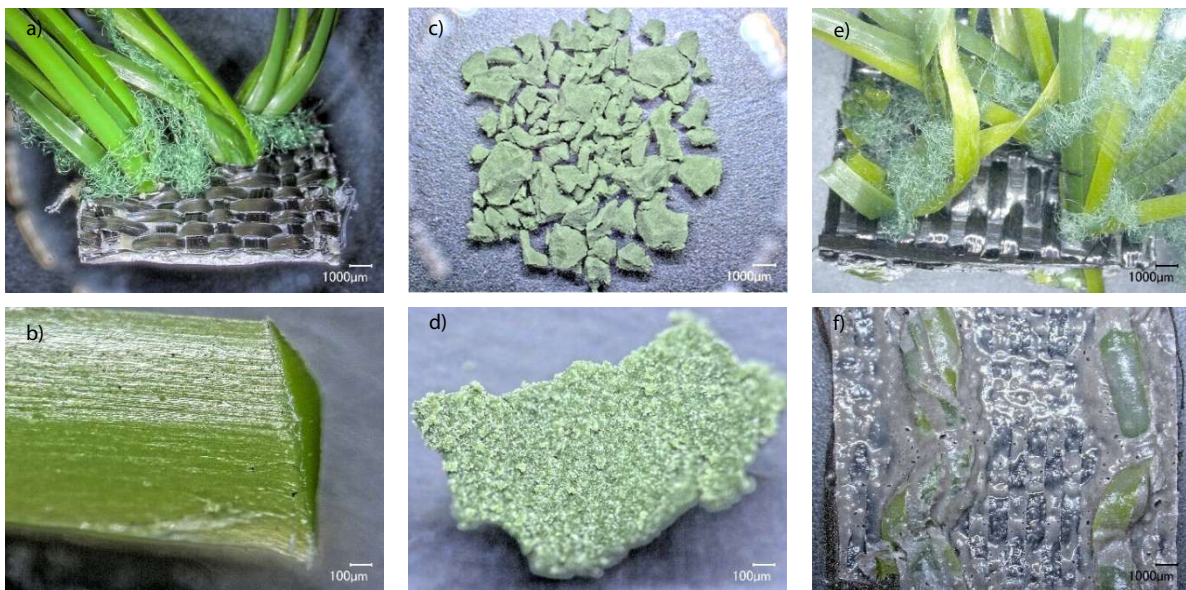


Abb. 2: Mikroskopie-Aufnahmen fabrik-neuer, unbeanspruchter Proben. Abgebildet sind a) Oberseite fossilbasierter Rasen (fRasen, 20x), b) Detailaufnahme PE-Faser von fRasen (200x), c) fEPDM-Infill (20x) und d) Detailaufnahme fEPDM-Granulat (200x), e) Oberseite und f) Rückseite mit Vertaftung und PU-Verklebung recycelter Rasen (rRasen, 20x).

Tab. 1 zeigt eine Übersicht aller analysierten Kunststoffrasensystemkomponenten. Insgesamt wurden zwölf Proben untersucht, die sich bezüglich Funktion, Material, Beanspruchungszustand sowie Ursprung bzw. Bereitstellung unterschieden. Die fünf Kunststoffrasen variierten in den Ausgangsrohstoffen der PE-Fasern (fRasen: fossilbasiert; rRasen: recycelt; bRasen: biobasiert; aRasen¹/aRasen²: fossilbasiert) während die übrigen Komponenten alle fossilbasiert waren: Trägermaterial aus PP, Umwindegarn aus PET und die Verklebung aus PU oder Latex. Ferner wurden vier Performance-Infills aus EPDM, das Sand-Infill, die Elastikschicht und die ungebundene Tragschicht analysiert.

Tab. 1: Probenübersicht über die untersuchten Kunststoffrasensysteme und ihrer Einzelkomponenten. Die verwendeten polymeren Materialien sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PU), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) und Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR).

Komponente	Abkürzung	Material	Zustand	Bereitstellung
Kunststoffrasen	fRasen	Fasern: PE, fossilbasiert Träger: PP Umwindegarn: PET Verklebung: PU	fabrik-neu	Polytex: LigaTurf Cross 235 18/8
	rRasen	Fasern: PE, recycelt Träger: PP Umwindegarn: PET Verklebung: PU	fabrik-neu	Polytex: LigaTurf Cross R 235 18/8
	bRasen	Fasern: PE, biobasiert Träger: PP Umwindegarn: PET Verklebung: PU	fabrik-neu	Polytex: LigaTurf Cross GT Zero 235 22/8
	aRasen ¹	Fasern: PE, fossilbasiert Träger: PP Umwindegarn: PET Verklebung: Latex	real gealtert	FormaTurf
	aRasen ²	Fasern: PE, fossilbasiert Träger: PP Umwindegarn: PET Verklebung: Latex	real gealtert	FormaTurf
Performance-Infill	fEPDM	fossilbasiert	fabrik-neu	Polytex: EPDM ST
	bEPDM	fossilbasiert mit biobasiertem Hanffaser-Anteil	fabrik-neu	Polytex: Fusion GT
	aEPDM	fossilbasiert, EPDM-Infill aus aRasen ¹	real gealtert	FormaTurf
Infill	S	Quarz-Sand	neu	Polytex
Elastikschicht	EL	SBR mit PU verklebt	fabrik-neu	Polytex
Ungebundene Tragschicht	UT	Quarz-Kies: 2 - 16 mm, gegläht (600 °C, zur MP-Entfernung), gewaschen	neu	BAM

4.2 Umweltsimulation

Das Forschungsdesign hat das Ziel die MP-Austräge über das Sickerwasser über die Nutzungsdauer eines Sportbodens aus Kunststoffrasen zu ermitteln. Die Lebensdauer entspricht ca. 12 - 15 Jahren Freilandbeanspruchung. Danach ist das Material aufgrund von Bewitterung und mechanischen Belastungen verschlissen, nicht mehr optimal bespielbar und muss ausgewechselt werden. Um dies unter Laborbedingungen nachzubilden, wurde angesichts der zeitlichen Dimension dieses Projektes von nur zwei Jahren eine beschleunigte Alterung in zwei Schritten durchgeführt. Das Ziel der beschleunigten Alterung ist die Generierung definiert gealterter, homogener Proben für eine möglichst hohe Repräsentativität der Aussagen.

4.2.1 UV-Bewitterung

Hierfür wurden zunächst fabrik-neue Kunststoffrasen und EPDM-Granulat im Bewitterungsgerät einer UV-Beanspruchung unterzogen. Die UV-Parameter orientierten sich an mitteldeutschen Bedingungen, wobei der Parameter Temperatur als Reaktionsbeschleuniger für eine beschleunigte Alterung diente.



Abb. 3: Umsetzung der UV-Bewitterung. Dargestellt sind die künstliche UV-Beanspruchung im Bewitterungsgerät durch a) vertikale Aufhängung von Kunststoffrasen, b) von EPDM-Granulat in Edelstahlbehältern mittels Umlenkspiegeln und c) Detailaufnahme EPDM-Granulat während der Eis-Phase.

Die Umweltsimulation erfolgte mittels beschleunigter Alterung. Hierfür wurden die Proben zunächst in Bewitterungsgeräten (Global UV Test 200, Weiss Umwelttechnik GmbH, Reiskirchen, DE) bei einer konstanten relativen Luftfeuchte von 90 % gemäß DIN EN ISO 4892-3: 2016 künstlich UV-bestrahlt. Es wurden UVA-340 nm Leuchtstofflampen nach Typ 1A der DIN EN ISO 4892-3: 2016 verwendet. Der Temperaturbereich entsprach -10 bis 70 °C, wodurch sowohl Kalt- und Warmbeanspruchung bzw. Sommer- und Winter-Phasen simuliert wurden. Ein 24 h-Zyklus war dabei wie folgt: 1:13 h Aufheizen, 21:01 h konstant 70 °C, 1:13 h Abkühlen, 0:30 h konstant -10 °C. Die Kunststoffrasen-Proben (Maße: 80 x 40 cm) wurden mit Edelstahlhaken in die Bewitterungsgeräte eingehängt (**Abb. 3a**). Das EPDM-Granulat hingegen wurde horizontal in neun Edelstahlbehältern mit Probeneinwaagen von je 150 g in drei Edelstahlborten (total: 1,35 kg) mit je drei Umlenkspiegeln UV-bewittert (**Abb. 3b**). Zusätzlich wurde für die EPDM-Granulate (fEPDM, bEPDM) eine Feuchtbeanspruchung durchgeführt (**Abb. 3c**). Dafür wurde jeder Edelstahlbehälter täglich mit 100 mL destilliertem Wasser manuell bewässert. Dies ist für die Rasen nicht möglich, da sonst potenziell entstandenes MP abgespült und im Bewitterungsgerät zurückgehalten werden würde.

Kalkulation der beschleunigten Alterung

Wegen der Komplexität von Umweltbedingungen und des Fehlens eines physikalisch-chemischen Modells für die Alterung von Polymeren kann ein Vergleich von künstlicher Bestrahlung unter Laborbedingungen mit der Bestrahlung im Freien nur in grober Näherung vorgenommen werden. Als Berechnungsgrundlage dient hierbei der Bestrahlungswert der gewünschten Klimaregion. Zur Abbildung von mitteldeutschen Bedingungen wurde Potsdam als Vergleichsgrundlage gewählt. Ausgehend von 5 % der jährlichen Globalstrahlung von ca. 1.000 kWh/m² (Deutscher Wetterdienst, 2023a, Habte et al., 2019) entspricht dies für

Potsdam einer UV-Bestrahlung von ca. 180 MJ/m² UV pro Jahr. Die Zielbestrahlung für 15 Jahre Freibewitterung eines Kunststoffrasens ist folglich 2.700 MJ/m² UV:

$$(1) \text{ Zielbestrahlung: } 180 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV} \times 15 = \mathbf{2.700 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV}}$$

In grober Näherung kann davon ausgegangen werden, dass für thermisch aktivierte Prozesse und typische Aktivierungsenergien für Oxidationsreaktionen eine Temperaturerhöhung um 10 °C zu einer Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit führt. Der zentrale Parameter und Reaktionsbeschleuniger Temperatur wurde daher auf 70 °C erhöht, um eine beschleunigte Alterung durchzuführen. Da die Jahresdurchschnittstemperatur von Potsdam ca. 10 °C ist (Deutscher Wetterdienst, 2023b), ergibt sich daraus folgende Berechnung des Beschleunigungsfaktors Temperatur, wobei T₁ der Freibewitterungstemperatur und T₂ der Temperatur der künstlichen Bewitterung entspricht:

$$(2) \text{ Beschleunigungsfaktor} = 2^{\left(\frac{T_2 - T_1}{10^\circ\text{C}}\right)} = 2^{\left(\frac{70^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}}{10^\circ\text{C}}\right)} = 64 \approx \mathbf{50}$$

Da dies nur einer groben Näherung entspricht, wird hier konservativ mit einem Beschleunigungsfaktor von 50 gerechnet. Die UV-Bestrahlungsstärke bzw. die Intensität, mit der die UV-Strahlung auf die Oberfläche trifft, lag bei den Kunststoffrasen-Proben bei 45 ± 1 W/m². Die kontinuierliche Bestrahlung, die das zeitliche Integral der Bestrahlungsstärke beschreibt, entsprach ca. 4 MJ/m² UV pro Tag. Die Bewitterung bei 70 °C erfolgte in diesem Zyklus für 21:01 h bzw. ca. 88 %. Daraus ergibt sich folgende Berechnung zur Simulierung von 15 Jahren Freibewitterung von Kunststoffrasen, die eine Beanspruchungsdauer von 16 d ergab:

$$(3) \text{ Bestrahlung Rasen bei } 70^\circ\text{C}: \frac{4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} \times 88 \%}{100 \%} = \mathbf{3,4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}} \times 50 = \mathbf{169,3 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}}$$

$$(4) \text{ Bestrahlung Rasen } < 70^\circ\text{C}: \frac{4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} \times 12 \%}{100 \%} = \mathbf{0,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}}$$

$$(5) \text{ Gesamtbestrahlung Rasen: } 169,3 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} + 0,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} = \mathbf{170 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}}$$

$$(6) \text{ Beanspruchungsdauer Rasen: } \frac{\text{Zielbestrahlung}}{\text{Gesamtbestrahlung}} = \frac{2.700 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV}}{170 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}} = \mathbf{16 \text{ d}}$$

Dieser Kalkulation folgend wurde für eine beschleunigte Alterung von bRasen auf drei Jahre durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit von Labor- zu Feldergebnissen mit dem MiMiK-Projekt zu ermöglichen

Da bei dem EPDM-Infill aufgrund der notwendigen Verwendung von Umlenkspiegeln weniger UV-Bestrahlung die EPDM-Oberfläche erreicht, wurde die UV-Bestrahlungsstärke erhöht und in den drei Edelstahlorten einzeln gemessen. Daraus ergab sich eine mittlere UV-Bestrahlungsstärke von ca. 41 ± 7 W/m² und folglich eine kontinuierliche Bestrahlung von 3,5 MJ/m² UV pro Tag. Die Kalkulation zur Berechnung der Bewitterungsdauer für EPDM-Infill war daher wie folgt:

$$(7) \text{ Bestrahlung EPDM bei } 70^\circ\text{C}: \frac{3,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} \times 88 \%}{100 \%} = \mathbf{3,1 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}} \times 50 = \mathbf{155,0 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}}$$

$$(8) \text{ Bestrahlung EPDM } < 70^\circ\text{C}: \frac{3,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} \times 12 \%}{100 \%} = \mathbf{0,4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}}$$

$$(9) \text{ Gesamtbestrahlung EPDM: } 155,0 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} + 0,4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d} = \mathbf{155,4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}}$$

$$(10) \text{ Beanspruchungsdauer EPDM: } \frac{\text{Zielbestrahlung}}{\text{Gesamtbestrahlung}} = \frac{2.700 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV}}{155,4 \text{ MJ/m}^2 \text{ UV/d}} = \mathbf{17 \text{ d} \approx \mathbf{35 \text{ d}}}$$

Da in den Edelstahlborten jeweils nur die Oberfläche des fEPDM-Granulats UV-beanspruchung wird, wurde für eine gleichmäßige Bewitterung das fEPDM-Granulat täglich mit einem Edelstahlspatel umgerührt und die Beanspruchungsdauer von 17 d auf 35 d verdoppelt.

4.2.2 Mechanische Beanspruchung

Nach der Bewitterung wurde die mechanische Beanspruchung der Kunststoffrasen über ihre Lebensdauer von 15 bzw. 3 Jahren im Verschleißgerät (Lisport, Labosport, Le Mans, FR) nach DIN EN 15306:2014 simuliert (**Abb. 4a**). Dafür wurden die Proben für 60.000 (rRasen/fRasen) bzw. 15.000 Zyklen (bRasen) mit zwei Edelstahlwalzen mit Polyamid-Stollen mit jeweils einem Gewicht von 28,5 kg beansprucht (**Abb. 4b+c**). Hierbei drehte sich die zweite Walze mit einer 40 % geringeren Geschwindigkeit als die erste Walze.



Abb. 4: Mechanische Beanspruchung mittels Lisport-Tester: a) Totale, b) Detailaufnahme Edelstahlwalzen und c) des Prüf-Aufbaus.

Tab. 2 gibt eine Übersicht der angepassten Prüfparameter der Lisport-Prüfungen der verschiedenen Kunststoffrasen-Proben. Die Sand- und EPDM-Einfüllmengen variierten je nach Kunststoffrasen-Typ und orientierten sich an den Hersteller-Installationsvorgaben auf Real-Sportplätzen. **Abb. 5** zeigt beispielhaft den Verlauf der Verschleißerscheinungen nach 50, 30.000 und 60.000 Zyklen von fRasen.

Tab. 2: Prüfparameter des simulierten Verschleißes mittels Lisport-Tester.

Probe	Sand in kg/m ²	EPDM in kg/m ²	Zyklen-Anzahl	Simulation in Jahren
rRasen	24,0	-	60.000	15
fRasen	15,3	4,2	60.000	15
bRasen	20,0	2,0	15.000	3

Um potentielle Kontaminationen während der Beanspruchung zu verhindern wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

1. Fixierung der Proben mittels Metallschrauben auf einer Holzunterlage (statt üblicher Verklebung)
2. Penible Reinigung jeder Proben-Kontaktfläche vor jeder Prüfung
3. Versiegelung aller Lisport-Öffnungen, damit Partikel nicht nach außen gelangen können

Die mechanische Beanspruchung wurde mittels einer Verschleißmaschine (Lisport) nach DIN EN 15306: 2014 durchgeführt. Hierbei wird die Kunststoffrasenprobe mit entsprechendem Füllmaterial horizontal auf einer Unterlage befestigt. Zwei mit Stollen ausgestattete Walzen (je 28,5 kg) bewegen sich linear entlang der Oberfläche des Probekörpers. Zusätzliche Scherkräfte entstehen dadurch, dass sich die Probenunterlage quer zur Laufrichtung der Walzen bewegt. In der DIN EN 15330-1: 2013 ist ein simulierter Verschleiß durch 20.200

Zyklen vorgesehen. Um den Verschleiß des Kunststoffrasens über seine Nutzungsdauer von 15 Jahren zu simulieren, wurde die Zyklenanzahl auf 60.000 Zyklen erhöht.

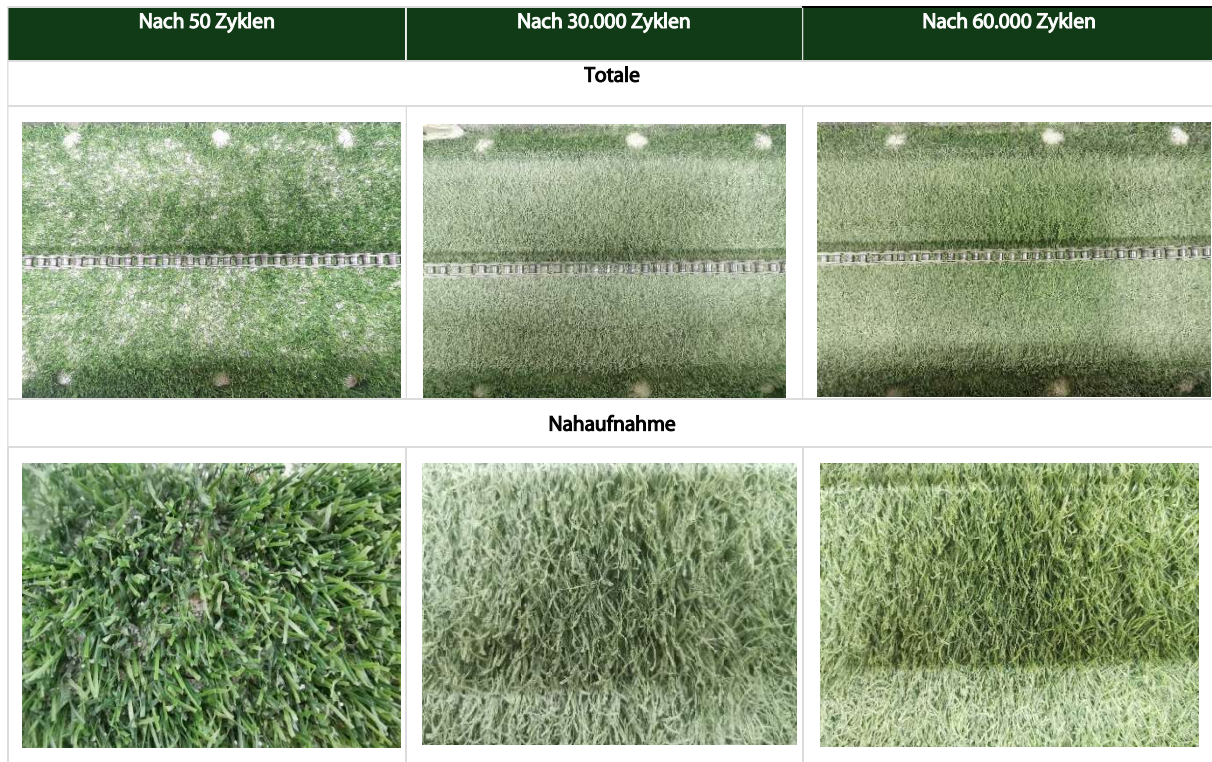


Abb. 5: Verlauf der mechanischen Beanspruchung im Lisport-Tester. Abgebildet sind die Totalen und Nahaufnahmen nach jeweils 50, 30.000 und 60.000 Zyklen am Beispiel fRasen.

4.3 Polymer-Charakterisierung

Um die Eignung der künstlichen Bewitterung zur Simulation des MP-Austrages bewerten zu können, wurden begleitend Polymer-Charakterisierungen durchgeführt. Diese Begleitparameter dienen dem Monitoring der einzelnen Beanspruchungsschritte auf die physiko-chemischen Degradation der Kunststoffrasen-Proben. Somit kann der Einfluss der alterungsbedingten Änderungen der Materialeigenschaften auf die Freisetzung von Schadstoffen untersucht werden.

4.3.1 Mikroskopie

Um Änderungen der Oberflächenmorphologie zu ermitteln, wurden lichtmikroskopische Aufnahmen mit einem Digital-Mikroskop (VXH600, Keyence, Osaka, JP) mit Objektiven unterschiedlicher Vergrößerungen (VH-Z20R: 20 -200 x; VH-Z-2500: 250-2.500 x, Keyence) aufgenommen.

4.3.2 Rasterelektronenmikroskopie

Zur Ermittlung morphologischer Veränderungen der Oberflächen wurden Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) vom Typ EVO MA 10 (Carl Zeiss, Oberkochen, Deutschland) im Sekundärelektronenkontrastmodus mit Spannungen von 10 kV aufgenommen. Dazu wurden kleine Abschnitte der Proben mit doppelseitigem leitfähigem Klebeband auf einem Probenhalter fixiert und mit Gold besputtert.

4.3.3 Dynamische Differenzkalorimetrie

Polymerspezifische Schlüsselparameter, wie die Glasübergangs- (T_g) und Schmelztemperatur (T_m) sowie Schmelz-enthalpie (ΔH), wurden mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) bestimmt. Die DSC-Messungen wurden mit einem dynamischen Differenzkalorimeter (DSC7020, Hitachi High-Tech Science Corp., Tokio, JP) ausgeführt. Die Sensitivität entsprach $0,1 \mu\text{W}/0,2 \mu\text{W}$ und die Akkuratheit $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Temperaturprogramme bestanden aus zwei Heizzyklen mit einer Geschwindigkeit von $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ und einer Abkühlphase, die sich je nach der Art des analysierten Polymers unterschieden: für PE von $-150 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$, für PP von $-100 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$, für PET von $-30 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$, für EPDM von $-100 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ und für PU von $-150 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Probeneinwaagen entsprachen jeweils ca. 3 mg, welche in verkapselten Aluminium-Tiegeln in Doppelbestimmung gemessen wurden. Die Datenauswertung erfolgte mittels Thermal Analysis Software mit EMA-Funktion (Version 1.0.1, 2018, Hitachi High-Tech Science Corp.). Alle diskutierten DSC-Ergebnisse entstammen dem zweiten Heizzyklus.

4.3.4 Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie

Oberflächliche Änderungen der funktionellen Gruppen wurden mittels Abgeschwächter Totalreflexion Fourier-Transform-Infrarot Spektroskopie (ATR-FTIR) analysiert. Hierfür wurde ein Spektrometer mit Smart Orbit-Einheit und ein Detektor aus Quecksilber-Cadmium-Tellurid-Basis verwendet (Nicolet 8700, Thermo Scientific). Für eine Messung wurden 32 Scans mit einer Auflösung von 4 cm^{-1} aufgenommen. Es wurde die Autogain-Funktion im Spektralbereich zwischen 4.000 und 650 cm^{-1} angewendet. Es wurden jeweils Dreifachmessungen an unterschiedlichen Prüfkörper-Stellen durchgeführt, welche abschließend mit der Software Omnic (Version 9.7, Thermo Scientific) als Mittelwert-Spektren ausgewertet wurden. Die Spektren wurden Basislinien- sowie ATR-korrigiert und normiert, um die unterschiedlichen Anpressdrücke zu kompensieren.

4.3.5 Thermogravimetrische Analyse

Um Rückschlüsse auf die Zersetzungskinetik anhand von polymerspezifischen Masseverluststufen (ML) der beanspruchten Polymere sowie die Homogenität der Proben und damit die Repräsentativität der Ergebnisse zu ermitteln, wurden Thermogravimetrische Analysen (TGA) durchgeführt. Die Komponenten der Kunststoffrasensysteme wurden dafür jeweils einzeln mittels einer horizontalen einarmigen Thermowaage (TGA/DSC3+, Mettler/Toledo, Gießen, DE) in $150 \mu\text{L}$ Aluminiumoxid-Tiegeln gemessen. Die Probeneinwaagen der polymeren Proben waren 5 mg und des Sand-Infills 100 mg. Es wurden Doppel- bis Mehrfachbestimmungen durchgeführt. Die Proben wurden in zwei Schritten erhitzt: Um den Wasser- sowie pyrolysierbaren Organik-Gehalt zu ermitteln, wurden die Proben zunächst unter inerter Stickstoffatmosphäre von $25 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Heizrate von $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ pyrolysiert. In einem zweiten Schritt wurde bei $600 \text{ }^\circ\text{C}$ die Atmosphäre von Stickstoff auf synthetische Luft umgestellt und die Probe bis $900 \text{ }^\circ\text{C}$ oxidiert. Auswertung der TGA-Daten erfolgte mit der Software Origin (Version 9.8, 2021, OriginLab, Northampton, MA, USA). Es wurden folgende Parameter bestimmt: Masseverlust von Wasser ($\text{ML}_{\text{Wasser}}$: $25 - 180 \text{ }^\circ\text{C}$), Masseverlust pyrolysierbarer Organik (ML_{pyr} : $180 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$; bei Polymeren mit zwei ML_{pyr} unterteilt in ML_{pyr1} und ML_{pyr2}), Masseverlust oxidierbarer Organik (ML_{ox} : $600 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$) und anorganischer Masserest (MR: $900 \text{ }^\circ\text{C}$).

4.4 Mikroplastik-Emissionen

4.4.1 Mikroplastik-Freisetzungspotentiale

Um das MP-Freisetzungspotential aus neuen Kunststoffrasen-Systemen zu ermitteln, wurden Schüttelversuche der einzelnen Kunststoffrasenkomponenten (rRasen, fRasen, Sand, EPDM, Elastiksicht, ungebundene Tragschicht) in destilliertem Wasser durchgeführt. Das Ziel war, eine Einschätzung von maximal möglichen MP-Emissionen in die Umgebung der Kunststoffrasenplätze zu ermöglichen. Dies ist für den MP-Eintrag in Oberflächengewässer von besonderer Relevanz, falls sich Kunststoffrasenplätze in der Nähe von Oberflächengewässern befinden und MP durch Starkregenereignisse oder Wind eingetragen werden kann.

Hierfür wurden die Kunststoffrasen-Komponenten jeweils einzeln in 100 mL Gläser mit PP-Deckel mit Teflon-Einlage und destilliertem Wasser für 14 d auf einer Schüttelplatte (KS 260 basic, IKA, Staufen, DE) bei 200 rpm bei Raumtemperatur hydrolytisch beansprucht. Es wurden jeweils Dreifachbestimmungen durchgeführt. Die Wasser-Feststoff-Verhältnisse (W/F) unterschieden sich in Abhängigkeit von den Probenvolumina. Für die ungebundene Tragschicht, das EPDM- und Sand-Infill entsprach das W/F 1:2 mit je 25 g Probe in 50 mL destilliertem Wasser. Für alle Kunststoffrasen (fRasen, rRasen, bRasen, aRasen¹, aRasen²) und die Elastiksicht war das W/F 1:7 mit je 10 g Probe in 70 mL destilliertem Wasser. Parallel zu den Kunststoffrasen-Proben wurden drei Blindwerte mit jeweils 75 mL destilliertem Wasser mittels Schüttelversuchen hydrolytisch beansprucht. Alle Proben wurden nach Beanspruchungsende über eine Filterkaskade aus Edelstahlsieben (1.000, 500, 100 und 50 µm, Retsch, Haan, DE) gefiltert, wobei jedes Sieb gleichmäßig mit ca. 100 mL destilliertem Wasser mittels Teflon-Spritzflasche gespült wurde. Die Fraktion < 50 µm wurde in einem Siebboden aus Edelstahl aufgefangen und im Anschluss mittels Edelstahlfiltrationseinheit über 600 µL Mikrofiltrertiegel mit einer Maschenweite von 5 µm (GKD - Gebr. Kufferath AG, Düren, DE) filtriert und mit destilliertem Wasser nachgespült. Danach wurden die Mikrofiltrertiegel bei 50 °C getrocknet und nachfolgend mit einer Feinwaage mit einer Ablesbarkeit von 0,01 mg/0,005 mg (Analysis balance XPE206, Mettler/Toledo, Gießen, DE) gewogen, um die Masse der Fraktion < 50 µm zu bestimmen. Anschließend erfolgte die Direktmessung der Mikrofiltrertiegel in der TED-GC/MS zur Ermittlung der MP-Gehalte.

Da sich bei den EPDM-Proben der Fraktion < 50 µm die Mikrofiltrertiegel zusetzten, erfolgte die Filtration der EPDM-Proben über Edelstahlrundfilter (Durchmesser: 5 cm, Maschenweite: 5 µm, GKD). Die Filter wurden bei 50 °C getrocknet und die Mikroplastik-Gehalte der Fraktion < 50 µm rein gravimetrisch mittels Feinwaage (Mettler/Toledo) bestimmt. Die Siebe der Filterkaskade wurden ebenfalls bei 50 °C getrocknet und ausgewogen, um die Massen und Partikelgrößenverteilungen der Fraktionen > 1.000 µm, 1.000 - 500 µm, 500 - 100 µm und 100 - 50 µm zu ermitteln. Um Kontaminationen zu vermeiden, wurden die Siebe zwischen den Proben mit Aceton p. a. (*lat. pro analysi*, besonders hoher analytischer Reinheitsgrad) und Methanol p. a. gereinigt.

4.4.2 Luft-Emissionen

Zur Ermittlung potentieller Luft-Emissionen wurden die bei der Lisport-Prüfung frei werdenden Partikel von rRasen (Sand: 7,68 kg) und fRasen (Sand: 4,90 kg, EPDM: 1,34 kg) gesammelt und nach DIN EN 933-1:2012 fraktioniert gesiebt. Hierfür wurde zunächst das Füllmaterial am Ende der Prüfung in einer Stahlwanne aufgefangen. Um möglichst alle Partikel aufzunehmen, wurde mit Hilfe eines Pinsels die Kontaktoberflächen gereinigt. Zuletzt wurde die Probe mit destilliertem Wasser gespült, um verbleibende Rückstände nach Trocknung dem Füllmaterial zuzuführen. Es wurden jeweils Aliquote von 300 g entnommen und in Dreifachbestimmung fraktioniert gesiebt. Die Siebgrößen wurden entsprechend der MP-Partikelgrößenklassierung des BMBF Statuspapiers „Mikroplastik-Analytik“ (Braun et al., 2020) auf folgende fünf Fraktionen festgelegt: < 1.000 µm, 1.000 - 500 µm, 500 - 100 µm, 100 - 50 µm und 50 - 0 µm. Um den Polymer- bzw. Organikanteil in der Fein-Fraktion zu bestimmen, wurden exemplarisch Dreifachmessungen der pulverigen Feinfraktion des Sand/EPDM-Infills von fRasen (50 – 100 µm, m: 1 mg) mittels TGA durchführt.

4.4.3 Mikroplastik-Austräge über den Boden-Grundwasser-Pfad

Im Fokus dieses Projektes ist die Analyse von potenziellen MP-Austrägen ins Grund- bzw. Sickerwasser. In früheren Projekten wurde mit Hilfe von Säulenversuchen im Labormaßstab eine Methodik zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Kunststoffrasen- und Sportflächensystemen hinsichtlich der Freisetzung von

Schadstoffen und deren Transport über den Übertragungspfad Boden-Grundwasser erarbeitet (Kalbe et al., 2013, Krüger et al., 2012). Die Ergebnisse zeigten, dass es notwendig ist, die gesamte Struktur solcher Systeme zu berücksichtigen, da es keine direkten Bewertungskriterien für die einzelnen Rasenkomponenten gibt. Solche Untersuchungen wurden für mehrere gängige Sportplatzanlagen durchgeführt. Die Schadstoffkonzentrationen in den Eluaten wurden mit den Grenzwerten einer 2023 in Kraft getretenen Verordnung für den Einsatz von Recyclingmaterialien im Bauwesen (BMUV, 2021) verglichen. Das Konzept zur Risikobewertung unter Berücksichtigung des Boden- und Grundwasserschutzes wurde bereits diskutiert (Susset and Grathwohl, 2011). Nach dem Stand der Technik werden Anstrom-Perkolationsversuche unter gesättigten Bedingungen nach genormten Richtlinien (DIN 19528: 2023, EN ISO 21268-3: 2019, EN 14405: 2017, US EPA 1314A) durchgeführt. Lysimeter unter ungesättigten Bedingungen und mit etwas größeren Abmessungen sind bisher noch nicht genormt, obwohl sie eine realistischere Einschätzung des Auslaugverhaltens kontaminierter Böden liefern können. Sie eignen sich aber wegen des hohen Zeitaufwandes nicht für Routine-Untersuchungen. Labor-Lysimeter werden in der Regel von oben bewässert, was näher an den Feldbedingungen liegt. Zudem kann die Anzahl der entnommenen Eluat-Fractionen im Vergleich zum Perkolationsverfahren nach DIN 19528: 2023 deutlich erhöht werden, da mehr Eluatvolumen zur Verfügung steht. Die gewonnenen Eluate werden anschließend auf organische und anorganische Schadstoffe untersucht.

Da die MP-Forschung ein relativ neues Untersuchungsgebiet ist, gibt es bisher keine standardisierten Protokolle für die MP-Probenahme aus Auslaugversuchen, um das Transferverhalten von MP durch den Boden zu analysieren und zu bewerten. Darüber hinaus sind klassische Lysimeter i) nicht geeignet, da die Komponenten aus Zielpolymeren bestehen können und somit nicht den schadstoffspezifischen Materialanforderungen entsprechen (Gefahr der Kreuzkontamination), und ii) für die MP-Probenahme in Langzeitexperimenten nicht praktikabel und zeitlich nicht verwendbar sind. Der Hauptgrund dafür ist, dass Standard-Lysimeter keine zugänglichen Filter haben, die eine MP-Probenahme ermöglichen würden. Die einzige Option wäre ein zusätzlicher zeitaufwändiger manueller Eluatfiltrationsschritt der großen Eluatglas-Sammelflasche, die leer bis zu 5 kg wiegen kann. Folglich müssten die vollen schweren Eluatsammelflaschen (Gesamtgewicht mit Probe: bis zu 25 kg) zum Filtrieren und mehrfachen Spülen manuell angehoben werden, was physisch schwierig bis unmöglich ist. Außerdem birgt dies ein hohes Risiko von Verletzungen und Kreuzkontaminationen bei der Probenahme von MP und gelösten Schadstoffen. Daher wurden für dieses Projekt vier Lysimeter bzw. Säulen neu konstruiert, die den speziellen Anforderungen des Projektes entsprechen, wie Materialien aus Non-Target-Polymeren sowie ein Filter-Modul zur Mikroplastik-Detektion.

Um diese Lücke zu schließen, haben wir das innovative Mikroplastik Eluat Lysimeter (MEL) entwickelt, konstruiert und hergestellt, das die gleichzeitige Probenahme von MP und freigesetzten Schadstoffen in einem integrativen Labor-Lysimeter-System kombiniert, um Emissionen aus Sickerwasser in Grundwasserschichten oder Drainagewasser zu bewerten. Die Hauptziele der MEL-Konstruktion waren zum einen die Entwicklung eines automatisierten, einfach zu bedienenden und wartungsarmen Systems für zeiteffiziente Langzeittests, das für die Routineüberwachung eingesetzt werden kann. Zweitens musste es alle schadstoffspezifischen Materialanforderungen erfüllen: für den MP-Nachweis die Verwendung von kunststofffreien Materialien oder Materialien aus Nicht-Ziel-Polymeren, für Schwermetalle die Nichtverwendung von Messingkomponenten, für PAK die Verwendung von Polytetrafluorethylen (PTFE)-Röhrchen. Schließlich musste das System sicher und robust sein, um zuverlässige Daten hinsichtlich Repräsentativität und Reproduzierbarkeit zu erzeugen. Daher basiert das MEL auf einem klassischen Lysimeteraufbau, der durch die Integration eines neuartigen MP-Filtermoduls verbessert und modifiziert wurde. Das Modul ermöglicht die direkte Filtration des Eluats durch MP-Filtertiegel aus Edelstahl mit einer geometrischen Porengröße von 5 μm (Braun et al., 2021a, Braun et al., 2019). Dem MP-Filtermodul vorgeschaltet ist ein Edelstahlsieb zur Rückhaltung der Bodenprobe (Maschenweite: 1.000 μm). Damit ermöglicht die MEL die MP-Probenahme der gesundheitsrelevanten Partikelgrößen von 1.000 \geq 5 μm . Die MP-Filtertiegel können direkt mit der TED-GC/MS ohne Probenübertragungsverluste und damit mit reduziertem Kreuzkontaminationsrisiko gemessen werden. TED-GC/MS ist ein schnelles automatisiertes Verfahren zur Bestimmung von MP-Massen, das polymerspezifische Zersetzungsprodukte zum MP-Nachweis nutzt (Kittner et al., 2023, Dümichen et al., 2019, Eisentraut et al., 2018). Seit der ersten Einführung im Jahr 2015 hat sich TED-GC/MS als analytische MP-Überwachungsmethode etabliert (ISO/DIS 16094-3: 2024, ISO/TR 21960: 2020), die robuste Daten für verschiedene Umweltmatrices liefert (Wiesner et al., 2023, Kittner et al., 2022, Braun et al., 2021b).

Das neuartige Mikroplastik-Eluat-Lysimeter (MEL) besteht aus drei Komponenten (**Abb. 6a**): i) Kontroll Modul mit Beregnungssystem, ii) Glas-Lysimeter mit Mikroplastik-Filter-Modul und iii) Eluatsammelflaschen mit Vakuumkupplung. **Abb. 6d** zeigt das Kontroll Modul (BMT Fluid Control Solutions GmbH, Friedrichsdorf, DE), das an die hauseigene deionisierte Wasserversorgung (Druck, p : 5 - 6 bar) angeschlossen ist. Es besteht aus

einem Wassermelder mit vorgeschaltetem Magnetabsperrventil, wobei der Wassermelder als Sicherheitsmaßnahme auf dem Laborboden platziert wird, um die Wasserzufuhr im Falle einer Leckage abzusperren. Anschließend reduziert ein Wasserdruckregler den Leitungsdruck auf einen stabilen, auf 1 bar eingestellten Wasserdruck für eine optimale Bewässerung mit der Nebelsprühdüse. Es folgt eine digitale Zeitschaltuhr mit Magnetventil, die automatische Langzeittests mit variablen Bewässerungsintervallen ermöglicht. Das Kontrollmodul ist über einen Silikonschlauch mit dem Beregnungssystem verbunden (**Abb. 6e**). Der Silikonschlauch ist an einer selbst hergestellten höhenverstellbaren Stange befestigt, in die ein Düsenkopf (Sprühwinkel: 80°, Vollkegelsprühbild, Micro Rain Systems, Altenburg, DE) eingeschraubt ist. Die Höhenverstellung ermöglicht unterschiedliche Beregnungswinkel und Probenfüllhöhen. Die Beregnungscharakteristik kann durch den Einsatz verschiedener Düsenköpfe verändert werden. Dies ermöglicht die Simulation von feinem Nebel, Nieselregen oder Regen. Der Stab wird in den Lysimeterdeckel geschraubt, der im oberen Flansch auf dem Glaslysimeter (Außen-/Innendurchmesser: 215/200 mm, Höhe: 650 mm) sitzt, das auf einem Tisch montiert ist.

Der transparente Glaszylinder ermöglicht die Überwachung der korrekten Funktion des MEL-Systems und die Beobachtung des allgemeinen Versuchsablaufs. **Abb. 6f** zeigt den verwendeten Versuchsaufbau des Kunststoffrasen-Systems im Glaszylinder, der den kompletten Kunststoffrasenaufbau über dem Baugrund (sogenannter Oberbau) abgebildet, inklusive Infill (Sand ± EPDM-Granulat), gebundener SBR-Tragschicht und ungebundener Tragschicht aus mineralischer Gesteinskörnung (2 - 16 mm). Der Glaszylinder steht auf dem unteren Flansch, der zur Verbesserung des Eluatabflusses trichterförmig konstruiert wurde (**Abb. 6b+g**). Oberhalb des unteren Flansches befindet sich ein Edelstahlsieb, das große Feststoffpartikel (> 1 mm) zurückhält, aber MP < 1 mm durchlässt. Der obere Deckel, der obere und der untere Flansch, der Stab sowie der Düsenkopf bestehen aus dem Nicht-Ziel-Polymer Polyvinylchlorid. Es folgt das Mikroplastik-Filtermodul (**Abb. 6h**), das neu konstruiert wurde, um das Eluat automatisch durch speziell für die TED-GC/MS konstruierte Mikroplastik-Filtertiegel (**Abb. 6i**, Gebrüder Kufferath AG, Düren, Deutschland) zu filtrieren und MP > 5 µm zurückzuhalten (Braun et al., 2021a). Schließlich wird das Eluat in 20-Liter-Glasflaschen aufgefangen, die mit einer Vakuumpumpe verbunden sind, die ein niedriges Vakuum (700 mbar, **Abb. 6a**) erzeugt, um die Filtration durch die kleinmaschigen Mikroplastik-Filtertiegel zu erleichtern. **Abb. 6g** zeigt einen zusätzlichen Sicherheitsüberlauf (Höhe: 200 mm) mit eingebautem Sieb (Maschenweite: 5 µm), damit - im Falle einer Filterverstopfung - das Eluat in 10 L Glasflaschen aufgefangen werden kann. Beide Eluat-Auffangflaschen sind auf ein Rollbrett gestellt, um die Flaschen zu einer Wasserpumpe und einer Waage zu transportieren, um a) Aliquote für 1 L Eluatproben für die anschließenden PAK- und HM-Analysen zu entnehmen, b) das Eluat zur Bestimmung des Durchflusses und der W/F-Verhältnisse der Fraktionen zu wiegen und c) die Auffangflaschen mittels Pumpe zu entleeren. Zur einfachen und schnellen Entleerung der MEL nach den Experimenten wurde eine Hilfsvorrichtung aus rostfreiem Stahl angefertigt (**Abb. 6c**), die mit einem Spanngurt um die MEL befestigt wird.

4.4.4 Ungebundene Tragschicht

100 kg Quarzkies wurden aus gewaschenem und feuergetrocknetem Quarzkies mit einem Eirich-Intensivmischer nach den Anforderungen an Baustoffgemische für Frostschutzschichten (FGSV TL SoB-StB: 2007, DIN EN 933-1: 2012) gemischt. Dabei wurde folgende Kornzusammensetzung des Kieses verwendet: 2 - 4 mm (45 %), 4 - 8 mm (45 %) und 8 - 16 mm (10 %). Der Kies wurde zusätzlich gesiebt, um die Feinfraktion (< 2 mm) abzutrennen, die beim Mischen anfiel. Anschließend wurde der Kies in repräsentative 25 kg-Portionen aufgeteilt und über Nacht bei 600 °C in Keramikwannen geglüht, um eventuelle Kunststoffteilchen zu entfernen. Nach dem Abkühlen wurde der Kies mehrmals mit destilliertem Wasser gewaschen, bis das Wasser klar war, um feine Partikel < 1 mm zu entfernen. Nach dem Trocknen wurde jedes Mikroplastik Eluat Lysimeter mit 10 kg Kies gefüllt und 7 Stunden lang bewässert, um die letzten feinen Kiespartikel zu entfernen, die möglicherweise die MP-Smart-Filtertiegel verstopfen könnten. Hier wurden Edelstahl-Rundfilter (Maschenweite: 5 µm, GKD) in das Mikroplastik-Filtermodul eingesetzt, um größere Kiespartikel herauszufiltern, die möglicherweise die kleinen PTFE-Röhrchen verstopfen könnten. Der Kies wurde dann für ca. 2 d in den Lysimetern belassen, damit das Restwasser ablaufen konnte. Da der Kies noch feucht war, musste die Sättigungszeit mit einem kompletten Testsystem bestimmt werden, um zu verhindern, dass Restwasser aus dem Kies als Fraktion gesammelt wird. Die Sättigungszeit betrug 1 h.

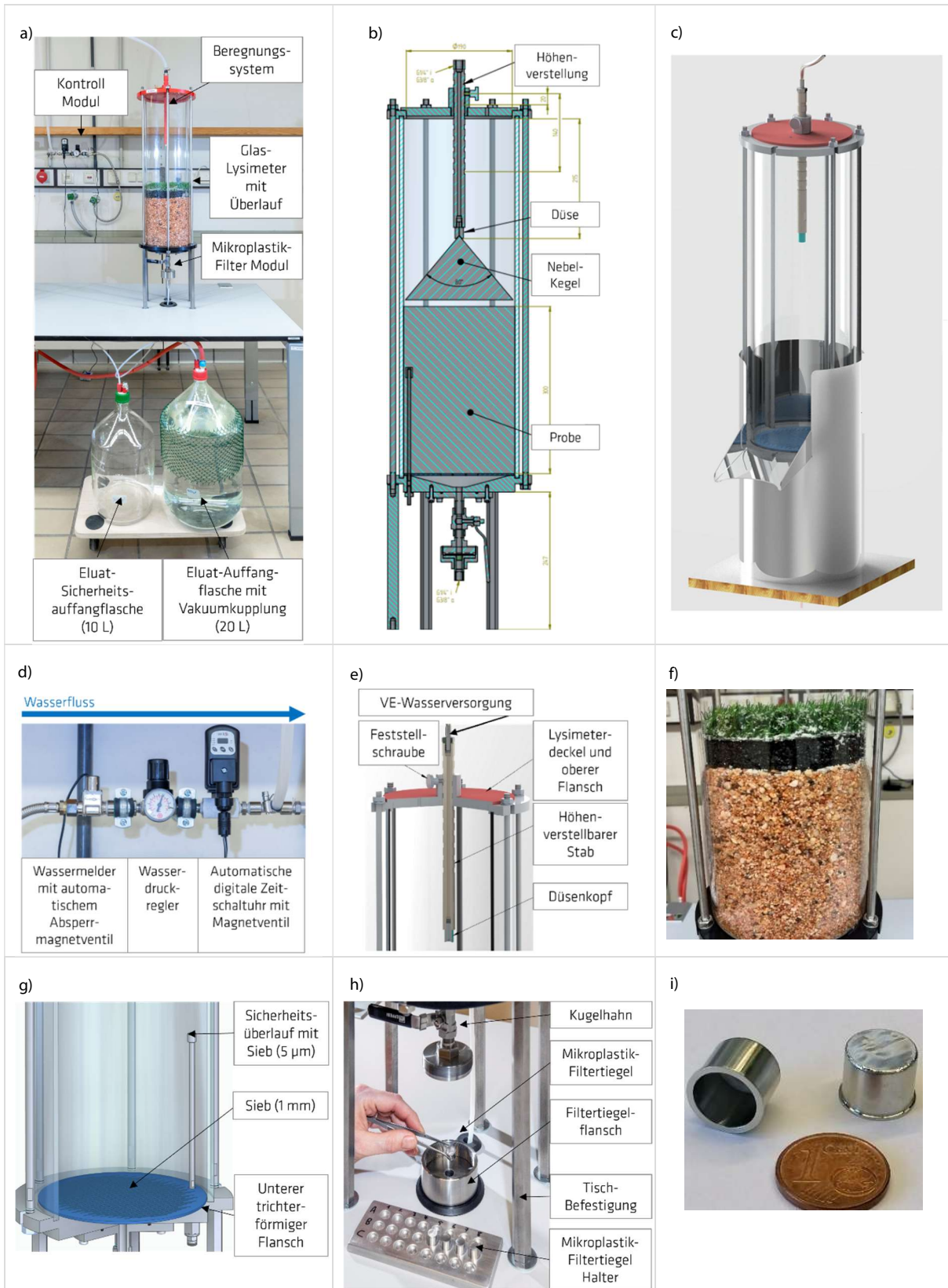


Abb. 6: Aufbau und zentrale Elemente der MEL: a) Totalaufnahme, b) Technische Zeichnung, c) Entleerungshilfe, d) Kontroll-Modul, e) Beregnungssystem, f) Kunststoffrasen-System im Glaszylinder, g) Unterer Flansch mit Überlauf, h) MP-Filter Modul, i) MP-Filtertiegel.

4.4.5 Simultanes Probenahme-Konzept

Um die spezifischen Analyseanforderungen der verschiedenen Umweltschadstoffe zu vereinen, wurde ein gemeinsames Probenahme-Konzept für partikuläre und gelöste Kontaminanten entwickelt, das auf den Wasser-Feststoff-Verhältnissen (W/F) basiert. Die angestrebten W/F der Fraktionen orientierten sich an DIN 19528: 2009 und reichten von W/F 0,3 bis 25 L/kg. Zur Bestimmung der Feststoffgehalte wurden die Dichten der einzelnen Komponenten nach DIN 66137-2: 2019 mit einem Gaspyknometer (Ultrapyc 5000, Anton Paar, Ostfildern-Scharnhausen, DE) unter Heliumatmosphäre bei 20 °C gemessen. Die Dichte des Gesamtsystems wurde als Mittelwert der Dichten der einzelnen Komponenten berechnet, wobei die Volumenanteile der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem berücksichtigt wurden. Zusätzlich wird die Gesamtdichte des Gesamtsystems für weitere Berechnungen zum Fließregime, z. B. Porenvolumen, Fließgeschwindigkeit und Kontaktzeit, herangezogen.

Die Gesamt-Berechnungsmenge entspricht der Niederschlagsmenge über die Kunststoffrasen-Lebensdauer von 15 Jahren bei mitteleuropäischen Bedingungen. Als regionaler Maßstab dient Potsdam mit einem mittleren jährlichen Niederschlagsmenge von 585,8 L/m² (Deutscher Wetterdienst, 2023b). Bezogen auf die Glaszylinder-Fläche von 0,03 m², entspricht dies einer Soll-Berechnungsmenge von 18,4 L/Jahr bzw. 276 L bei 15 Jahren. Aus der gesamten Masse der eingesetzten einzelnen Komponenten der untersuchten Kunststoffrasen-Systeme ergab sich damit ein finales W/F von 25 L/kg. Der Eluat-Durchsatz wurde zweimal bestimmt: a) vor Beginn des Versuchs durch Auffangen und Wiegen des Eluats über einen bestimmten Zeitraum und b) kontinuierlich während des Versuchs durch Wiegen des aus den einzelnen Fraktionen gewonnenen Eluat-Volumens. Um ein Zusetzen der Mikrofilter-Tiegel zu verhindern, orientierten sich die Berechnungsintervalle nach den zu erwartenden MP-Emissionen und entsprachen entweder 7 h oder 3 h und wurden durch eine automatische Zeitschaltuhr gesteuert. Bei einer Flussrate von ca. 45 mL/min entsprach dies Eluat-Volumina von ca. 18 L beziehungsweise ca. 8 L. Folglich variierte die Anzahl der analysierten Fraktionen zwischen 18 - 35 Mikrofilter-Tiegeln je Versuch.

4.4.6 Thermo Extraktion/Desorption- Gaschromatographie/Massenspektrometrie

Die Bestimmung der Mikroplastik-Gehalte erfolgte mittels Thermo Extraktion/Desorption- Gaschromatographie/Massenspektrometrie (TED-GC/MS) anhand der Detektion polymerspezifischer thermischer Zersetzungsprodukte bzw. Polymermarker, welche durch charakteristische Fragment-Ionen und Retentionszeiten (t_R) identifizierbar sind. Zunächst wurden die Proben von 200 - 500 °C in einer TGA mit Autosampler (TGA2, Mettler/Toledo) unter inerter Stickstoffatmosphäre bei einer Heizrate von 10 °C/min pyrolysiert. Unter einem konstanten Stickstoff-Spülstrom wurden die freigesetzten flüchtigen Zersetzungsprodukte durch eine auf 240 °C erhitzte Kopplungsvorrichtung (Gerstel, Mühlheim, DE, und BAM, Berlin, DE) auf einen Festphasen-Adsorbent (Polydimethylsiloxan, SorbStar, Envea GmbH, Karlsfeld, DE) geleitet. Der beladene Sorbent wurde dann mit einem Robotergreiferarm (Multi-PurposeSampler, Gerstel) zum Gaschromatographen/Massenspektrometer (GC/MS) transportiert, wo er mit einer Thermodesorptionseinheit (TDU, Gerstel, 50 - 200 °C, Heizrate: 40 °C/min, 5 min 200 °C isotherm, Helium-atmosphäre, splitless mode) thermisch mobilisiert wurde. Im Anschluss wurden die Zersetzungsprodukte kryofokussiert und mit einem gekühlten Injektionssystem (CIS4, -100 - 270 °C, Heizrate: 12 °C/s, Gerstel) schnell freigesetzt. Die Verbindungen wurden dann in einem Gaschromatographen (GC, 7890, Agilent, Santa Clara, CA, USA) mit einer chromatographischen Säule (HP-5 ms, 40 - 300 °C, Heizrate: 5 °C/min, 4 min 300 °C isotherm, Heliumfluss: 1 mL/min, Agilent) getrennt und anschließend im Massenspektrometer detektiert (Interface: 300 °C, Ionenquelle: 230 °C, Quadrupol: 150 °C, Elektronenstoßionisation: 70 eV, 5977B, Agilent). Der Scanning-Modus reichte vom Masse-Ladungs-Verhältnis (m/z) 35 bis 350. Im Zuge dieses Projektes wurde der Polymermarker-Pool um EPDM, PU und TPE (Thermoplastische Elastomere) erweitert. Eine Übersicht über alle für die MP-Analyse verwendeten Polymermarker ist in **Tab. 3** aufgeführt.

Die polymerspezifischen Nachweisgrenzen (LOD, *engl.* limit of detection) wurden mittels fünffachem Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) des für die Quantifizierung verwendeten Markers mit der Enhanced ChemStation Software (Version 2015, Agilent) bestimmt. S/N beschreibt die Intensität des ausgewählten Signals im Vergleich zum Hintergrundrauschen. Da die S/N-Ergebnisse je nach ausgewähltem Rauschhintergrundbereich leicht variieren, wurden jeweils Dreifachbestimmungen durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Dieser wurde dann durch die Polymermasse dividiert und mit fünf multipliziert. Die ermittelten LOD waren wie folgt: 2,1 µg für EPDM, 1,1 µg für PE, 0,2 µg für PET, 0,03 µg für PP, 0,3 µg für PU, 0,05 µg für SBR und 0,37 für TPE.

Tab. 3: Übersicht über alle analysierten Polymermarkerverbindungen mit ihren charakteristischen Fragment-Ionen (m/z) und Retentionszeiten (t_R). Die Sternchen beschreiben Diastereomere der jeweiligen Substanzen, deren Peaks chromatographisch getrennt sind. Durch diese Arbeit neu hinzugekommene Polymermarker sind kursiv dargestellt. Die zur Quantifizierung und LOD-Bestimmung verwendeten Marker, m/z und t_R sind unterstrichen.

Polymer	Polymermarker	Name	t_R in min	Charakteristische Fragment-Ionen
EPDM	EPDM-1	2-Methyl-1-nonen	9,6	56, 41, 69, 140
	EPDM-2	2-Methyl-1-decen	12,4	56, 41, 69, 154
	<u>EPDM-3</u>	<u>2-Methyl-1-undecen</u>	<u>15,3</u>	<u>56, 41, 69, 169</u>
	EPDM-4	2-Methyl-1-dodecen	18,1	56, 41, 69, 182
	EPDM-5	2-Methyl-1-tridecen	20,7	56, 41, 69, 196
	EPDM-6	2-Methyl-1-tetradecen	23,2	56, 41, 69, 210
	EPDM-7	2-Methyl-1-pentadecen	25,6	56, 43, 69, 224
PE	PE-1	1,10-Undecadien	12,6	81, 55, 95, 109
	PE-2	1,11-Dodecadien	15,4	81, 55, 95, 109
	PE-3	1,12-Tridecadien	18,1	81, 55, 95, 109
	PE-4	1,13-Tetradecadien	20,8	81, 55, 95, 109
	<u>PE-5</u>	<u>1,14-Pentadecadien</u>	<u>23,4</u>	<u>81, 55, 95, 109</u>
	PE-6	1,15-Hexadecadien	25,7	81, 55, 95, 109
PET	PET-1	Vinylbenzoat	14,0	105, 77, 51
	<u>PET-2</u>	<u>Ethylbenzoat</u>	<u>15,0</u>	<u>105, 77, 122, 150</u>
	PET-3	Benzoesäure	15,2	105, 122, 77, 51
	PET-5	Divinylterephthalat	25,3	175, 104, 132, 147
	PET-6	Terephthalsäure-Monoethylvinylester	27,0	149, 121, 65, 175
	PP	PP-1	2,4-Dimethylhept-1-en	5,7
PP-2		2,4,6-Trimethylnon-1-en	12,3	69, 168, 111, 125
PP-2*		2,4,6-Trimethylnon-1-en	12,4	69, 168, 111, 125
<u>PP-3</u>		<u>2,4,6,8-Tetramethylundec-10-en</u>	<u>18,8</u>	<u>111, 69, 154, 210</u>
PP-3*		2,4,6,8-Tetramethylundec-10-en	19,0	111, 69, 154, 210
PP-3**		2,4,6,8-Tetramethylundec-10-en	19,2	111, 69, 154, 210
PS	PS-1	Styrol	7,1	104, 78, 51
	<u>PS-2</u>	<u>2,4-Diphenyl-1-buten</u>	<u>29,1</u>	<u>91, 130, 104, 208</u>
	PS-3	2,4,6-Triphenyl-1-hexen	42,3	91, 117, 207, 194
PU	<u>PU-1</u>	<u>1,1'-Oxydi-2-propanol</u>	<u>11,0</u>	<u>89, 45, 49, 42</u>
	PU-2	Diethoxymethan	11,5	59, 103, 45, 41
	PU-2*	Diethoxymethan	11,7	59, 103, 45, 41
SBR	<u>SBR-2</u>	<u>2-Phenylcyclohexen</u>	<u>19,4</u>	104, <u>158</u> , 129, 115

Polymer	Polymermarker	Name	t _R in min	Charakteristische Fragment-Ionen
	SBR-3	Cyclopentylbenzol	16,5	117, 104, 146, 91
TPE	TPE-1	<i>D-Limonen</i>	10,7	68, 93, 136, 121
	TPE-2	<i>1-Methyl-4(1-Methylethenyl)-Benzen</i>	12,4	132, 117, 115, 65
	TPE-3	<i>1,2-Dihydro-2,2,4-Trimethyl-Quinolin</i>	22,1	158, 173, 143, 115
	TPE-4	<i>1,2,3-Trimethylinden</i>	20,3	143, 158, 128, 115
	TPE-5	<i>3,6-Dimethyl-Benzotiophen</i>	20,4	162, 161, 147

4.4.7 Herausforderung EPDM-Analyse

Für die Quantifizierung von MP-Emissionen aus synthetischen Gummi-Granulat musste der TED-GC/MS-Polymermarker-Pool um den Nachweis von EPDM erweitert werden. Anhand von Non-Target-Analysen verschiedener EPDM-Granulate und Literaturrecherche (Tsuge et al., 2011, Choi and Kim, 2011) wurde eine homologe Reihe von Triplets, jeweils bestehend aus Methylalken, Alken und Alkan, als dominanteste thermische Zersetzungsprodukte identifiziert. Da Alkane und Alkene unspezifisch sind und von der Pyrolyse verschiedener aliphatischer Verbindungen stammen können, wurden sieben Methylalkene als charakteristische Polymermarker-Verbindungen für die TED-GC/MS-Analyse ausgewählt (**Die polymerspezifischen** Nachweisgrenzen (LOD, *engl.* limit of detection) wurden mittels fünffachem Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) des für die Quantifizierung verwendeten Markers mit der Enhanced ChemStation Software (Version 2015, Agilent) bestimmt. S/N beschreibt die Intensität des ausgewählten Signals im Vergleich zum Hintergrundrauschen. Da die S/N-Ergebnisse je nach ausgewähltem Rauschhintergrundbereich leicht variieren, wurden jeweils Dreifachbestimmungen durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Dieser wurde dann durch die Polymermasse dividiert und mit fünf multipliziert. Die ermittelten LOD waren wie folgt: 2,1 µg für EPDM, 1,1 µg für PE, 0,2 µg für PET, 0,03 µg für PP, 0,3 µg für PU, 0,05 µg für SBR und 0,37 für TPE.

Tab. 3). Zur Validierung in Bodenmatrices wurden zwei terrestrische Mittelerden (Organik-Gehalte: < 1 %) mit zwei verschiedenen EPDM-Granulaten in unterschiedlichen Gewichtsprozenten (wt%) in zweifacher Ausfertigung dotiert. Die Bodenprobenmassen betragen 20 mg und 50 mg und die EPDM-Massen zwischen 0,2 - 0,3 mg, was 0,5 wt% bzw. 1 wt% EPDM entsprach. Obwohl einige Polymermarker (EPDM-1, EPDM-2, EPDM-6) aufgrund von Koelutionen mit organischen Verbindungen aus der Bodenmatrix schwer nachweisbar waren, zeigten die Ergebnisse insgesamt eine gute Identifizierbarkeit der meisten EPDM-Marker (EPDM-3, EPDM-4, EPDM-5, EPDM-7) in beiden Bodenmatrices bei unterschiedlichen Konzentrationen. Die Wiederfindungsraten zeigten jedoch, dass die Quantifizierbarkeit von EPDM in beiden Böden durch Matrixverbindungen beeinflusst wurde. Infolge-dessen waren die Unsicherheiten bei hohen EPDM-Konzentrationen (1 wt%) mit Wiederfindungsraten von 67 % und 100 % geringer als bei niedrigen EPDM-Konzentrationen (0,5 wt%) mit Wiederfindungsraten von 163 % und 243 %.

Im nächsten Validierungsschritt wurden EPDM-Granulat in einer Polymermatrix aus Kunststoffrasenkomponenten (PE, PP, PET, PU) mittels TED-GC/MS in Doppelbestimmung analysiert. Die Ergebnisse ergaben eine EPDM-Wiederfindungsrate von 127 ± 8 % und damit eine Überquantifizierung. Dies deutete darauf hin, dass die neuen EPDM-Marker auch in anderen Rasenkomponenten detektierbar waren. Detaillierte TED-GC/MS-Analysen zeigten, dass die EPDM-Marker nur in der Analyse des reinen PE bzw. der Grasfasern, nicht aber in den anderen Rasenkomponenten detektierbar waren. Die thermischen Zersetzungsprodukte von EPDM und PE sind aufgrund ihrer ähnlichen polymeren Molekularstrukturen ähnlich, denn beide enthalten Ethylen-Einheiten. Folglich kann eine Verwendung von Methylalkenen als EPDM-Marker möglicherweise zu einer EPDM-Überquantifizierung führen, wenn PE-Partikel in der Probe vorhanden sind. Um diese analytische Herausforderung zu überwinden, wurden zwei Lösungsansätze untersucht. Der erste Ansatz war die Analyse der Chromatogramme auf weniger dominante thermische Zersetzungsprodukte von EPDM, z. B. auf Basis der Dien-Einheit (hier nach Hersteller-Angaben: 5-Ethyliden-2-Norbornen). Dies war allerdings nicht erfolgreich und die in der Forschung beschriebenen pyrolytischen Nebenabbauprodukte von EPDM, z. B. 3- oder 4-Ethyliden-1-Cyclopenten (Choi and Kim, 2011), waren entweder nicht nachweisbar oder zu unspezifisch für die

Analyse komplexer Proben. Der zweite Ansatz war der indirekte Nachweis über EPDM-Vulkanisationsmittel, z. B. Benzothiazol oder 2-Methyl-Benzothiazol. Detaillierte Analysen der TED-GC/MS-Ergebnisse zeigten jedoch, dass dieser Ansatz aufgrund hoher Nachweis-Inkonsistenzen ungeeignet war, was potenziell zu dem Risiko einer EPDM-Unterquantifizierung führt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die analytischen Herausforderungen der EPDM-Detektion mittels TED-GC/MS-Analyse noch nicht gelöst sind und beide analytischen Ansätze entweder zu einer potenziellen Über- oder Unterquantifizierung des EPDM-Massegehalts in unbekanntenen Proben führen. In Ermangelung von Alternativen und weil die Risikobewertung in diesem Projekt von zentraler Bedeutung ist, wurde bewusst die Entscheidung getroffen, die in **Die polymerspezifischen** Nachweisgrenzen (LOD, *engl.* limit of detection) wurden mittels fünffachem Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) des für die Quantifizierung verwendeten Markers mit der Enhanced ChemStation Software (Version 2015, Agilent) bestimmt. S/N beschreibt die Intensität des ausgewählten Signals im Vergleich zum Hintergrundrauschen. Da die S/N-Ergebnisse je nach ausgewähltem Rauschhintergrundbereich leicht variieren, wurden jeweils Dreifachbestimmungen durchgeführt und daraus der Mittelwert gebildet. Dieser wurde dann durch die Polymermasse dividiert und mit fünf multipliziert. Die ermittelten LOD waren wie folgt: 2,1 µg für EPDM, 1,1 µg für PE, 0,2 µg für PET, 0,03 µg für PP, 0,3 µg für PU, 0,05 µg für SBR und 0,37 für TPE.

Tab. 3 aufgelisteten Methylalkene zu verwenden - wohl wissend, dass dies zu einer möglichen Überbestimmung führen könnte. Aus diesem Grund wurde das am besten identifizierbare thermische Zersetzungsprodukt bzw. 2-Methyl-1-Undecen (EPDM-3) für die EPDM-Quantifizierung verwendet, um die maximalen MP-Emissionen von EPDM-Kautschukfüllungen abzuschätzen.

4.4.8 Qualitätskontrolle und -sicherung

Um die Risiken für Kreuzkontaminationen zu verringern, erfüllt MEL alle schadstoffspezifischen Materialanforderungen (MP: kunststofffreie oder aus Non-Target-Polymeren bestehende Materialien, PAK: PTFE-Schläuche, Schwermetalle: keine Messingmaterialien). Zudem wurden alle Laborarbeiten unter möglichst kunststofffreien Bedingungen durchgeführt, mit minimalen Proben-Expositionszeiten und kunststofffreien Geräten (z. B. Edelstahl oder Glas). Nach den Experimenten wurden alle MEL-Komponenten demontiert und gründlich gereinigt. Hierfür wurden die großen MEL-Komponenten bzw. die Glaszylinder und alle Eluat-auffangflaschen mit Seife gewaschen und dann erst mit deionisiertem Wasser, dann mit Ethanol und schließlich mit Aceton gespült. Kleinere MEL-Komponenten (1 mm-Sieb, Überlauffilter, MP-Filtermodul, MP-Filtertiegel) wurden ebenfalls zunächst mit Seife gewaschen, dann mit deionisiertem Wasser gespült und anschließend im Ultraschallbad zunächst mit Ethanol und dann mit Aceton für jeweils 15 min gereinigt. Der obere Teil des MP-Filtermoduls, der den Kugelhahn enthält, musste manuell gereinigt werden, um Beschädigungen der Dichtungsringe zu vermeiden. Zusätzlich wurden die PTFE- und Silikonschläuche mit Ethanol gespült. Zur Qualitätssicherung und zur Vermeidung möglicher Verschleppungen und Verunreinigungen wurden Blindwert-Messungen für TED-GC/MS-, GC/MS- und ICP-OES-Analysen in Doppelbestimmung durchgeführt, indem die leere, probenfreie MEL für 7 h bzw. 18 L beregnet wurden. Die TED-GC/MS-Blindwerte zeigten eine minimale MP-Kontamination in einem Blank mit 0,01 mg/m² PP und 0,01 mg/m² PET, während der zweite Blindwert MP-frei war. Für die TED-GC/MS-Analysen wurden zudem vor jeder Probenmessung analytische Blindwert-Messungen durchgeführt, die den verfahrenstechnischen Blindwerten entsprechen.

4.4.9 Wiederfindungsraten

Es wurde ein Screening der MP-Wiederfindungsraten mit einer Polymermischung aus zwei zertifizierten MP-Referenzmaterialien aus PET (<https://webshop.bam.de>: BAM-P206) und PE (BAM-P210) sowie einem PP-Referenzmaterialkandidaten durchgeführt. Dies erfolgte in Doppelbestimmung, um verschiedene Größenordnungen von MP-Emissionen zu simulieren: eine Analyse mit jeweils 0,3 mg und eine Zweite mit jeweils 1 mg PET, PE und PP. Die Polymermischungen wurden gleichmäßig auf dem Metallsieb der MEL verteilt und für 7 h bzw. 18 L Gesamtberechnungsvolumen (Durchflussrate: 44 ± 3 mL/min) beregnet. Die MP-Filtertiegel wurden dann bei 40 °C im Ofen getrocknet und anschließend mittels TED-GC/MS analysiert.

Die Ergebnisse ergaben, dass sich die MP-Wiederfindungsraten je nach Polymertyp unterschieden. Die mittleren Wiederfindungsraten mit ihren Spannen waren wie folgt: 91,1 ± 31,8 % für PE, 45,4 ± 2,7 % für PP und 95,4

$\pm 15,9\%$ für PET. Für die teilweise niedrigen Wiederfindungsraten und hohen Abweichungen gibt es mehrere mögliche Gründe. Eine Unterquantifizierung könnte durch den Filteraufbau mit den MP-Filtertiegeln entstehen, da nur $MP \geq 5\ \mu\text{m}$ zurückgehalten wird. Eine Überquantifizierung hingegen könnte auf die Freisetzung von MP-Rückständen aus früheren Experimenten zurückzuführen sein, die durch die Reinigung der MEL nicht entfernt werden konnten, da die Experimente der Wiederfindungsrate nach denen mit den Kunststoffrasensystemen durchgeführt wurden.

Den größten Einfluss auf die Wiederfindungsraten hatten jedoch wahrscheinlich die unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen der repräsentativen Testmaterialien. Dabei ist D50 ein zentraler Parameter, der die mittlere Partikelgrößenverteilung bzw. den äquivalenten Partikeldurchmesser des Messvolumens beschreibt, unter dem 50,3 % der Partikel liegen (BAM, 2023). Ergänzende Analysen ergaben folgende D50-Werte der polymeren Testmaterialien: $18,0 \pm 0,2\ \mu\text{m}$ für PE (n: 30 Messungen), $62,6 \pm 1,9\ \mu\text{m}$ für PET (n: 30, BAM (2023)) und $261,7 \pm 4,5\ \mu\text{m}$ für PP (n: 30). Somit wies PE die niedrigste mittlere Partikelgröße und die höchste Abweichung der Wiederfindungsrate auf, während PP die höchste mittlere Partikelgröße und die geringste Abweichung hatte. Da es sich bei der Wiederfindungsrate um einen prozentualen Wert handelt, kann der Verlust oder die Zunahme einzelner Partikel die Wiederfindungsrate stark beeinflussen, was insbesondere für PP galt, das die größten mittleren Partikelgrößen aufwies. Infolgedessen war die Oberflächenspannung des Wassers im Inneren der MEL wahrscheinlich zu stark und der relativ feine Bewässerungsnebel zu schwach, um die großen und schweren PP-Partikel zu den Filtertiegeln zu transportieren.

4.4.10 Vergleich mit Realsportplatz-Ergebnissen

Die beiden im Kreis Viersen untersuchten Sportplätze unterschieden sich in Errichtungsjahr, Größe und Gummi-Infill: Sportplatz-1 (2013, 6.125 m², SBR-Granulat), Sportplatz-2 (2015, 5.230 m², EPDM-Granulat). Beide Plätze verfügen über Drainagesysteme sowie Seitenmulden, die das Niederschlagswasser in eine Rigole bzw. Schacht ableiten, wo es durch Versickerung durch Filterkies ins Grundwasser gelangen kann. Es wurden je Sportplatz zwei bzw. drei Messstellen jeweils im An- und Abstrom installiert, wobei je Messstelle eine Grundwasserprobe entnommen und auf Mikroplastik mittels Raman untersucht wurde. Weitere Details hierzu sind bei Kittner et al. (subm.) zu finden.

4.5 Schadstoff-Austräge

Neben den MP-Emissionen sind Schwermetalle und Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) relevante Schadstoffe, die potenziell aus Kunststoffrasensystemen freigesetzt werden können und somit möglicherweise gesundheitliche bzw. ökotoxikologische Probleme für Mensch und Umwelt verursachen. Daher werden in diesem Projekt ergänzend Eluate nach Lösungsmittelaufschluss mittels Gaschromatographie/Massenspektrometrie (GC/MS) und optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) analysiert, um die Konzentrationen an PAK bzw. Schwermetallen zu bestimmen. Dies ermöglicht einen Vergleich mit den Werten von Vorgängerprojekten (Kalbe et al., 2012, Kalbe et al., 2016) und eine Beurteilung zur Einhaltung der Vorgaben, z. B. der ECHA, dem zuständigen RAL-Ausschuss des Deutschen Instituts für Gütesicherung und Kennzeichnung und der Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2021)), zum Schadstoffaustrag aus Kunststoffrasensystemen.

4.5.1 Unbeanspruchte Einzel-Komponenten

Die Schadstoffanalysen wurden zunächst mittels Elutionsversuchen einzeln für alle unbeanspruchten Kunststoffrasenkomponenten in Anlehnung an DIN 19529: 2023 in Doppelbestimmung durchgeführt. Dafür wurden die Proben im W/F von 1:2 mit destilliertem Wasser abhängig vom jeweiligen Volumen entweder in 1.000 oder 2.000 mL-DURAN®-Glasflaschen gegeben und für 24 h im Überkopfschüttler (Reax 20/12, Heidolph Instruments, Schwabach, DE) bei 6 rpm geschüttelt. Im Anschluss wurden die Proben ohne Trübung (Rasen, SBR, Blindwerte) dekantiert. Die Proben mit Trübung (EPDM, Sand, Kies) wurden für 30 min bei 20.000 xg und 20 °C in Zentrifugengefäßen aus Edelstahl zentrifugiert (Avanti Centrifuge J-20 XP, Beckmann Coulter, Brea,

CA, USA). Die Analytik der Eluate erfolgte nach DIN EN ISO 22036: 2022, EN ISO 11885: 2009 und DIN EN 17503: 2022.

4.5.2 Schadstoffe aus Kunststoffrasensystemen

Ergänzend wurden die Eluate aus den Mikroplastik Eluat Lysimetern analysiert, um einen Vergleich der Schadstoffausträge der verschiedenen Kunststoffrasenaufbauten der drei Untersuchungsszenarien jeweils im unbeanspruchten und beanspruchten Zustand zu ermöglichen. Die Probenahme erfolgte simultan mit der MP-Beprobung, wie in **Kapitel 4.4.5** beschrieben.

4.5.3 Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma

Mittels Optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES, iCAP7400, Thermo Fisher Scientific, DE, USA) wurden die Eluate auf Haupt- und Spurenelemente (besonders Schwermetalle) nach den geltenden Normen DIN ISO 22036: 2022 und EN ISO 11885: 2009 analysiert. Von den wässrigen Proben bzw. Eluaten wurden jeweils Aliquote von 20 mL abgenommen und mit 5 Tropfen 65 %iger Salpetersäure p. a. gemäß DIN EN ISO 5667-3: 2019 (pH < 2) konserviert. Die Auswertung erfolgte mittels der Software QTEGRA (Thermo Fisher Scientific). Die Bestimmungsgrenzen (LOQ) wurden nach DIN 32645: 2008 Formel 14 ermittelt.

4.5.4 Gaschromatographie/Massenspektrometrie

Die Konzentrationsbestimmung der PAK erfolgte in den Eluaten der Schüttelversuche in Anlehnung an DIN EN 17503: 2022 mittels GC/MS. Zur Aufarbeitung der Eluate wurden je ca. 900 mL Eluat in einer 1.000 mL DURAN®-Glasflasche genau eingewogen und mit 100 µL internem Standard (PAK-Mix 31, Dr. Ehrenstorfer GmbH, Augsburg, DE, mit Acetonitril p. a. verdünnt auf eine Konzentration von je 1 mg/L Naphthalin-d8, Acenaphthen-d10, Phenantren-d10, Chrysen-d12 und Perylen-d12) dotiert. Hierzu wurden ca. 50 mL Hexan p. a. gegeben und das Gemisch im Horizontalschüttler für ca. 1 h bei 125 rpm geschüttelt. Anschließend wurde der gesamte Inhalt der Glasflasche in einen 1000 mL Scheidetrichter durch Nachspülen mit Reinstwasser überführt und nach ausreichender Separation die wässrige Phase von der organischen getrennt. Die organische Phase wurde in einen 200 mL Erlenmeyer überführt und über ausreichend Natriumsulfat (Na₂SO₄) p. a. für mind. 30 min getrocknet. Der trockene Extrakt wurde anschließend in ein 450 mL Rocketgefäß überführt und das rückständige Na₂SO₄ dreimal mit ca. 20 mL Hexan p. a. gewaschen. Die Waschlösung wurde mit dem Extrakt im Rocketgefäß vereint. Zu dieser Mischung wurden 50 µL iso-Octan p. a. als Keeper dotiert. Im Anschluss erfolgte die Konzentration des Extrakts auf ca. 200 µL unter Verwendung eines Evaporators (Rocket Synergy, Genevac Ltd., Ipswich, UK) mit der Methode „MTBE 100“ (35 °C, ΔT, final stage 2 min, Kühler: -10 °C). Der eingeeengte Extrakt wurde quantitativ in den Messkolben überführt und mit Hexan p. a. auf 1 mL aufgefüllt. Die Analyse der PAK im Extrakt erfolgte mit einem GC/MS System mit automatischem Probengeber (6890N, 7683B, Agilent). Die Verbindungen wurden zunächst in einer chromatographischen Säule getrennt (ZB-PAH-EU, Zebron, 2 min 50 °C, Heizrate: 30 °C/min bis 120°C, 5 °C/min bis 320 °C 6 min halten, Heliumfluss: 0,8 mL/min) und dann im Massenspektrometer analysiert (Ionenquelle: 230 °C, Quadrupol: 150 °C, Elektronenstoßionisation: 70 eV, 5973, Agilent). Das Injektionsvolumen entsprach 1 µL und die Injektortemperatur 280 °C. Die Ermittlung der Bestimmungsgrenzen (LOQ) erfolgte nach DIN 32645: 2008 Formel 14.

4.6 Recyclierbarkeit von Altrasen

Durch den zunehmenden Druck der Europäischen Union und der geforderten Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, hat in den letzten Jahren die Verwendung von Recyclingrohstoffen in der Herstellung von Verbundmaterialien an Bedeutung gewonnen. Ein neuartiger Ansatz ist das Recycling von Kunststoffrasen, womit momentan bereits u. A. Produkte für die Konstruktionen von Kunststoffrasenplätzen hergestellt werden. Für eine wirtschaftliche relevante Herstellung von Recyclat-Produkten ist die Qualität der Ausgangsmaterialien von großer Bedeutung. Das Recycling von Kunststoffrasensystemen birgt in dem Sinne einige

technische Herausforderungen, da diese sowohl aus multiplen synthetischen Polymeren bestehen, die zudem durch die Freibewitterung unterschiedlichen Schädigungen ausgesetzt waren, die ihre Leistungsfähigkeit und mechanische Qualität beeinträchtigen können.

Der Recycling-Prozess wurde in diesem Projekt im Rahmen einer Masterarbeit mit dem Thema „Analytik und Steuerung von oxidativer Schädigung in Verbundmaterial aus Recyclingrohstoffen“ erstmals systematisch erforscht. Der Fokus hierbei war die physikalisch-chemischen sowie mechanischen Materialeigenschaften im Bezug zur Recyclat-Zusammensetzung zu analysieren, um ein optimales Prozessfenster zu generieren. Für eine möglichst geringe Varianz der betrachteten Proben zu erhalten, wurden diese aus einem Kunststoffrasen hergestellt, der von der Polytan GmbH hergestellt und 2008 im Raum Stuttgart installiert worden ist. Nach einer Lebenszeit von 15 Jahren wurde dieser schließlich im April 2023 deinstalliert und zum Recycling bei der FormaTurf GmbH vorübergehend eingelagert. Der Kunststoffrasen besteht dabei aus folgenden Komponenten: Grasfasern aus PE, Umwindegarn aus PET, Backing aus PP, Performance-Infill aus EPDM und Infill aus Sand.

Für den Recyclingprozess wurde der Kunststoffrasen zunächst geschreddert und anschließend in einem mehrstufigen Verfahren in die drei Fraktionen Sand, EPDM und Kunststoffrasen aufgetrennt. Zu diesen Kunststoffrasenkomponenten, wurden außerdem Additive zur Stabilisierung der UV- und thermischen Beständigkeit hinzugefügt. Zur Probenherstellung wurden die einzelnen Rohstoffe in eine Aptrusionsanlage gefüllt, in der das Gemisch auf Temperaturen um 200 °C erhitzt und nach einer Vorheizzeit von einer Stunde aptrudiert. Nach 00, 15 und 30 min nach dem Vorheizen wurden jeweils zwei Proben genommen, die für die Analysen verarbeitet wurden. Hier wurden die Proben für die physikalisch chemischen Betrachtung kryogemahlen (CryoMill, RETSCH, DE, Haan) und für einige der mechanischen Analysen in Probenknochen gepresst. Der Ablauf des Recycling-Prozesses ist in **Abb. 7a-f** dargestellt.

Um ein möglichst großes Mischungsfenster der Proben zu betrachten wurden die Mischungsverhältnisse anhand eines Design of Experiment (DoE) generiert. Hierbei handelt es sich um ein statistisches Verfahren, mit dem es möglich ist, mehrere Faktoren gleichzeitig zu variieren, wodurch der Einfluss dieser auf sogenannte Zielvariablen simultan betrachtet werden kann. Dies wird erreicht, indem die Versuchsbedingungen so ausgewählt werden, dass die erhaltene Informationsdichte maximiert und gleichzeitig die Anzahl der Versuche minimal gehalten wird. Verwendet wurde dabei ein D-optimales Design, da aufgrund der komplexen Randbedingungen, die von unserem Projektpartner anhand von Erfahrungswerten festgelegt wurden, kein einfaches Mischungsdesign eingesetzt werden konnte. Variiert wurden dabei nur die Masseanteile von Sand, EPDM und Flussmittel, da mit Geräten im industriellen Maßstab gearbeitet wurde und diese einen Mindestumsatz von 100 kg pro Herstellungsdurchlauf benötigte. Des Weiteren ergibt sich die Probenzahl in einem DoE anhand von $2n$, wobei n die Anzahl an Variablen darstellt und die Probenzahl damit exponentiell mit der Variablenzahl steigt.

Für eine initiale Material-Charakterisierung wurden die verwendeten Kunststoffe folgende Polymer-Analysen durchgeführt: Oberflächenfunktionalisierung mittels ATR-FTIR, Zersetzungskinetik mittels TGA und die Phasenmorphologie mittels DSC. Diese detaillierten Polymer-Analysen sind entscheidend, um zu verstehen, wie sie unter verschiedenen Umweltbedingungen reagieren können, sodass zusätzliche Schädigung durch das Recyclingverfahren zugeordnet werden können. Das Recycling wird durch ein thermisches Aptrusionsverfahren umgesetzt, indem die Polymere durch Aptrusion bei etwa 200 °C zu einer Masse verschmolzen werden, die dann in die gewünschte Form gepresst werden kann. Für eine Einschätzung der Produkt-Qualität bzw. der strukturellen Integrität und Leistungsfähigkeit der Recyclatmasse zu erhalten, wurden die Proben zusätzlich mittels mechanischer Messungen analysiert: Flussrate, Schmelzindex, Dichte, Shore D Härte, die Zugfestigkeit und Druck E-Modul.



Abb. 7: Recycling-Prozess von Kunststoffrasen: a) Ausgangsmaterialien, b) Aptrusionsanlage, c) Aptrusion der Recyclatmasse, d) ausgehärtete Recyclatmasse, e) Proben-Knochen, f) Endprodukt, z. B. Unterbau für Kunststoffrasenplatz.

5. Ergebnisse

5.1 Polymer-Charakterisierung

Zur Validierung und Einschätzung der Effekte der beschleunigten Alterung wurden die Kunststoffrasen-Komponenten polymerwissenschaftlich analysiert. Die Ergebnisse der Polymer-Charakterisierungen sind im Folgenden dargestellt. Die Analysen fanden jeweils im unbeanspruchten, fabrik-neuen Zustand sowie nach den einzelnen Beanspruchungen statt. Als Vergleichsproben dienten real beanspruchte Altrasen (aRasen¹, aRasen²) sowie EPDM-Granulat (aEPDM). In **Tab. 4** wird somit in folgende sechs Beanspruchungszustände mit folgenden Abkürzungen unterschieden:

Tab. 4: Abkürzungsverzeichnis der Beanspruchungszustände der analysierten Kunststoffrasenkomponenten.

Abkürzung	Beanspruchung
U	Unbeansprucht bzw. fabrik-neu
H	Hydrolytisch beansprucht
B	Bewittert
BM	Bewittert und mechanisch beansprucht
BMH	Bewittert, mechanisch und hydrolytisch beansprucht
R	Real beansprucht

5.1.1 EPDM-Infill

Da fast alle Ergebnisse hohe Homogenitäten aller TGA- (Spannen < 1 %) und DSC-Parameter (Spannen < 1 °C) ergaben, sind diese in ihren Mittelwerten jeweils in **Tab. 5** bzw. **Tab. 6** angegeben. Alle EPDM-Proben zersetzen sich pyrolytisch in zwei Masseverluststufen ML_{pyr1} (180 - 400 °C) und ML_{pyr2} (400 - 500 °C) mit ihren jeweiligen DTG_{max} . Die DSC-Ergebnisse ergaben bezüglich der Phasenmorphologie, dass EPDM zwei bzw. drei sich überlagernde Schmelzpeaks ausbildet (T_{m1} , T_{m2} , T_{m3}).

Tab. 5: TGA-Ergebnisse der EPDM-Granulate. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fEPDM und teils biobasiertem bEPDM jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealtertem (R) aEPDM.

Probe	Beanspruchung	ML_{Wasser} in %	ML_{pyr1} in %	ML_{pyr2} in %	ML_{ox} in %	MR in %	DTG_{max} in °C	
							ML_{pyr1}	ML_{pyr2}
fEPDM	U	0,4	13,2	22,0	24,6	39,9	326	465
	H	0,3	12,9	22,1	24,6	40,2	326	465
	B	0,4	12,9	22,3	24,5	39,9	326	465
	BM	0,4	12,5	22,9	24,0	40,1	323	465
	BMH	0,4	12,3	22,7	24,2	40,3	323	465
bEPDM	U	0,6	19,8	15,6	24,4	39,5	319	463
	BMH	0,8	19,2	17,2	23,4	39,5	349	465
aEPDM	R	0,4	12,7	21,4	24,4	41,1	328	466

Tab. 6: DSC-Ergebnisse der EPDM-Granulate. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fEPDM und teils biobasiertem bEPDM jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealtertem (R) aEPDM.

Probe	Beanspruchung	T _g in °C	T _{m1} in °C	T _{m2} in °C	T _{m3} in °C
fEPDM	U	-58,9	-	108,5	117,5
	H	-58,9	-	108,5	117,4
	B	-58,3	71,0	108,8	117,8
	BM	-58,4	-	106,8	117,9
	BMH	-58,1	-	109,1	117,7
bEPDM	U	-63,6	-	-	-
	BMH	-63,9	-	-	119,8
aEPDM	R	-51,7	-	-	117,8

Die Ergebnisse ergaben, dass die rein hydrolytische Beanspruchung keine Effekte für die physiko-chemische Degradation von fEPDM hatte. Dies deckt sich mit der Literatur, wo beschrieben wird, dass sich EPDM entweder durch Hitze, Strahlung, chemische Umgebungseinflüsse oder Ozon zersetzt (Zaghdoudi et al., 2023, Zhao et al., 2010). Diese wird durch die weiteren Ergebnisse der aufeinander aufbauenden Beanspruchungsschritte der beschleunigten Alterung bestätigt, wo eine leichte graduelle Degradationszunahme zu beobachten war. Dies zeigte sich bei der Bewitterung zunächst in Form von Oberflächen-Funktionalisierungen bzw. OH-Zunahmen in den ATR-FTIR-Spektren (3.645 – 3.120 cm⁻¹), die ähnlich der Altprobe von aEPDM waren (**Abb. 8**) leichte T_g-Reduzierung als auch die Bildung einer neuen Phasenstruktur bzw. neuen Schmelzpeaks (T_{m1}) in den DSC-Kurven (**Tab. 6**).

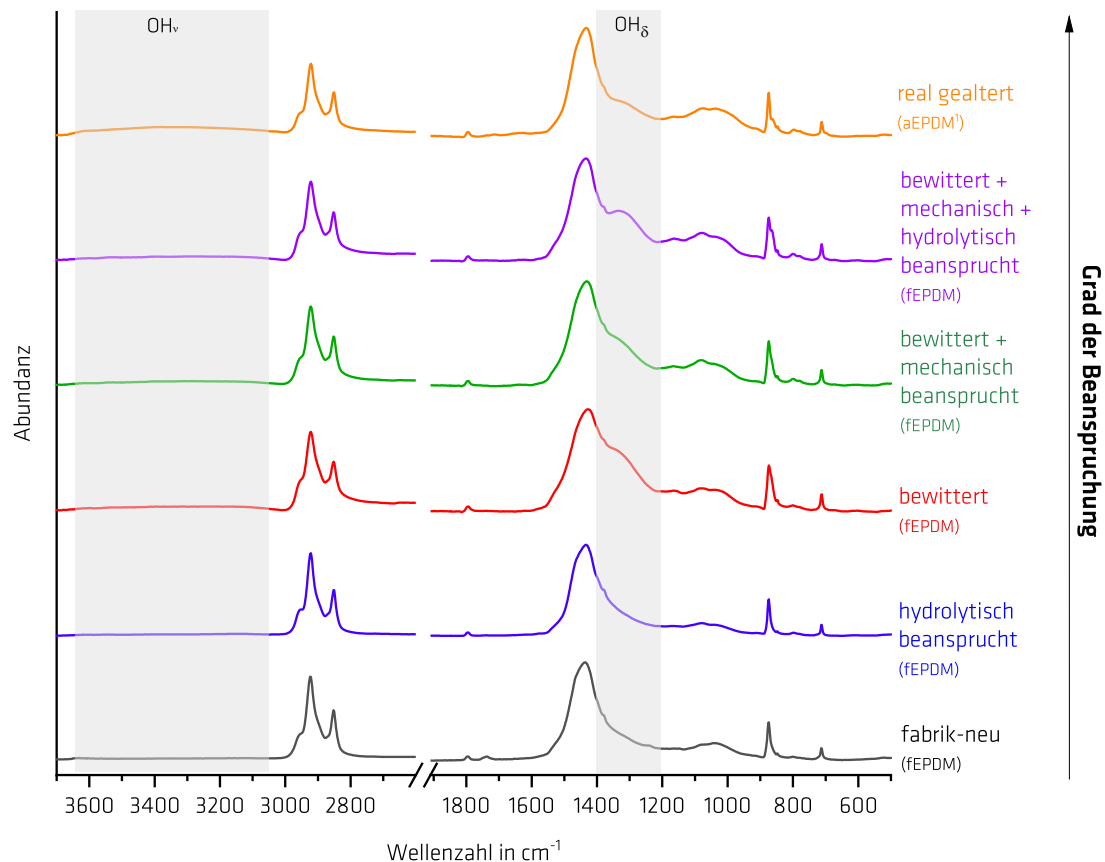
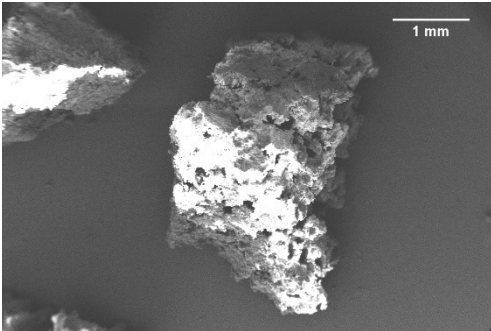
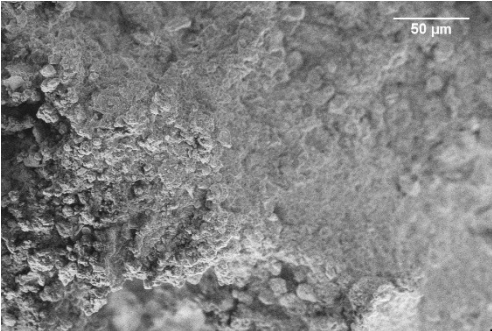
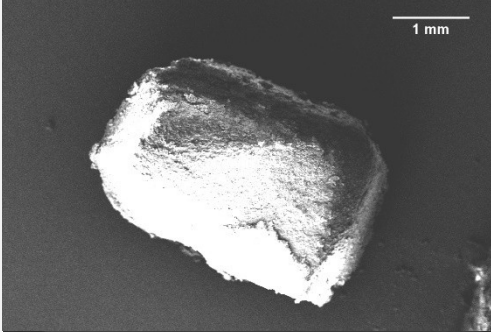

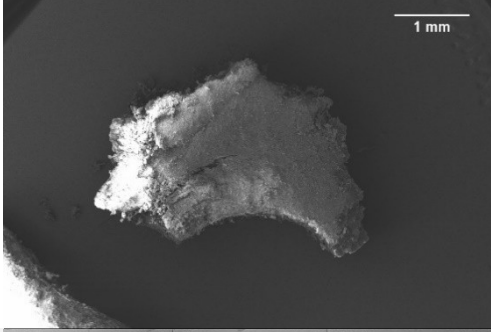
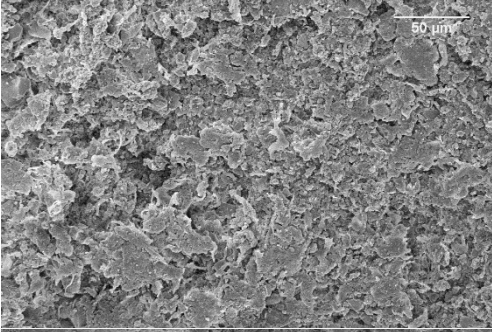
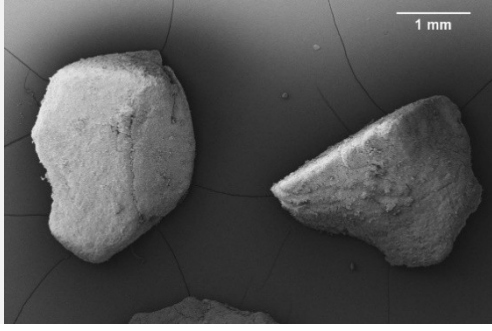
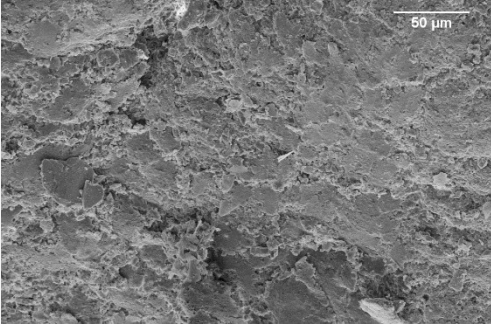


Abb. 8: Effekte der beschleunigten Alterung auf die Oberflächenfunktionalisierung des fossilbasierten fEPDM. Dargestellt sind die normierten ATR-FTIR-Spektren bei vier Beanspruchungen (neu, hydrolytisch beansprucht, bewittert, bewittert und mechanisch beansprucht) im Vergleich mit real gealtertem aEPDM. Die charakteristischen Bandenänderungen sind markiert.

Die mechanische Beanspruchung führte im nächsten Schritt zu einer weiten Tg-Reduzierung sowie Oberflächenabration und -vergrößerungen, wie in den REM-Aufnahmen in **Tab. 7** zu erkennen ist. Insgesamt waren nach Beanspruchungs- und Experimentende (BMH) die stärksten Degradationshinweise detektierbar, sodass die geringste Tg auf photooxidativ induzierte Kettenspaltungen hinweist, sodass die Ergebnisse der beschleunigten Alterung auf 15 Jahre in der Tendenz ähnlich der Altprobe von aEPDM waren. Bei der beschleunigten Alterung von bEPDM auf 3 Jahre wurden hingegen keine Degradationshinweise ermittelt und die Werte zeigten teilweise hohe Abweichungen, vermutlich aufgrund der Heterogenität des Ausgangsmaterials mit dem zugemischten Hanffasern.

Tab. 7: Morphologische Oberflächenänderungen des EPDM-Granulats in Abhängigkeit von dem Beanspruchungszustand und Probe aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen in der Totalen (45x) und Detail-Aufnahme (900x).

Zustand	Probe	Vergrößerung	
		Totale (45x)	Detail (900x)
Fabrik-neu	fEPDM		
Bewittert	fEPDM		
Bewittert, Mechanisch & Hydrolytisch Beansprucht	fRasen		
Real Beansprucht	aEPDM		

5.1.2 Grasfasern

Alle untersuchten Kunststofffasern-Fasern bestanden aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE), das sich pyrolytisch von 380 - 505 °C zersetzt. Die Fasern unterschieden sich optisch in Struktur (glatt/texturiert) und Farbgebung (hellgrün/dunkelgrün). Die TGA-Ergebnisse ergaben, dass die Farbe bzw. die verwendeten Additive/ Farbpigmente Einfluss auf die Peak-Maxima der DTG-Signale (DTG_{max}) hatten - die Struktur hingegen nicht. Konkret hatten alle dunkelgrünen Fasern ein höheres DTG_{max} als die hellgrünen Fasern. Umgekehrt verhielt es sich bei den phasenmorphologischen Analysen, wo eine Abhängigkeit der Schmelztemperaturen (T_{m1}/T_{m2}) mit der Faser-Struktur (glatt/texturiert), aber nicht der Farbgebung (dunkelgrün/hellgrün) festgestellt wurde. Es konnte in keiner Probe die Glasübergangstemperatur (T_g) bestimmt werden, da T_g in den DSC-Kurven von exothermen Reaktionen (vmtl. Kaltkristallisationen) überlagert wurden. Insgesamt waren die TGA- und DSC-Ergebnisse der Faser-Proben homogen mit geringen Standardabweichungen (Mehrfachbestimmungen) bzw. Spannen (Doppelbestimmungen) von < 1 % bzw. < 1 °C. Daher werden im Folgenden die mittleren TGA-Ergebnisse der PE-Fasern in **Tab. 8** gemeinsam und die DTG_{max} nach Farbton getrennt und die DSC-Ergebnisse in **Tab. 9** nach Struktur getrennt dargestellt.

Tab. 8: TGA-Ergebnisse der HDPE-Grasfasern. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recyceltem rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealtertem (R) Altproben (aRasen¹/aRasen²). Da DTG_{max} je nach Farbe variierte, wurde in hell- und dunkelgrüne Fasern unterschieden. Ein Bindestrich bedeutet, dass keine hellgrünen Fasern vorhanden waren.

Probe	Beanspruchung	ML _{Wasser} in %	ML _{pyr} in %	ML _{ox} in %	MR in %	DTG _{max} in °C	
						hellgrün	dunkelgrün
fRasen	U	0,2	98,5	0,0	1,2	479	482
	H	1,2	97,0	0,2	1,6	478	481
	B	0,0	98,3	0,2	1,4	478	480
	BM	0,1	97,0	0,4	2,5	482	484
	BMH	0,1	97,2	0,9	1,8	480	482
rRasen	U	0,1	98,4	0,1	1,5	479	482
	H	0,1	98,5	0,2	1,3	478	480
	B	0,2	98,5	0,1	1,2	478	480
	BM	0,0	96,1	0,0	3,8	479	481
	BMH	0,0	97,3	0,0	2,8	479	481
bRasen	U	0,2	98,1	0,2	1,5	476	477
	BMH	0,0	98,2	0,1	1,7	476	480
aRasen ¹	R	0,2	94,9	0,4	4,5	-	478
aRasen ²	R	0,2	97,8	0,2	1,8	476	478

Tab. 9: DSC-Ergebnisse der HDPE-Grasfasern. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealterten (R) Altproben (aRasen¹/aRasen²). Da sich die Schmelztemperaturen (T_{m1}/T_{m2}) abhängig von der Struktur (glatt/texturiert) unterschieden, sind sie getrennt dargestellt. Die Glasübergangstemperaturen konnten aufgrund von Überlagerungen mit exothermen Reaktionen nicht bestimmt werden. Ein Bindestrich, dass keine T_m bzw. texturierten Fasern in der Probe vorhanden waren.

Probe	Beanspruchung	Glatte Fasern		Texturierte Fasern	
		T_{m1} in °C	T_{m2} in °C	T_{m1} in °C	T_{m2} in °C
fRasen	U	104,9	122,5	108,9	125,3
	H	103,8	124,7	108,0	125,5
	B	103,6	125,6	108,5	125,3
	BM	103,7	124,8	107,9	124,7
	BMH	103,4	125,3	107,8	125,0

Probe	Beanspruchung	Glatte Fasern		Texturierte Fasern	
		T _{m1} in °C	T _{m2} in °C	T _{m1} in °C	T _{m2} in °C
rRasen	U	108,5	122,9	106,7	124,5
	H	108,8	122,2	106,7	124,5
	B	108,6	122,7	107,7	125,6
	BM	108,0	121,8	106,8	124,6
	BMH	107,4	121,9	107,2	124,8
bRasen	U	113,7	124,3	-	127,7
	BMH	110,8	124,8	114,4	126,7
aRasen ¹	R	105,9	122,2	-	-
aRasen ²	R	112,1	121,2	-	-

Insgesamt ergaben die Ergebnisse, dass die UV-Bewitterung den stärksten Effekt auf die physiko-chemische Degradation der PE-Grasfasern hatte, da sich PE photooxidativ abbaut (Chew et al., 1977). Dies zeigte sich bei fRasen und rRasen einerseits durch Reduzierungen der DTG_{max} bei den hell- und dunkelgrünen Fasern um -1 bis -2 °C auf 478 °C bzw. 480 °C sowie T_m-Reduzierungen in den DSC-Ergebnissen. Dies ist auf die Bildung thermisch labilerer Degradationsprodukte während der Photooxidation zurückzuführen und ist ein Hinweis auf Kettenbrüche des Polymer-Backbones. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Vergleichsproben der PE-Fasern der real beanspruchten Altrasen (aRasen¹, aRasen²), wo DTG_{max} von 476 °C bei den hellgrünen und 478 °C bei den dunkelgrünen Fasern ermittelt wurde. Ergänzend ergaben REM-Aufnahmen, dass sowohl bei fRasen als auch rRasen oberflächliche Oxidationsschäden sichtbar waren (siehe **Tab. 10**). Dies wurde durch die ATR-FTIR-Spektren bestätigt, wo eine Zunahme der Oberflächenfunktionalisierung bzw. Intensivierungen der OH-Banden/Wasserstoff-Brücken-Bindungen (OH/H-Brücken, Valenzschwingung ν : 3.650 - 3.050 cm⁻¹; Deformationsschwingung δ : 1.400 - 1.250 cm⁻¹), Carbonyl-Bindungen (C=O: 1.800 - 1.650 cm⁻¹) und Carboxylat-Ionen (COO⁻: 1.600 - 1.510 cm⁻¹) beobachtet wurden. **Abb. 9** zeigt diese Effekte stärker bei fRasen als bei rRasen, was vermutlich auf den Recycling-Anteil und den damit wahrscheinlich verbundenen höheren Anteil an UV-Stabilisatoren zurückzuführen ist. Bei der Kombination aus Bewitterung und mechanischer Beanspruchung war hingegen eine geringere Oberflächenfunktionalisierung zu beobachten, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass das Sand-Infill die oxidativ geschädigte Oberfläche abgerieben hat während der mechanischen Beanspruchung. Sand-Reste auf den Grasfasern sind in den Spektren als Siloxan-Bande (Si-O-Si: 1.220 - 900 cm⁻¹). Die Oberflächenvergrößerungen sind in den REM-Aufnahmen in **Tab. 10** erkennbar, die den real gealterten Grasfasern stark ähneln, was auf eine Realitätsnähe und damit Erfolg der beschleunigten Alterung hinweist. Bei den nur auf drei Jahre beschleunigt gealterten biobasierten Grasfasern von bRasen wurden nur geringe bis keine Degradationseffekte detektiert, was vermutlich auf der kürzeren UV-Expositionszeit sowie der allgemein geringen Oxidationsrate von HDPE basiert (Gulminea et al., 2003).

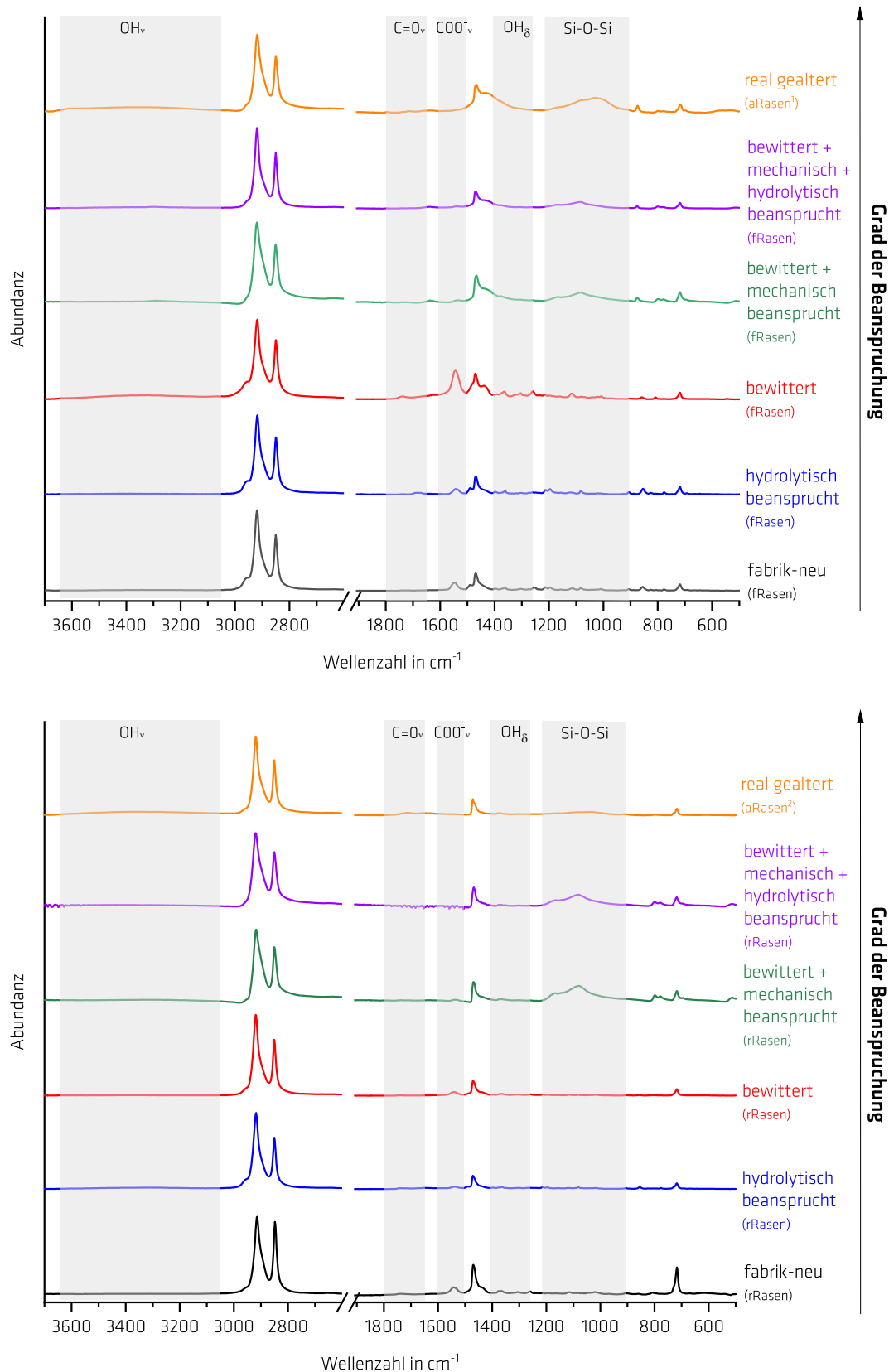
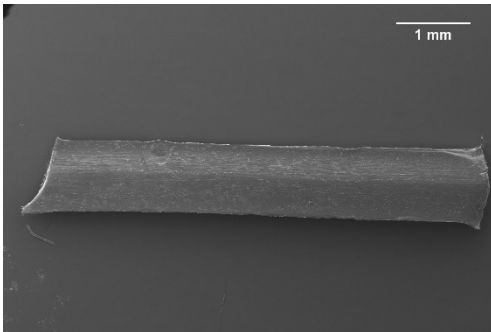
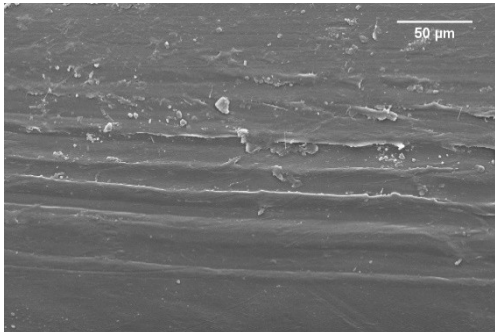
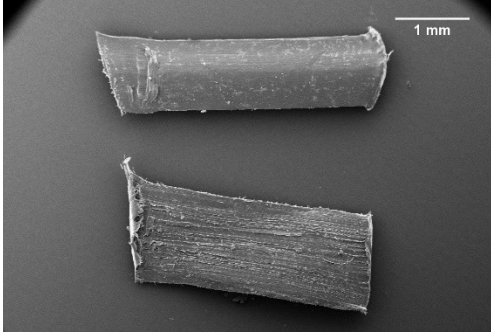

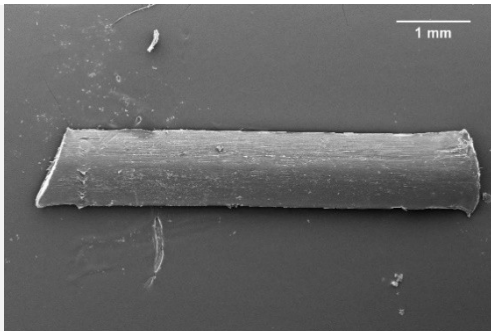
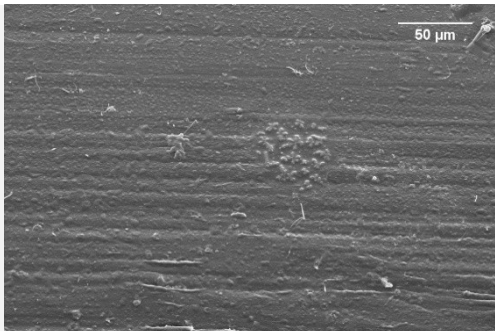
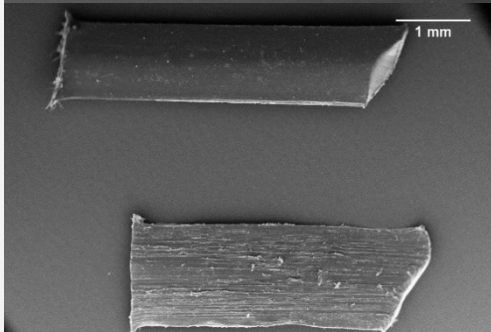
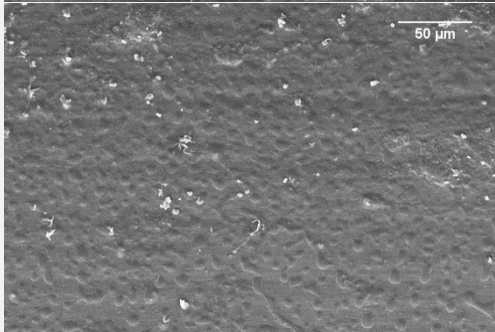
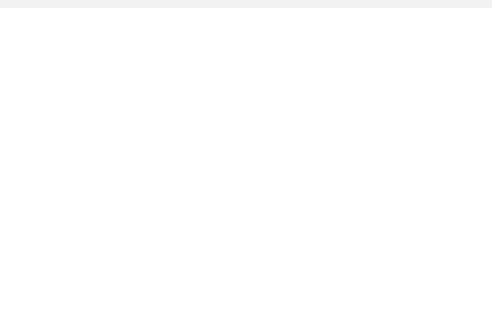
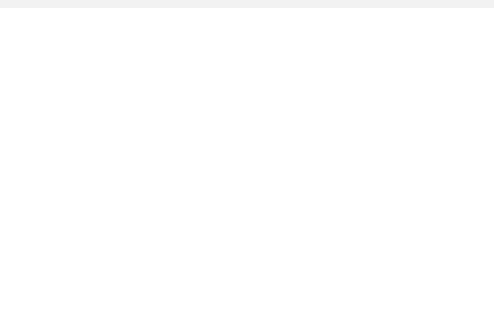


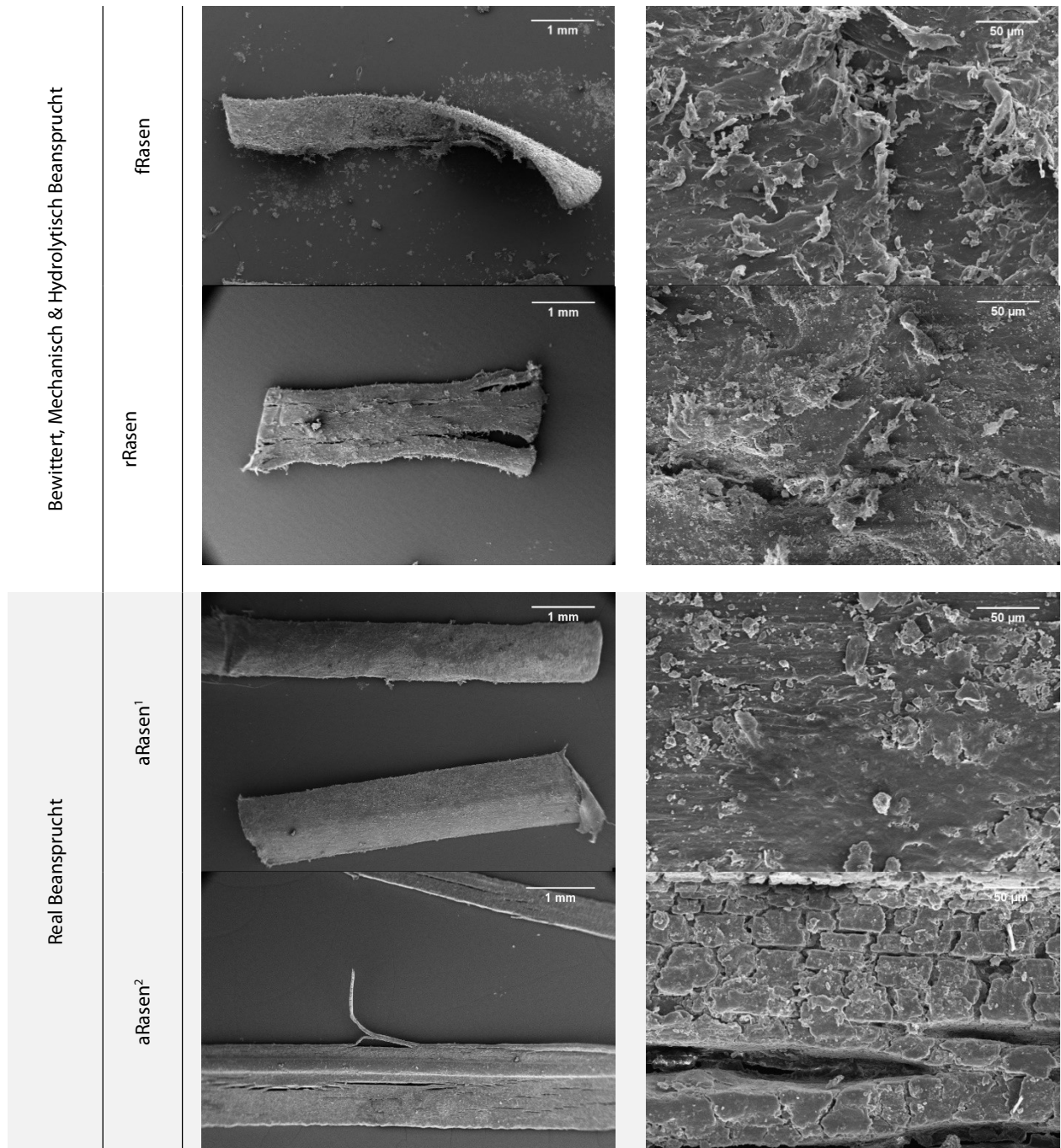


Abb. 9: Oberflächenfunktionalisierung der PE-Grasfasern von fRasen (oben) und rRasen (unten) durch die beschleunigte Alterung. Dargestellt sind die normierten ATR-FTIR-Spektren bei vier Beanspruchungen (fabrik-neu, hydrolytisch, bewittert, bewittert und mechanisch beansprucht) im Vergleich mit real gealterten Grasfasern von aRasen². Die charakteristischen Bandenänderungen sind markiert.

Tab. 10: Morphologische Oberflächenänderungen der Grasfasern in Abhängigkeit von dem Beanspruchungszustand und Probe aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen in der Totalen (45x) und Detail-Aufnahme (900x).

Zustand	Probe	Vergrößerung	
		Totale (45x)	Detail (900x)
Fabrik-neu	fRasen		
			
	rRasen		
			
Bewittert	fRasen		
			
	rRasen		



5.1.3 Trägermaterial

Das Trägermaterial bzw. „Backing“ bestand bei allen untersuchten Kunststoffrasen aus Polypropylen (PP), das sich thermisch in einer pyrolytischen Masseverluststufe von ML_{pyr} 380 – 500 °C zersetzte und zwei sich überlagernde T_m (T_{m1}/T_{m2}) ausbildete. Die TGA- und DSC-Ergebnisse waren überwiegend homogen mit Spannen < 1% bzw. < 1 °C und sind daher als Mittelwerte in **Tab. 11** und **Tab. 12** dargestellt.

Tab. 11: TGA-Ergebnisse des PP-Trägermaterials. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewittert, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real gealterten (R) Altprobe (aRasen¹).

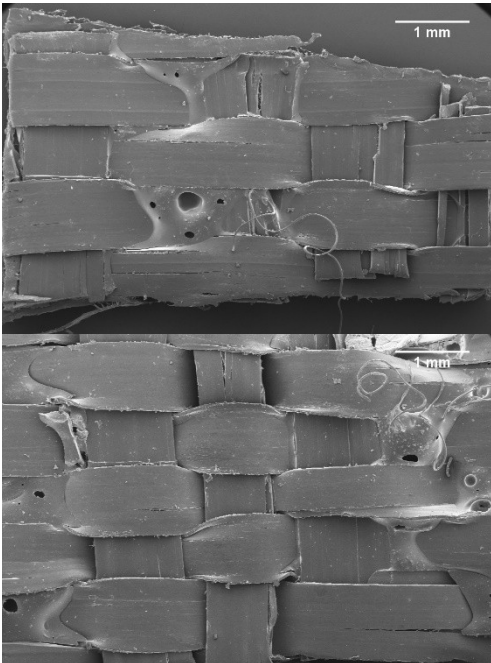

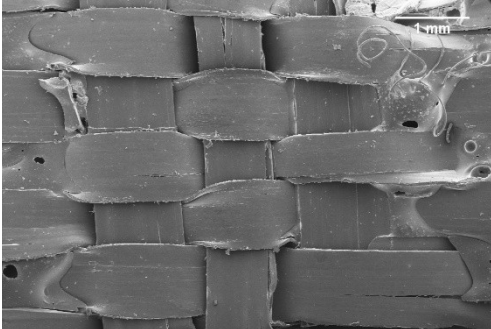
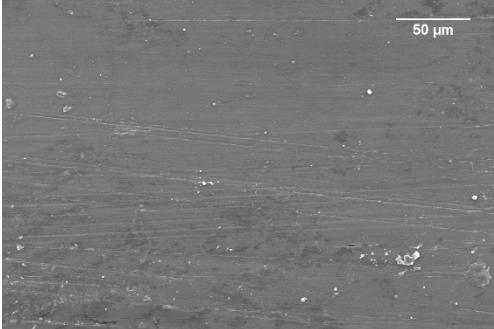
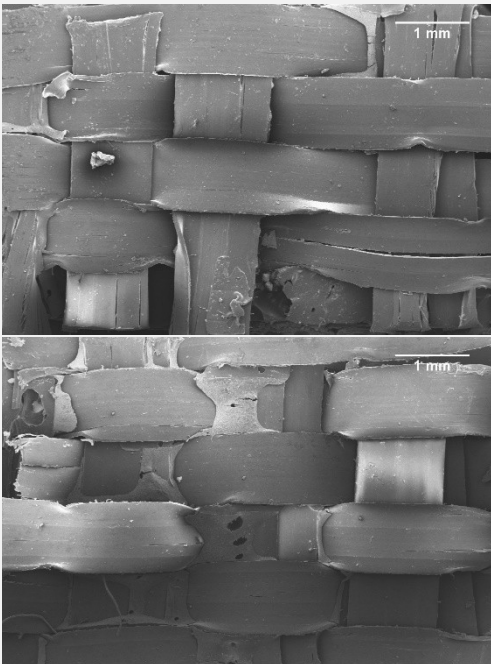

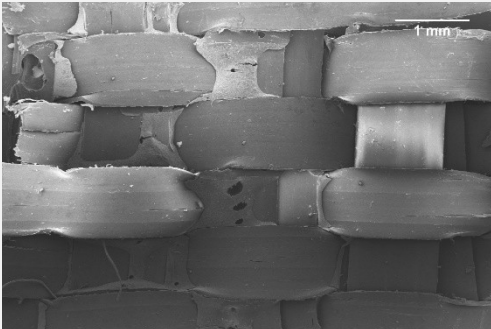
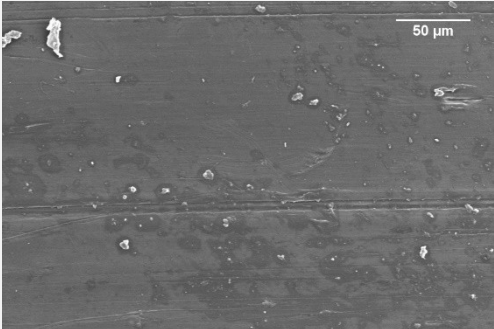
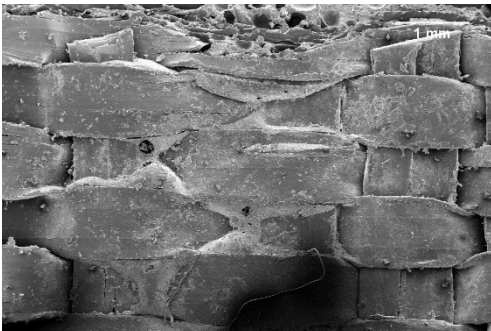
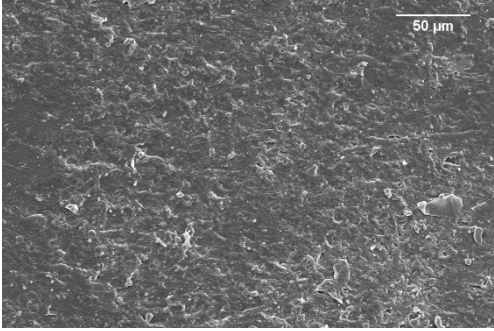
Probe	Beanspruchung	ML _{Wasser} in %	ML _{pyr} in %	ML _{ox} in %	MR in %	DTG _{max} in °C
fRasen	U	0,3	95,0	2,5	2,1	458
	H	1,1	95,6	1,4	1,8	459
	B	0,0	98,8	0,8	0,3	460
	BM	0,2	97,1	1,6	1,2	461
	BMH	0,1	98,2	1,2	0,5	461
rRasen	U	0,2	97,1	1,8	0,9	460
	H	0,2	96,9	1,7	1,2	459
	B	0,7	97,0	1,0	1,3	461
	BM	0,0	98,1	1,0	0,9	459
	BMH	0,0	99,9	0,1	0,1	461
bRasen	U	0,4	97,6	1,4	0,6	459
	BMH	0,0	98,8	0,5	0,1	462
aRasen ¹	R	0,2	91,2	1,9 - 4,4	1,1 - 5,2	458

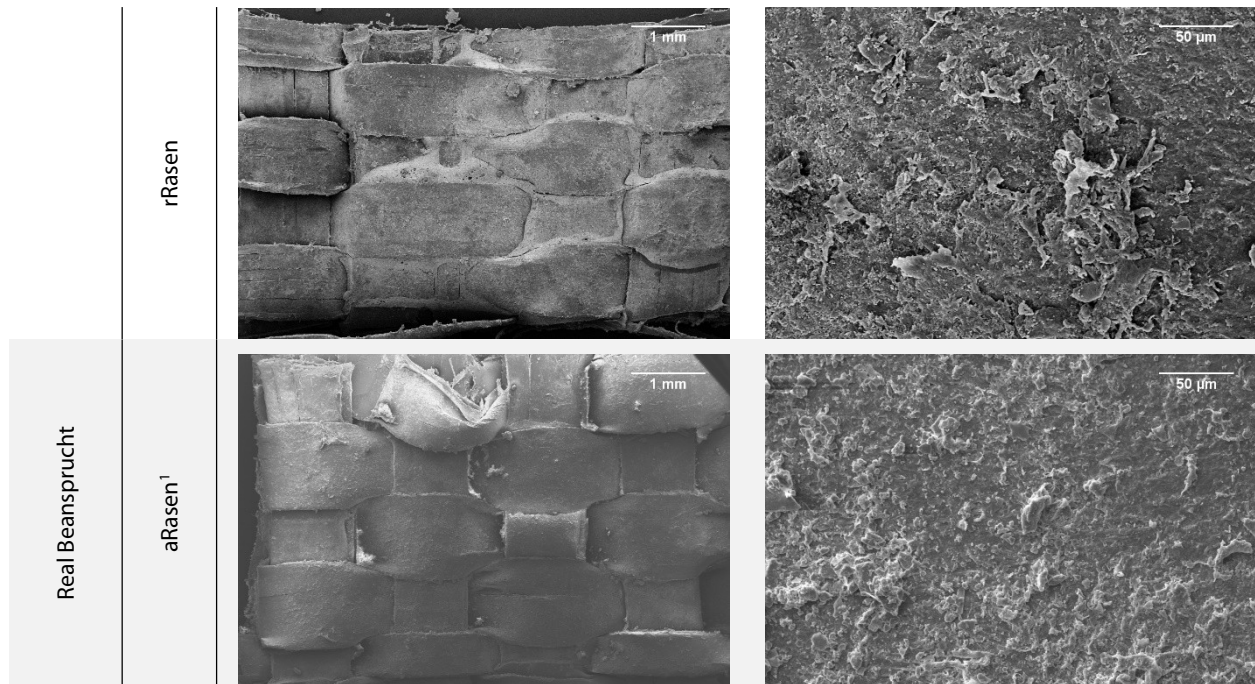
Tab. 12: DSC-Ergebnisse der PP-Trägermaterial. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real beanspruchten (R) Altprobe (aRasen¹).

Probe	Beanspruchung	T _g in °C	T _{m1} in °C	T _{m2} in °C
fRasen	U	-8,6	121,1	163,4
	H	-8,6	121,5	162,4
	B	-8,6	121,1	162,9
	BM	-9,9	120,9	161,3
	BMH	-9,1	120,7	160,7
rRasen	U	-9,7	121,4	162,4
	H	-9,7	120,5	162,7
	B	-9,4	121,7	163,2
	BM	-10,6	121,1	162,3
	BMH	-9,3	-	162,0
bRasen	U	-	-	164,9
	BMH	-11,1	158,2	164,9
aRasen ¹	R	-7,1	-	160,2

Die TGA-Ergebnisse zeigten, dass die UV-Bewitterung bei fRasen sowohl zu Erhöhungen von ML_{pyr} um +3,8 % als auch DTG_{max} um +2 °C geführt haben. Dies basiert darauf, dass sich PP aufgrund seiner molekularen Struktur bzw. Methylgruppen an den alternierenden Kohlenstoffatomen durch Bestrahlung vernetzt und dadurch thermisch stabiler wird (Sawasaki and Nojiri, 1988). Dies wird durch die DSC-Ergebnisse unterstützt, in der eine Änderung der Phasenmorphologie durch T_{m2}-Reduzierungen um -1,7 °C beobachtet wurde. Bei rRasen wurden die Vernetzungshinweise nur als Tendenz beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass die UV-Strahlung dort aufgrund der hohen Grasfaser-Dichte in geringem Maße an das Trägermaterial gelangt ist. Wie auch bereits bei dem EPDM-Infill und Grasfasern beobachtet, führte auch die mechanische Beanspruchung beim Träger zu Abrasion und Oberflächenvergrößerungen. Die REM-Aufnahmen in **Tab. 13** zeigen, dass dieser Effekt bei fRasen und aRasen¹ geringer ausgeprägt war als bei rRasen, vermutlich weil dort kein Gummi-Infill als Abrasionsschutz vor dem Sand-Infill vorhanden war. Insgesamt waren die Effekte der beschleunigten Alterung auf die Degradation des Träger-Materials aufgrund der geringeren UV-Exposition weniger stark ausgeprägt als bei dem EPDM-Infill, den Grasfasern sowie der Altprobe, die zudem eine geringere Grasfaser-Dichte aufwies.

Tab. 13: Morphologische Oberflächenänderungen des PP-Trägers in Abhängigkeit von dem Beanspruchungszustand und Probe aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen in der Totalen (45x) und Detail-Aufnahme (900x).

Zustand	Probe	Vergrößerung	
		Totale (45x)	Detail (900x)
Fabrik-neu	fRasen		
	rRasen		
Bewittert	fRasen		
	rRasen		
Bewittert, Mechanisch & Hydrolytisch Beansprucht	fRasen		



5.1.4 Umwindgarn

Die Umwindgarne aller untersuchten Kunststoffrasen-Proben waren aus Polyethylenterephthalat (PET), das sich pyrolytisch in einer Masseverluststufe von 300 – 500 °C zersetzt. Mittels DSC wurde die T_g sowie eins bis zwei T_m bestimmt. Die TGA- und DSC-Ergebnisse waren überwiegend homogen mit geringen Spannen in den Doppelbestimmungen von < 1 % bzw. < 1 °C und sind daher als Mittelwerte in **Tab. 14** und dargestellt.

Die Ergebnisse ergaben, dass **die rein** hydrolytische Beanspruchung (H) - selbst unter den moderaten Bedingungen von 20 °C - den stärksten Degradationseffekt auf die Umwindgarne hatte. Dies zeigte sich bei fRasen und rRasen durch Reduzierung von ML_{pyr} um -0,7 bzw. -2 % und damit einhergehend von DTG_{max} um -3 bzw. -1 °C. Zudem reduzierten sich die T_g bei fRasen um -2,6 °C und bei rRasen um -1 °C. Dies weist auf Kettenbrüche hin, was auf der höheren Hydrolyse-Empfindlichkeit aufgrund der vorhandenen Ester-Gruppen im PET basiert. Zusätzlich degradiert PET ebenfalls photolytisch mittels radikalischer Kettenspaltungen, die entweder ebenfalls an der Ester-Gruppe oder intramolekular durch Abtrennung eines Wasserstoffatoms unter Bildung kürzerer Polymerketten mit funktionalen Endgruppen erfolgen können, die sich miteinander vernetzen können (Sang et al., 2020). Als Resultat waren die Degradationseffekte nach der kombinierten beschleunigten Alterung bei fRasen und rRasen ähnlich denen der real beanspruchten Altprobe.

Tab. 14 dargestellt.

Die Ergebnisse ergaben, dass die rein hydrolytische Beanspruchung (H) - selbst unter den moderaten Bedingungen von 20 °C - den stärksten Degradationseffekt auf die Umwindgarne hatte. Dies zeigte sich bei fRasen und rRasen durch Reduzierung von ML_{pyr} um -0,7 bzw. -2 % und damit einhergehend von DTG_{max} um -3 bzw. -1 °C. Zudem reduzierten sich die T_g bei fRasen um -2,6 °C und bei rRasen um -1 °C. Dies weist auf Kettenbrüche hin, was auf der höheren Hydrolyse-Empfindlichkeit aufgrund der vorhandenen Ester-Gruppen im PET basiert. Zusätzlich degradiert PET ebenfalls photolytisch mittels radikalischer Kettenspaltungen, die entweder ebenfalls an der Ester-Gruppe oder intramolekular durch Abtrennung eines Wasserstoffatoms unter Bildung kürzerer Polymerketten mit funktionalen Endgruppen erfolgen können, die sich miteinander vernetzen können (Sang et al., 2020). Als Resultat waren die Degradationseffekte nach der kombinierten beschleunigten Alterung bei fRasen und rRasen ähnlich denen der real beanspruchten Altprobe.

Tab. 14: TGA-Ergebnisse des PET-Umwindegarns. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und bio-basiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewittert, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real gealterten (R) Altprobe (aRasen¹).

Probe	Beanspruchung	ML _{Wasser} in %	ML _{pyr} in %	ML _{ox} in %	MR in %	DTG _{max} in °C
fRasen	U	0,4	86,3	13,6	0,0	435
	H	1,4	85,7	12,7	1,5	432
	B	0,4	86,5	12,5	1,0	434
	BM	0,5	79,4	12,6	7,5	434
	BMH	0,5	81,5	12,1	5,9	433
rRasen	U	0,5	86,5	12,8	0,7	432
	H	0,5	84,5	14,6	0,8	431
	B	0,9	88,7	11,0	0,3	433
	BM	0,3	78,4	12,3	9,1	436
	BMH	0,3	81,3	12,7	5,7	434
bRasen	U	0,5	82,7	15,3	2,0	434
	BMH	0,3	79,3	12,9	7,5	436
aRasen ¹	R	0,4	78,9	16,0	5,1	435

Tab. 15: DSC-Ergebnisse des PET-Umwindegarns. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und bio-basiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewittert, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real gealterten (R) Altprobe (aRasen¹). Ein Bindestrich bedeutet, dass keine T_g oder T_m detektierbar waren.

Probe	Beanspruchung	T _g in °C	T _{m1} in °C	T _{m2} in °C	T _{m3} in °C
fRasen	U	75,3	-	248,5	-
	H	71,7	-	250,2	-
	B	72,1	-	250,5	-
	BM	-	123,0	249,6	-
	BMH	72,3	122,8	249,4	-
rRasen	U	74,7	-	249,0	-
	H	73,7	-	249,0	-
	B	74,4	-	249,4	-
	BM	73,5	-	249,1	-
	BMH	72,3	-	248,6	-
bRasen	U	73,7	-	248,7	-
	BMH	73,9	-	249,0	-
aRasen ¹	R	74,6	-	248,0	253,5

5.1.5 Kleber

Das Trägermaterial der untersuchten Kunststoffrasen wurde mit Ether-basierten Polyurethan (PU) verklebt, das sich pyrolytisch in zwei Masseverluststufen von 200 – 325 °C (ML_{pyr1}) und 325 – 450 °C (ML_{pyr2}) zersetzte. Die TGA-Ergebnisse waren überwiegend homogen mit Spannen < 1 % bzw. < 1 °C und sind daher als Mittelwerte in **Tab. 16** dargestellt. Obwohl die PU-Proben mittels DSC in einem breiten Temperaturbereich von -150 bis 250 °C gemessen wurden, konnte aufgrund von starken exothermen Überlagerungseffekten weder T_g noch T_m ermittelt werden.

Die TGA-Ergebnisse zeigten, dass sowohl hydrolytische Beanspruchung als auch Bewitterung Einfluss auf die Degradation des PU-Kleber hatten. Die Effekte waren allerdings bei der Bewitterung stärker ausgeprägt, was

sich hauptsächlich bei fRasen und rRasen in Reduzierungen des DTG_{max} von -9 °C bzw. -8 °C gezeigt hat, was auf Kettenbrüche hinweist. Da die PU-Verklebung nicht der direkten UV-Strahlung ausgesetzt war, ist dies vermutlich auf thermo-oxidative Reaktionen der Ether-Verbindung der Urethan-Gruppe mit Sauerstoffmolekülen, verstärkt durch die erhöhte Temperatur von 70 °C, zurückzuführen (Xie et al., 2019). Da beide Altrasen (aRasen¹/aRasen²) über eine Latex-Verklebung verfügten, kann keine Vergleichsprobe einer Realbeanspruchung angegeben werden.

Tab. 16: TGA-Ergebnisse des PU-Klebers. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH).

Probe	Beanspruchung	ML _{Wasser} in %	ML _{pyr1} in %	ML _{pyr2} in %	ML _{ox} in %	MR in %	DTG _{max} in °C	
							ML _{pyr1}	ML _{pyr2}
fRasen	U	0,6	13,0	28,6	25,1	32,8	294	383
	H	1,1	12,6	28,3	25,0	33,2	291	383
	B	0,6	11,5	28,9	26,2	32,8	285	383
	BM	0,6	12,3	28,2	26,1	32,8	288	383
	BMH	0,5	12,4	30,7	23,5	32,8	295	284
rRasen	U	0,4	13,4	28,5	25,0	32,7	292	384
	H	0,5	13,1	28,5	25,6	32,4	293	384
	B	1,1	14,3	24,3	27,5	32,8	284	383
	BM	0,3	12,9	27,8	20,4	38,7	289	383
	BMH	0,3	13,5	27,8	25,7	32,7	293	385
bRasen	U	0,5	18,8	34,1	21,8	24,8	302	391
	BMH	0,4	17,7	34,7	21,1	26,1	301	390

5.2 Schadstoff-Emissionen

Produktionsbedingt in den Komponenten von Kunststoffrasensystemen enthaltene Schadstoffe können während der Nutzungsphase durch Regenwasser mobilisiert und mit dem Sickerwasser zum Grundwasser transportiert werden (Kalbe et al., 2016, Kalbe et al., 2012). Die Eluate der Lysimeter-Experimente wurden daher besonders auch auf regulierte Schadstoffe und mit Eluaten der Einzelkomponenten verglichen. Da keine Grenzwerte für Sportböden zur Verfügung stehen, werden informativ die für Bodenmaterialien und Ersatzbaustoffe für den Grundwasserschutz abgeleiteten Grenzwerte bei einem Wasser/Feststoffverhältnis (W/F) von 2 L/kg herangezogen (BMUV, 2021, Kalbe et al., 2016). Es ist zu beachten, dass das deutsche Grenzwertsystem konzentrationsbasiert ist. Für den Vergleich mit den Grenzwerten bei einem W/F von 2 L/kg ist die Freisetzung von Stoffen bezogen auf die eingesetzte Materialmasse für alle Fraktionen, die bis zum W/F 2 L/kg entnommen werden zu berechnen und zu kumulieren. Wird dieser Wert mit 2 für da bewertungsrelevante W/F multipliziert erhält man die Konzentration beim W/F 2 L/kg (siehe DIN 19528). Bezogen auf die Masse der eingesetzten Komponenten im Oberbau der betrachteten Kunststoffrasensysteme wurden die MEL-Versuche bis zu einem Wasser/Feststoff-Verhältnis (W/F) von ca. 25 L/kg durchgeführt, das bei einer Nutzungsdauer von 15 Jahren erreicht wird. Im Vergleich zu den Feldbedingungen wurde die Berechnung dabei unter zeitraffenden Bedingungen durchgeführt.

5.2.1 Kunststoffrasen-Einzelkomponenten

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Insgesamt wurde auf die Summe von 16 umweltrelevanten PAK nach US EPA (Σ 16PAK) analysiert. Dabei ist zu beachten, dass Naphthalin in Grenzwerte für Eluate nicht einbezogen wird. Es ist auch nicht sinnvoll die Ergebnisse der Elution von Einzelkomponenten mit Grenzwerten zu vergleichen (Kalbe et al., 2016). Die Analysenergebnisse zeigten sehr gute Wiederholbarkeiten für die Parallelversuche, in **Tab. 17** sind die ermittelten PAK-Konzentrationen als Mittelwerte jeweils mit den PAK-spezifischen Bestimmungsgrenzen (*engl.* limit of quantification, LOQ) und der Blindwert-Vergleichsmessung dargestellt.

Die höchsten PAK-Konzentrationen ($\Sigma^{16}\text{PAK-EPA}$) wurden mit 3,6 $\mu\text{g/L}$ Eluat bei dem Rasen mit recycelten PE-Fasern (rRasen) detektiert, wobei es sich dabei zum Großteil um Naphthalin handelt, das u. A. in der Kunststoffproduktion Verwendung findet. Da die PAK-Konzentrationen des fossilbasierten Rasens (fRasen) mit ca. 1 $\mu\text{g/L}$ Eluat um ein Vielfaches geringer waren, ist davon auszugehen, dass dies auf den Recycling-Anteil im Rasen zurückgeht. Die PAK-Konzentrationen im fEPDM waren mit ca. 0,5 $\mu\text{g/L}$ Eluat gering und setzten sich ebenfalls hauptsächlich aus Naphthalin zusammen.

Tab. 17: Übersicht der Konzentrationen an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in den unbeanspruchten Kunststoffrasenproben. Dargestellt sind die Mittelwerte des fossilbasierten Rasens (fRasen) und EPDM-Granulat (fEPDM), Rasen mit Recyclinganteil (rRasen), Elastikschiicht (EL), Sand-Infills (S), ungebundenen Tragschicht aus Kies (UT) und der Blindwerte (BW). < LOQ meint, dass ein Signal detektierbar, aber unter der PAK-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ, limit of quantification) lag.

PAK	Konzentration in µg/L Eluat							
	LOQ	fRasen	rRasen	fEPDM	EL	S	UT	BW
Naphthalin	0,001	0,934	3,326	0,431	0,079	0,020	0,044	0,011
Acenaphthylen	0,001	< LOQ	0,017	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Acenaphten	0,001	0,024	0,135	0,017	0,024	0,048	0,004	0,002
Fluoren	0,001	0,009	0,034	0,009	0,014	0,086	0,003	0,001
Phenanthren	0,001	0,010	0,037	0,017	0,053	1,362	0,041	0,007
Anthracen	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	0,040	< LOQ	< LOQ
Fluoranthen	0,001	0,002	0,004	0,006	0,013	0,136	0,011	0,003
Pyren	0,001	0,001	0,002	0,002	0,027	0,045	0,010	0,002
Benz[a]anthracen	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	0,001	< LOQ	< LOQ
Chrysen	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	0,001	< LOQ	< LOQ
Benzo[b]fluoranthen	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Benzo[a]pyren	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Dibenz[a,h]anthracen	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Benzo[ghi]perylen	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Summe PAK	-	0,981	3,555	0,481	0,210	1,738	0,112	0,025

Metalle/Schwermetalle

Mit der ICP-OES wurden simultan die Kationen-Konzentrationen aus den Eluaten gemessen, darunter auch die regulierten (Schwer)metalle As, Ba, Pb, Cd, Cr, Co, Fe, Cu, Mn, Mo, Ni, Hg, Se, St, Tl, V und Zn. Ein direkter Vergleich der gemessenen Konzentrationen mit Grenzwerten der Ersatzbaustoffverordnung ist nicht sinnvoll, da das Einbau-Szenario im Gesamtsystem eines Kunststoffrasens zu berücksichtigen wäre. Zu beachten ist für die Versuche mit dem gesamten Aufbau der Rasensysteme in den Lysimetern, dass die mineralische Gesteinskörnung, die für die ungebundene Tragschicht verwendet wurde (UT) trotz der Vorbehandlung aus geogenen Quellen einen gewissen Anteil an As, Cr und Zn mitbringt. Auch der Kunststoffrasensand (S) weist in ähnlicher Größenordnung bereits etwas Zink auf. Diese Mengen sind üblich und nicht als kritisch anzusehen.

Ein Vergleich mit teilweise unveröffentlichten Ergebnissen aus Vorläuferprojekten der BAM zu Einzelkomponenten ergibt für die hier verwendeten Materialien Zusammensetzungen mit eher geringeren Konzentrationen an Kationen. Der hohe Zink-Wert im Eluat der elastischen Tragschicht (EL) ist ebenfalls vergleichbar, der auf den Anteil an SBR aus Altreifengranulaten zurückzuführen ist. Zinkoxid wird in der Produktion von SBR als Vulkanisationsbeschleuniger eingesetzt.

Tab. 18: Übersicht der Element-Konzentrationen in den unbeanspruchten Kunststoffrasenproben. Dargestellt sind die Mittelwerte (n= 2) des fossilbasierten fEPDM und fRasens, recycelten rRasens, Elastikschiicht (EL), Sand-Infill (S), ungebundenen Tragschiicht aus Kies (UT) und der Blindwerte (BW). < LOQ meint, dass ein Signal detektierbar, aber unter der Schwermetall-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ, limit of quantification) lag.

Element	LOQ in µg/L	Konzentration in µg/L Eluat						
		BW	fEPDM	fRasen	rRasen	S	EL	UT
Arsen	3,27	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	24,85
Barium	0,52	63,82	291,48	89,44	69,27	169,94	99,52	244,51
Blei	2,96	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Cadmium	0,87	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Chrom	0,93	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	41,41
Cobalt	4,71	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Eisen	0,08	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	0,10	< LOQ	0,14
Kupfer	10,81	< LOQ	< LOQ	14,71	< LOQ	10,68	< LOQ	< LOQ
Mangan	1,10	< LOQ	3,08	2,12	3,91	57,81	17,30	9,93
Molybdän	0,83	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Nickel	2,68	< LOQ	< LOQ	14,27	8,81	< LOQ	8,45	13,07
Quecksilber	2,56	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Selen	23,41	1,94	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Strontium	0,45	2,61	148,74	2,52	4,10	14,17	6,72	12,69
Thallium	11,44	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Vanadium	1,39	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Zink	16,37	3,30	6,56	< LOQ	< LOQ	52,26	1.540,95	54,87
Zinn	3,63	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ

5.2.2 Kunststoffrasen-Systeme

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

Abb. 10 zeigt die Freisetzung der Summe von ¹⁶PAK (Σ ¹⁶PAK) während der MEL-Experimente. Die Ergebnisse zeigten, dass alle PAK-Konzentrationen als Σ ¹⁶PAK bei W/F 2 L/kg unter den gesetzlichen Grenzwerten lagen, obwohl hier Naphthalin hinzugerechnet wurde. Aufgrund seines flüchtigen Charakters wurde Naphthalin bei der Ableitung von Grenzwerten für Eluate nicht berücksichtigt und es wird nur die Summe der restlichen 15 EPA-PAK herangezogen (Susset and Grathwohl, 2011). Bei allen untersuchten Kunststoffrasen-Systemen wird eine Abnahme der PAK-Freisetzung mit zunehmendem W/F beobachtet. Die höchste Anfangskonzentration

der $\Sigma^{16}\text{PAK}$ von 1,4 $\mu\text{g/L}$ wurde bei dem neuen Rasen mit recycelten Grasfasern (rRasen_neu) festgestellt, gefolgt von dem neuen fossilbasierten Rasen mit EPDM-Infill (fRasen_neu) mit 0,8 $\mu\text{g/L}$. Der Grenzwert für die beste Qualität von Recyclingmaterial (RC-1 nach BMUV (2021)) liegt für das W/F von 2 L/kg bei 4 $\mu\text{g/L}$ für $\Sigma^{15}\text{PAK}$ (ohne Naphthalin). Es ist also schon zu Beginn der Versuche bei sehr geringem W/F unterschritten, obwohl der Hauptanteil der PAK in den Eluaten vor allem bei den neuen Systemen aus Naphthalin bestand (siehe **Tab. 19**). Außerdem ist Acenaphthen, das in der Polymerherstellung verwendet wird, in messbaren Konzentrationen vorhanden, obwohl seine Wasserlöslichkeit relativ gering ist. In **Tab. 19** sind die Konzentrationen der einzelnen PAK sowie die $\Sigma^{16}\text{PAK}$ bei W/F 2 L/kg ergänzend zu **Abb. 10** aufgelistet. Es ist leicht zu erkennen, dass bereits ohne Abzug von Naphthalin alle Kunststoffrasensysteme den behelfsmäßigen Grenzwert von 4 $\mu\text{g/L}$ einhalten. Verglichen mit den Ergebnissen aus zwei Vorläufervorhaben, wo gesamte Aufbauten von Kunststoffrasensysteme mit Hilfe von Säulenversuchen (auf der Basis von fabrikneuen Materialien) untersucht wurden (Kalbe et al., 2016, Kalbe et al., 2012), liegen diese Ergebnisse auch in der gleichen Größenordnung. Ein System mit zum System fRasenneu vergleichbaren Komponenten (Rasen und EPDM-Füllung) ergab beispielsweise eine Konzentration von 0,43 $\mu\text{g/L}$ für $\Sigma^{16}\text{PAK}$ (0,30 $\mu\text{g/L}$ ohne Naphthalin) bei W/F 2 L/kg (rückgerechnet aus der kumulativen Freisetzung).

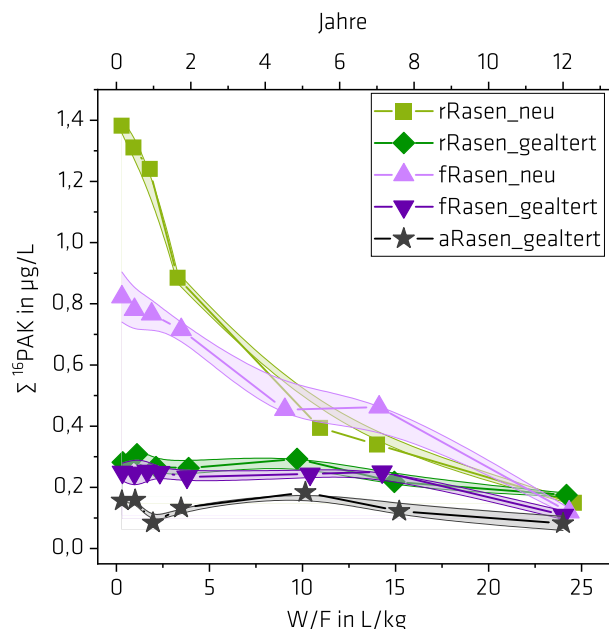


Abb. 10: PAK-Ergebnisse der MEL-Versuche mittels GC/MS. Dargestellt sind die mittleren $\Sigma^{16}\text{PAK}$ -Konzentrationen aller untersuchten Kunststoffrasensysteme bei unterschiedlichem Alterungszustand mit ihren Spannen in $\mu\text{g/L}$ über den Verlauf des Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnisses (W/F). Als Faustregel kann man davon ausgehen, dass ein W/F von 2 L/kg etwa einem Jahr Beregnung unter deutschen Bedingungen entspricht. Die $\Sigma^{16}\text{PAK}$ -Ergebnisse für beide in Echtzeit gealterten Rasen (aRasen¹/aRasen²) waren ähnlich und sind daher zusammen dargestellt.

Bis zum letzten W/F der MEL-Versuche (25 L/kg) sank die Konzentration der $\Sigma^{16}\text{PAK}$ auf ein vergleichbar niedriges Niveau zwischen 0,1 und 0,2 $\mu\text{g/L}$ für alle untersuchten Kunststoffrasensysteme, da die PAK mit der besseren Wasserlöslichkeit nahezu erschöpft sind. Es ist zu erwarten, dass die PAK-Freisetzung aufgrund der sehr geringen Wasserlöslichkeit der Substanzen mit größeren Molekülen (höhere Anzahl aromatischer Ringe) auch im Folgenden noch auf einem ähnlich niedrigen Niveau verbleibt. Die Alterung der Rasenkomponenten führte zu einer geringeren Freisetzung von PAK in den MEL-Versuchen, da es im Laufe der Alterung bereits zu einem Verlust von PAK kam. Die Konzentrationswerte in den neuen Kunststoffrasensystemen können als Höchstwerte für PAK-Emissionen angesehen werden. Auffallend ist der etwas höhere Wert für die PAK-Freisetzung aus dem rRasen (Zukunftsszenario), was vermutlich aus dem Recycling-Anteil herrührt. Dabei wird der Hauptanteil durch das nicht zu bewertende Naphthalin verursacht

Für Bodenmaterial steht ein Grenzwert für Benzo-a-pyren von 0,2 $\mu\text{g/L}$ zur Verfügung (BMUV, 2021) der sich auf die am stärksten krebserzeugende Einzelsubstanz der 16 EPA-PAK bezieht und für die Eluate aller untersuchten Kunststoffrasensysteme bei einem W/F 2 L/kg eingehalten wurde und sogar bereits unter dem LOQ lag.

Tab. 19: PAK-Ergebnisse der Kunststoffrasen-Szenarien bei einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2 L/kg. Dargestellt sind die gemittelten Konzentrationen (n= 2) des Vergangenheits- (aRasen¹/aRasen²), Gegenwarts- (fRasen) und Zukunfts-Szenarios (rRasen) jeweils im ungealterten (neu) un beschleunigt gealterten Zustand (gealtert) sowie die Blindwerte (BW). < LOQ bedeutet, dass das Signal unterhalb der PAK-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ) lag.

PAK	LOQ in µg/L	BW In µg/L	Konzentration in µg/L Eluat bei W/F 2 L/kg					
			Vergangenheit: aRasen		Gegenwart: fRasen		Zukunft: rRasen	
			aRasen ¹	aRasen ²	neu	gealtert	neu	gealtert
Naphthalin	0,001	0,051	0,097	0,021	0,677	0,095	1,054	0,098
Acenaphthylen	0,001	0,006	0,022	0,004	0,026	0,027	0,029	0,023
Acenaphten	0,001	0,003	0,005	0,004	0,034	0,019	0,141	0,026
Fluoren	0,001	< LOQ	0,003	0,003	0,012	0,012	0,023	0,016
Phenantren	0,001	0,003	0,016	0,015	0,017	0,068	0,045	0,113
Anthracen	0,001	< LOQ	0,001	0,001	0,001	0,004	0,003	0,006
Fluoranthen	0,001	0,001	0,004	0,007	0,005	0,012	0,006	0,015
Pyren	0,001	0,001	0,006	0,012	0,006	0,009	0,009	0,010
Benz[a]anthracen	0,001	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Chrysen	0,001	0,002	< LOQ	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Benzo[b]fluoranthen	0,001	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Benzo[k]fluoranthen	0,001	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Benzo[a]pyren	0,001	0,001	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Dibenz[a,h]anthracen	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Benzo[ghi]perylen	0,002	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Summe ¹⁶PAK	-	0,071	0,154	0,164	0,781	0,247	1,311	0,308

Metalle/Schwermetalle

Die Freisetzung von (Schwer)metallen aus Sickerwasser von Kunststoffrasen wurde in früheren Studien berichtet (Bocca et al., 2009, Menichini et al., 2011). Die strengsten Grenzwerte der deutschen Verordnung (BMUV, 2021), die bei W/F 2 L/kg für Bodenmaterialien eingehalten werden müssen (Qualität BM-1), sind 210 µg/L für Zink, 41 µg/L für Kupfer, 31 µg/L für Nickel und 19 µg/L für Chrom. Für Recyclingmaterialien (Qualität RC-1) sind die Grenzwerte weniger streng: 110 µg/L für Kupfer, 150 µg/L für Chrom und keine Grenzwerte für Zink und Nickel. **Abb. 11** veranschaulicht die Ergebnisse für diese Schwermetalle für alle untersuchten Kunststoffrasen-Szenarien. Sie zeigt, dass es bei W/F 2 L/kg keine Überschreitungen der strengsten deutschen Grenzwerte gab. Lediglich die Anfangskonzentrationen für Nickel waren etwas höher, was die leicht mobilisierbare Fraktion von Nickel repräsentiert. Dies könnte auf eine Oberflächenabwaschung (sog. „First Flush“) zurückzuführen sein, insbesondere im Fall des neuen Rasens, der recycelte Grasfasern enthält (rRasen_neu).

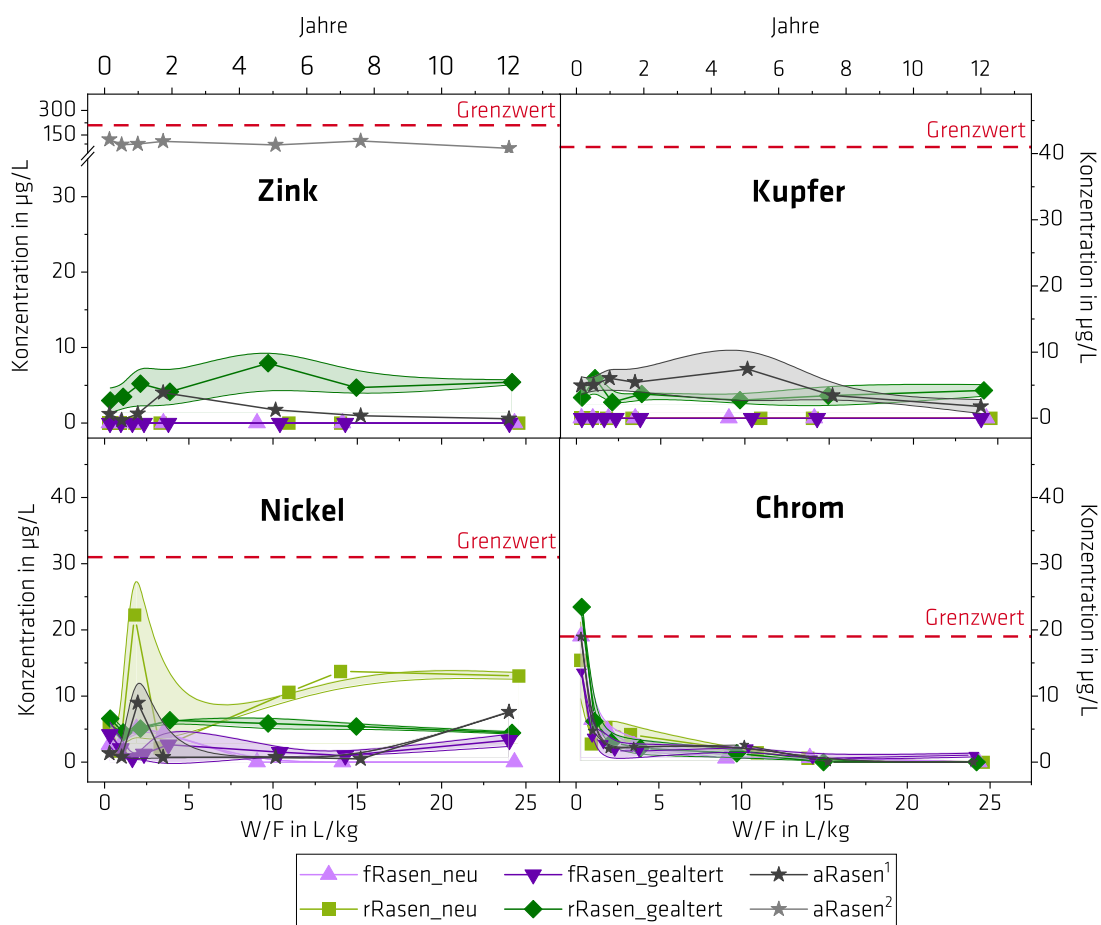


Abb. 11: Schwermetallergebnisse der MEL-Experimente mit ICP-OES. Dargestellt sind die gemittelten Metallkonzentrationen der untersuchten Kunststoffrasenszenarien ($n=2$) mit ihren Spannen in unterschiedlichen Alterungszustände im Verlauf des untersuchten Wasser-Feststoff-Verhältnisses (W/F). Als Faustregel kann man davon ausgehen, dass ein W/F von 2 L/kg etwa einem Jahr Niederschlag unter deutschen Bedingungen entspricht. Zusätzlich stellen die rot gestrichelten Linien die jeweiligen Grenzwerte für Bodenmaterialien bei W/F 2 L/kg dar (BMUV, 2021). Da nur die Zinkkonzentrationen der beiden in Echtzeit gealterten Rasen (aRasen¹/aRasen²) stark variierten, werden ihre Zink-Ergebnisse einzeln dargestellt. Bei Kupfer, Nickel und Chrom waren die Werte ähnlich und werden daher gemeinsam als Mittelwert angegeben.

Die Zinkkonzentrationen von in Echtzeit gealtertem Rasen (aRasen²) lagen auf einem höheren Niveau (bis zu 123 µg/L) im Vergleich zu den Werten der anderen Rasensysteme. Dies deutet darauf hin, dass bei früheren Produktionen von Kunststoffrasenkomponenten, hier höchstwahrscheinlich der TPE-Gummifüllung, mehr Zink-oxid verwendet wurde, das der Vulkanisation des Gummis dient. Dies wird auch durch die Tatsache

unterstrichen, dass in den Eluaten der neuen, ungealterten Rasensysteme kein Zink gefunden wurde. Zink wird hauptsächlich aus Altreifen freigesetzt, die zu SBR-Granulat verarbeitet und in der elastischen Tragschicht verwendet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Qualität der Reifen schwankten die Zinkkonzentrationen auch in früheren Studien stark (Gomes et al., 2021, Capolupo et al., 2020, Kalbe et al., 2013). Die Alterung hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Chrom-Freisetzung in den MEL-Versuchen. Bei Zink, Kupfer und Nickel führte die Alterung jedoch zu einer etwas höheren Freisetzung, wie in **Abb. 11** zu sehen ist. Für andere Metalle wurden keine kritischen Konzentrationen in den Eluaten gemessen. Alle Ergebnisse zu den Element-Emissionen finden sich im Detail in **Tab. 20**.

Auf die Messung der Eluate mittels ICP-MS wurde verzichtet, da die LOQ der regulierten Metalle unterhalb der Grenzwerte lagen. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Vorläufervorhaben (Kalbe et al., 2016, Kalbe et al., 2012) lagen die Werte für die regulierten Metalle hier eher niedriger. Die geringere Freisetzung könnte auf die den Feldbedingungen nähere Skalierung und Berechnung zurückzuführen sein.

Tab. 20: Element-Konzentrationen der Kunststoffrasenszenarien bei einem Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F) von 2 L/kg. Dargestellt sind die gemittelten Konzentrationen (n= 2) des Vergangenheits- (aRasen¹/aRasen²), Gegenwarts- (fRasen) und Zukunfts-Szenarios (rRasen) jeweils im ungealterten (neu) und beschleunigt gealterten Zustand (gealtert) sowie die Blindwerte (BW). < LOQ bedeutet, dass das Signal unterhalb der Element-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ) lag.

Element	LOQ in µg/L	BW in µg/L	Konzentration in µg/L Eluat bei W/F 2 L/kg					
			Vergangenheit: aRasen		Gegenwart: fRasen		Zukunft: rRasen	
			aRasen ¹	aRasen ²	neu	gealtert	neu	gealtert
Arsen	3,27	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Barium	0,52	< LOQ	8,79	4,74	4,85	12,46	1,51	3,97
Blei	2,96	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Cadmium	0,87	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Chrom	0,93	< LOQ	4,58	4,91	6,40	3,83	2,76	6,18
Cobalt	4,71	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Eisen	0,08	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Kupfer	10,81	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Mangan	1,10	< LOQ	2,37	5,06	3,39	2,55	1,38	3,28
Molybdän	0,83	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Nickel	2,68	20,46	< LOQ	< LOQ	2,78	< LOQ	< LOQ	4,49
Quecksilber	2,56	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Selen	23,41	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Strontium	0,45	1,86	24,73	10,25	16,07	18,34	3,72	6,77
Thallium	11,44	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Vanadium	1,39	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Zink	16,37	< LOQ	< LOQ	90,18	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Zinn	3,63	< LOQ	3,69	4,15	< LOQ	< LOQ	< LOQ	3,63

5.3 Mikroplastik-Emissionen

5.3.1 Mikroplastik-Freisetzungspotentiale

Die Ergebnisse von Nasssiebungen mit einer Filterkaskade zeigten, dass das neue, ungealterte EPDM-Granulat ausschließlich aus Partikeln < 5 mm besteht und somit als (großes) MP gilt, das unter die neue EU-Verordnung fällt (European Commission, 2023b). Der analytische Fokus liegt auf der Größenfraktion 5 - 50 µm, da diese Partikel vom Körper, z. B. über die Luft und die Atemwege, aufgenommen werden können und somit potenziell gesundheitsschädlich sein können. Zur Ermittlung des maximal möglichen MP-Freisetzungspotentials wurden Schüttelversuche an neuen, ungealterten Kunststoffrasenkomponenten durchgeführt und mittels TED-GC/MS analysiert.

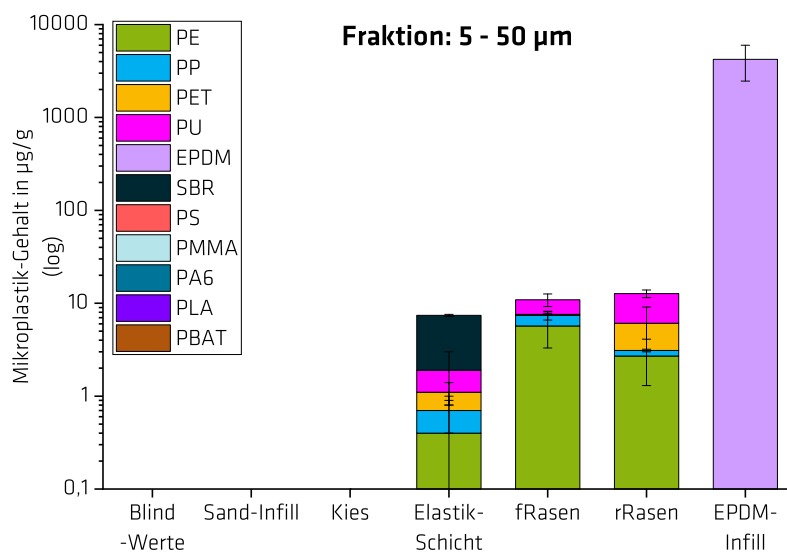


Abb. 12: Mikroplastik-Ergebnisse der Schüttelversuche. Dargestellt sind die MP-Gehalte der Fraktion 5 - 50 µm (log) von neuen, ungealterten Kunststoffrasen-Komponenten.

Die Ergebnisse der maximalen MP-Gehalte der Fraktion 5 - 50 µm zeigten, dass die höchsten MP-Gehalte mit 1.761,5 - 5.784,2 µg/g für EPDM-Granulat ermittelt wurden (siehe **Abb. 12**), was etwa 0,4 % des EPDM-Granulats entspricht. Die Blindwerte und das Sand-Infill waren MP-frei. Für den Kunststoffrasen mit recycelten Grasfasern wurden Gesamt-MP-Gehalte von 7,1 - 18,3 µg/g ermittelt: 1,3 - 4,1 µg/g aus den PE-Grasfasern, 0,4 - 0,5 µg/g aus dem PP-Träger, 0,0 - 5,9 µg/g aus dem PET-Wickelgarn. Der relativ hohe PU-Klebstoffgehalt von 5,4 - 7,8 µg/g wird als Folge des Rasenschnitts für den Schüttelversuch angenommen und daher in der folgenden Hochrechnung nicht berücksichtigt.

Für einen neu verlegten Sportplatz (7.000 m²) entsprechen die Ergebnisse der Emission von insgesamt ca. 100 g MP im gesundheitsrelevanten Partikelgrößenbereich von 5 - 50 µm aus dem recycelten Rasen und ca. 140 kg aus der EPDM-Infill (bei einer Standard-Einstreumenge von 5 kg/m²). Die maximal möglichen MP-Emissionen aus ungealterten Proben reichten daher von max. 20 µg/g für Kunststoffrasen bis zu ca. 6.000 µg/g für EPDM-Gummi-Granulat. Die Massenunterschiede können durch drei Aspekte erklärt werden: i) EPDM wird bereits in Partikelform hergestellt, ii) wobei ein einziges großes Partikel erheblich zum MP-Massengehalt beitragen kann und iii) dass die MP-Emissionen von Kunststoffrasenkomponenten hauptsächlich durch Abrieb verursacht werden, der in diesem Szenario minimal war. Es kann davon ausgegangen werden, dass die realen MP-Emissionen von Kunststoffrasenplätzen aufgrund von Witterungseinflüssen und mechanischer Beanspruchung höchstwahrscheinlich höher liegen werden.

Tab. 21: Mikroplastik-Ergebnisse der Schüttelversuche der unbeanspruchten Kunststoffrasenkomponenten zur Ermittlung des Mikroplastik-Freisetzungspotenzials der Fraktion 5 – 50 µm. Dargestellt sind die Mittelwerte der Dreifachbestimmungen. Ein Bindestrich bedeutet, dass kein Mikroplastik detektiert wurde.

Komponente	Probe	Mikroplastik-Gehalte (Fraktion: 5- 50 µm) in µg/g						Gesamt
		EPDM	PE	PP	PET	PU	SBR	
EPDM-Infill	fEPDM	4.233,2	-	-	-	-	-	4.233,2
Kunststoffrasen	fRasen	-	5,7	1,7	0,2	3,3	-	10,9
	rRasen	-	2,7	0,4	3,0	6,6	-	12,7
Elastikschiicht	EL	-	0,4	0,3	0,4	0,8	5,5	7,4
Sand-Infill	S	-	-	-	-	-	-	0,0
Kies	UT	-	-	-	-	-	-	0,0

5.3.2 Luft-Emissionen

Die Ergebnisse der fraktionierten Siebung des Infills von rRasen (Sand: 100 %) und fRasen (Sand: 78,5 %, EPDM: 21,5 %) nach der mechanischen Beanspruchung im Liport-Tester sind in **Abb. 13** dargestellt. Es zeigte sich, dass bei fRasen weniger kleine Partikel (< 500 µm) entstanden sind als bei rRasen, was vermutlich an der Abrasionsschutz-Wirkung vom Gummi-Granulat zurückzuführen ist. Zudem sind bei fRasen keine oder mit der Trockensiebung nicht erfassbare Partikel in der Fraktion 0 - 50 µm entstanden, die Feinstaub-Partikel < 10 µm umfasst, die als besonders gesundheitsrelevant gilt (WHO, 2021). Für eine Einschätzung, wie hoch der Polymer-Anteil in der Feinfraktion (0 - 500 µm) ist, wurden ergänzende TGA-Messungen für das Infill von fRasen durchgeführt. Die TGA-Ergebnisse ergaben, dass zwei Masseverluststufen detektiert wurden, die wahrscheinlich überwiegend den Masseverluststufen von EPDM zugeordnet werden können. Der anorganische Masseresst betrug $55,9 \pm 6,0$ % und der pyrolysierbare Organik-Anteil bzw. der Polymer-Gehalt in der Infill-Mischung ca. ein Drittel bzw. $33,9 \pm 4,7$ %.

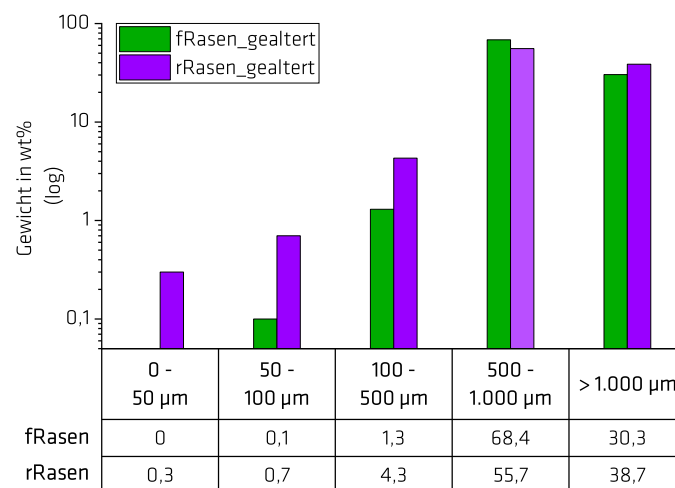


Abb. 13: Ergebnis der Siebung nach der mechanischen Beanspruchung der Lisport-Prüfung.

In grober Näherung beträgt der Polymer-Anteil in der Feinfraktion (0 - 500 µm) daher ca. 0,5 % nach der beschleunigten Alterung. Auf die bei fRasen verwendete Infill-Mischung von $19,5 \text{ kg/m}^2$ (Sand: $15,3 \text{ kg/m}^2$ + EPDM: $4,2 \text{ kg/m}^2$) entspräche dies extrapoliert für ein Standard-Großspielfeld von 7.000 m^2 auf 15 Jahre Nutzungsjahre einem Polymer-Gehalt von $682,5 \text{ kg}$ an klein-partikulärem MP (0 - 500 µm):

$$\text{Polymer-Gehalt im fRasen-Infill (0-500 } \mu\text{m)}: \frac{19,5 \text{ kg/m}^2 * 0,5 \%}{100 \%} = 0,0975 \text{ kg/m}^2 * 7.000 \text{ m}^2 = 482,5 \text{ kg}$$

Für eine Berechnung bzw. grobe Einschätzung, wie viel MP davon in die Luft emittiert, fehlen bisher Modelle und Datengrundlagen (Eberhard et al., 2024), weshalb hier eine Hochrechnung nicht zulässig ist. Gründe hierfür sind, dass das Verhalten von Partikeln sehr komplex ist durch die unter Feldbedingungen parallel stattfindenden Prozesse über die lange Nutzungsdauer von 12-15 Jahren: z. B. durch Witterung (Wind, Regen, Schnee), Niederhaltung durch Sand und Feuchte, Aggregation im Rasen oder durch Ver- und Aufwirbelungen während des Spielens oder Reinigungsmaßnahmen. Für eine realitätsnahe Einschätzung der Luft-Emissionen können nur vor Ort-Messungen zuverlässige Daten liefern, was aber im verwendeten Setup unter Laborbedingungen nicht umsetzbar und nicht Teil des Projektes war.

5.3.3 Mikroplastik-Austräge über den Boden-Grundwasser-Pfad

Die im folgenden Kapitel beschriebenen Ergebnisse zeigen jedoch, wie viel des freigesetzten MP mit dem Sickerwasser durch den Boden transportiert wird. **Abb. 14** zeigt die Summe der mittleren MP-Ergebnisse (log) über das gesamte Berechnungsvolumen, die im Detail in **Tab. 22** zu finden sind. Die höchsten MP-Gehalte wurden in beiden in Echtzeit gealterten aRasen¹/aRasen² detektiert, die das Vergangenheits-Szenario repräsentieren (ΣMP : 136,4 - 252,5 mg/m²). Die Hauptemissionsquellen waren das synthetische Gummi-Granulat ($\Sigma\text{EPDM/TPE}$: 42,2 - 192,5 mg/m²) und die Grasfasern (ΣPE : 21,7 - 38,6 mg/m²). Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei einem Kunststoffrasen die Außenbeanspruchungen durch Witterung (z. B. durch UV-Strahlung) und mechanische Beanspruchung (z. B. durch Sand-Infill, Fußballschuh-Stollen, Kunststoffrasenpflegemaschinen) vor allem auf das Gummi-Granulat und die Grasfasern einwirken und zu Materialfragmentierungen führen.

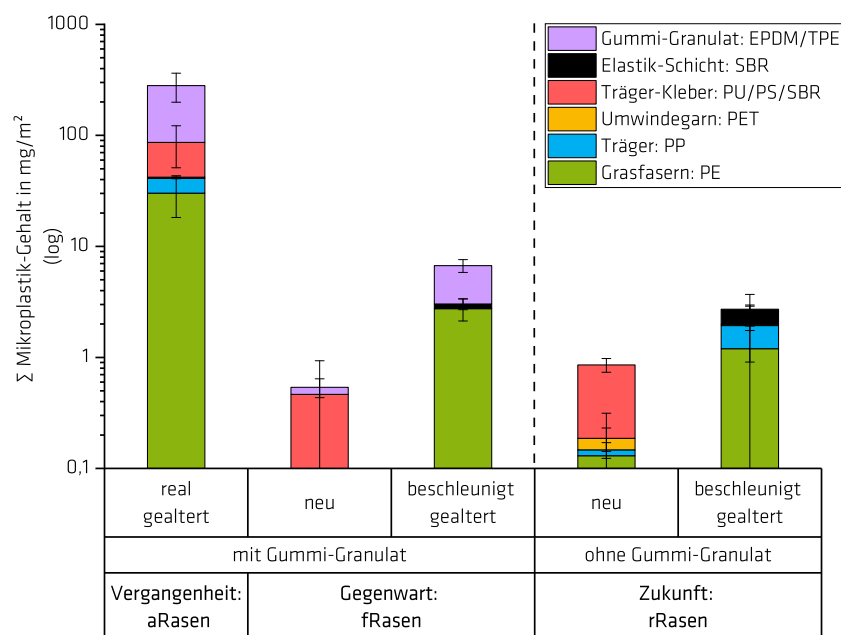


Abb. 14: Mikroplastik-Masse-Ergebnisse der Labor-Untersuchungen mittels Mikroplastik Eluat Lysimeter-Anlage und TED-GC/MS. Dargestellt sind die mittleren Summen der Masse-Gehalte der Doppelbestimmungen mit ihren Spannen (log), unterteilt in Kunststoffrasen-Szenarien mit/ohne synthetische Gummi-Granulat und Alterungsstatus. Die Polymer-Abkürzungen sind wie folgt: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PU), Polystyrol (PS), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), thermoplastisches Elastomer (TPE).

Dahingegen wurden in den beiden in Echtzeit gealterten aRasen nur vergleichsweise geringe PP-Gehalte durch das Trägermaterial detektiert (Σ PP: 1,9 - 2,3 mg/m²). Das deutet darauf hin, dass der Träger durch das Gummi-Granulat vor der mechanischen Beanspruchung geschützt ist, insbesondere vor den Abriebeffekten durch das Sand-Infill. Es wurden zudem hohe Kleber-Gehalte von 69,6 mg/m² in aRasen¹ und 19,5 mg/m² in aRasen² gefunden. Dies ist wahrscheinlich auf die Platzierung der Proben im MEL-Glaszylinder zurückzuführen, da i) der Kleber bereits spröde war und ii) das Ausschneiden der runden 20 cm-Rasenproben zu einem Ausfransen der Kanten und damit zu einer erhöhten MP-Bildung geführt haben könnte. Es ist außerdem wichtig zu beachten, dass der Kleber von aRasen² aus SBR-Basis bestand und daher die gleichen thermischen Zersetzungsprodukte wie SBR aufwies, sodass der Kleber analytisch nicht von der SBR-Elastikschicht unterscheidbar war. Da der Kleber jedoch sehr spröde war, kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil des nachgewiesenen SBR den MP-Emissionen aus dem Kleber zugeordnet werden kann.

Die TED-GC/MS-Ergebnisse des Gegenwarts-Szenarios zeigten für den neuen fRasen minimale MP-Gesamtemissionen (Σ MP: 0,1 - 0,9 mg/m²). Dies war hauptsächlich auf den PU-Trägerkleber zurückzuführen, wahrscheinlich auf beim Rasen-Zuschnitt entstandene Partikel. Es wurden nur minimale Emissionen aus der Gummi-Granulat (Σ EPDM: 0 - 0,2 mg/m²) detektiert. Hierbei handelte es sich wahrscheinlich um kleinere Partikel, die während der Produktion oder des Transports entstanden sind, da das Granulat mit einer Zielgröße von > 1 mm produziert wird (Abb. 2c+d, S. 16). Die beschleunigte Alterung von fRasen führte zu einem MP-Anstieg um etwa das Zehnfache und damit zu MP-Gesamtemissionen von 5,4 - 8,0 mg/m², hauptsächlich von dem Gummi-Granulat (Σ EPDM: 3,1 - 4,3 mg/m²) und den Grasfasern (Σ PE: 2,3 - 3,2 mg/m²). Darüber hinaus wurden geringe Emissionen aus dem PP-Träger und der SBR-Elastikschicht detektiert.

Das Zukunfts-Szenario hatte insgesamt die niedrigsten MP-Emissionen aller untersuchten Kunststoffrasen-Szenarien. Wie auch bei dem Gegenwarts-Szenario beobachtet, wies der neue rRasen nur geringe Gesamt-MP-Emissionen auf (Σ MP: 0,8 - 0,9 mg/m²), hauptsächlich aus dem Kleber (Σ PU: 0,6 - 0,8 mg/m²), was wahrscheinlich ebenfalls auf den Rasen-Zuschnitt zurückzuführen ist. Nach der beschleunigten Alterung stiegen die MP-Emissionen um etwa das Fünffache auf einen Gesamt-MP-Gehalt von 0,2 - 5,3 mg/m². Die Hauptkomponenten verantwortlich für die MP-Emissionen waren die Grasfasern (Σ PE: 0 - 2,4 mg/m²), das Trägermaterial (Σ PP: 0 - 1,5 mg/m²) und die Elastikschicht (Σ SBR: 0 - 1,4 mg/m²).

Tab. 22: Zusammenfassung der Mikroplastik-Emissionen aller untersuchten Kunststoffrasen-Szenarien unterschiedlicher Alterungszustände, ausgedrückt in mg/m². Da Doppelbestimmungen durchgeführt wurden, sind die Polymermassen-Gehalte mit ihren Spannen angegeben. Ein Bindestrich bedeutet, dass kein MP detektiert wurde.

Polymer Typ	Kunststoffrasen-Komponente	Mikroplastik-Gehalte der Kunststoffrasen-Szenarien in mg/m ²					
		Vergangenheit: aRasen		Gegenwart: fRasen		Zukunft: rRasen	
		real gealtert aRasen ¹	real gealtert aRasen ²	neu	beschleunigt gealtert	neu	beschleunigt gealtert
EPDM	Gummi-Granulat	42,15	-	0 - 0,15	3,06 - 4,32	-	-
TPE	Gummi-Granulat	-	192,54	-	-	-	-
PE	Grasfasern	21,70	38,65	-	2,31 - 3,18	0 - 0,26	0 - 2,39
PP	Träger	2,28	1,89	-	0,04 - 0,05	0 - 0,03	0,01 - 1,46
PET	Umwindegarn	-	-	-	-	0,01 - 0,07	0 - 0,11
SBR	Elastikschicht/Kleber	0,67	19,47	-	0 - 0,48	-	0 - 1,42
PS	Kleber	69,58	-	-	-	-	-
PU	Kleber	-	-	0,13 - 0,79	-	0,58 - 0,76	-
ΣMP in mg/m²		136,38	252,54	0,13 - 0,94	5,41 - 8,02	0,83 - 0,89	0,16 - 5,28

Mikroplastik-Emissionen pro Kunststoffrasensportplatz

Alle MP-Ergebnisse sind in mg/m² ausgedrückt, um eine Datenbasis zu bilden, die eine Extrapolation der MP-Emissionen pro Kunststoffrasenplatz beliebiger Größe ermöglicht. Das Ziel der Extrapolation ist die Einschätzung einer groben Größenordnung von maximalen MP-Emissionen. Für einen gealterten Standard-Kunststoffrasensportplatz (7.000 m²) entsprachen die MP-Emissionen während der Nutzungsdauer von ca. 15 Jahren für das Vergangenheits-Szenario 954,7 - 1.767,8 g, für das Gegenwarts-Szenario 3,8 - 56,1 g und für das Zukunfts-Szenario 1,1 - 37,0 g.

5.3.4 Vergleich mit Realsportplatz-Ergebnissen

Realproben aus Sittensen

Für eine zukünftige Vergleichbarkeit der Labor- mit den Feld-Ergebnissen von MiMiK aus Sittensen (bRasen) sind die MP-Gehalte der MEL-Experimente in µg/L angegeben. Die Ergebnisse ergaben Gesamt-MP-Gehalte von 0,08 - 0,14 µg/L, was sich aus Gummi-Granulat (EPDM: 0,01- 0,05 µg/L), Elastikschicht (SBR: 0,01- 0,05 µg/L), Grasfasern (PE: 0 - 0,04 µg/L) und Umwindgarn (PET: 0 - 0,04 µg/L) zusammensetzte. Damit sind diese Werte in der Tendenz leicht höher als die Ergebnisse von fabriktneuen rRasen und fRasen (ΣMP: < 0,1 µg/L), was sich damit deckt, dass bRasen nur auf drei Jahre beschleunigt gealtert wurde.

Kreis Viersen

Da die MEL-Versuche dem Kunststoffrasen-Aufbau bis zum Baugrund bzw. Unterbau simuliert haben, entsprechen diese Labor-Ergebnisse der MP-Fracht bis zu ca. 30 cm Bodentiefe. Danach wird das Sickerwasser je nach Sportplatz entweder durch ein Drainagesystem in eine Kläranlage oder Oberflächengewässer geleitet oder es versickert durch den Boden ins Grundwasser. Wie hoch die Mikroplastik-Belastung im Grundwasser bei 4 m ist, zeigten die Realsportplatz-Versuche vom Kreis Viersen. Diese ergaben, dass erstens in den Anstrom-Messstellen entweder keine (Sportplatz-1) oder nur geringe MP-Austräge aus dem Kunststoffrasen (Sportplatz-2, PP: 0,18 Partikel/L, PS: 0,16 Partikel/L) detektiert wurden. Zusätzlich wurden höhere PVC-Gehalte von 8,93 Partikel/L detektiert, was wahrscheinlich auf einen Defekt von der aus PVC-bestehenden Messstelle hinweist. Zweitens wurde in den Abstrom-Messstellen beider Sportplätze kein MP detektiert, das dem Kunststoffrasen zugeordnet werden konnte. Da der Abstrom durch das Sportplatz-Sickerwasser beeinflusst wird, gibt es folglich keine Hinweise, dass durch die Sportplätze MP-Partikel ≥ 5 µm ins Grundwasser ausgetragen werden. Dies könnte einerseits daran liegen, dass der 9 m Flurabstand zwischen Rigole und Grundwasser beim Sportplatz-1 zu groß war, um Partikel ins Grundwasser einzutragen. Des Weiteren verfügen beide Sportplätze über eine sehr feinkörnige Bodenbeschaffenheit im Baugrund, die Partikeln gut zurückhalten können. Zudem wird in den Rigolen Filterkies eingesetzt, der regelmäßig aufgereinigt wird, was eine effektive Maßnahme zum MP-Rückhalt darstellen könnte.

Bei beiden Projekten wurden unterschiedliche Versuchsaufbauten mit komplementären Analysemethoden verwendet, sodass die Ergebnisse nicht absolut verglichen werden können. Allerdings ermöglichen sie einen Einblick in das MP-Transportverhalten mit dem Sickerwasser von Kunststoffrasenplätzen ins Grundwasser. Zusammengefasst weisen die Ergebnisse darauf hin, dass MP hauptsächlich infolge der Alterung aus den Grasfasern und Gummi-Infill freigesetzt wird. Das MP wird dann vermutlich aufgrund von Filtrationseffekten im Baugrund immobilisiert, sodass es in den Proben der Grundwasser-Messstellen der untersuchten Sportplätze nicht mehr detektierbar war, wohingegen bei den MEL-Versuchen unter der grobkörnigen ungebundenen Tragschicht von 30 cm Mächtigkeit (Frostschutzschicht) messbare Austräge gab. Das deutet darauf hin, dass der MP-Austrag über den Boden-Grundwasser-Pfad als weniger relevant einzuschätzen ist als die anderen Emissionspfade, z. B. der Luft-Pfad, was aktuelle Forschungshypothesen bestätigt (Bertling et al., 2021). Jedoch wurden in beiden Untersuchungsansätzen nur Emissionen bis zu einer Partikelgröße von 5 µm analytisch erfasst. Es ist daher unklar, wie hoch die MP-Emissionen von kleinen Mikro- (5 - 1 µm) und Nanopartikeln (1.000 - 1 nm) sind, die gesundheitlich als besonders relevant gelten und ökotoxikologische Auswirkungen haben können (Hua et al., 2024, Krause et al., 2024). Insgesamt ist der Transport von Mikroplastik im Boden bisher aufgrund der Komplexität der physikalischen Vorgänge schwer zu beschreiben und noch nicht vollständig

verstanden. Es gibt Hinweise auf die Rückhaltung von Mikroplastik in Böden besonders in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Bodens, der hydrodynamischen Bedingungen sowie der Dichte und Partikelgröße der Mikroplastik (Dong et al., 2022, Li et al., 2024, Rieckhof et al., 2024). Es sind aber mehr empirische Daten erforderlich, um eine Parametrisierung für die Verwendung in Modellen zu ermöglichen (Yang and Tang, 2024).

5.4 Herausforderung Massenbilanzierung

Die Erstellung einer Gesamtmassenbilanz für MP-Emissionen aus Kunststoffrasenplätzen ist sehr komplex, da die individuellen standortspezifischen Bedingungen von Platz zu Platz sehr unterschiedlich sein können. Maßgeblich hierbei sind folgende Parameter:

- **Klimazone** (Nordische Länder zeigen einen viel höheren Austrag bedingt durch Schnee)
- **Generation des Kunststoffrasens** (3G-System zeigen ein reduziertes Verhalten bzgl. Austrag)
- **Bauliche Installationen** (mit/ohne Drainage-System, Art und Menge der Verfüllung)

Aufgrund der Signifikanz der in diesem Bericht dargestellten Thematik hat es bereits in der Vergangenheit diverse Untersuchungen und Handlungsempfehlungen von unterschiedlichsten Organisationen gegeben, überwiegend mit Fokus auf Gummi-Granulaten (Patrick et al., 2024, Bertling et al., 2021). Die identifizierten Hauptaustragungspfade für Gummi-Granulate von einem Spielfeld in die Umwelt werden als folgend bestimmt (DFB, 2021):

1. **Pflege und Wartung:** z. B. Austrag durch Wartungsgerätschaften
2. **Spieler*Innen und Nutzung:** z. B. Austrag mit Kleidung und Schuhen
3. **Umwelteinflüsse:** z. B. Austrag durch Regen oder Wind

Ursprünglich war ein Ziel dieser Arbeit mittels einer Massenbilanzierung eine Einschätzung der minimalen und maximalen Gesamt-Emissionen in kg/m^2 am Beispiel eines Standard-Kunststoffrasenplatz von 7.000 m^2 über die Gesamtnutzungsdauer von 15 Jahren zu ermöglichen. Intensive Studien der aktuellen Literatur- und Industriedaten haben jedoch gezeigt, dass dies aufgrund der ungenügenden Datenlage zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht möglich ist. Konkret sind die größten Herausforderungen für das Aufstellen einer realitätsnahen Massenbilanzierung i) die ungenügende Datenbasis für die verschiedenen Emissionspfade sowie Sportplatz-Konfigurationen, ii) eine fehlende Standardisierung und Harmonisierung der Probenahme und Mikroplastik-Analytik sowie iii) der Mangel an Peer-Review-Literatur. Nach derzeitigen Wissensstand gibt es momentan fast ausschließlich Graue Literatur, wie Reports oder Berichte (z. B. Magnusson and Mácsik (2020), Regnell (2019), NORCE (2018), Forschungskampagnen (2017)) oder Universitätsarbeiten (z. B. Sund (2020) Lundström (2019)), deren Fokus zudem überwiegend auf den Austrägen des Gummi-Granulats liegt und weitere Rasen-Komponenten und deren Abrieb, wie z. B. von Gras-Fasern, nicht berücksichtigt. Daher ist nachzeitigem Kenntnisstand aufgrund der fehlenden Datengrundlagen eine Massenbilanz für unverfüllte Kunststoffrasenplätze ohne Gummigranulat nicht möglich. Für verfüllte Kunststoffrasenplätze wäre eine Massenbilanzierung mit zu großen Unsicherheiten in den Schätzungen (z. T. über mehrere Größenordnungen) verbunden, sodass keine wissenschaftlich belastbare Massenbilanzierung aufgestellt werden kann.

5.5 Minimierungsmaßnahmen

Auf Basis der im vorherigen Kapitel genannten Austragungspfade können die im Folgenden dargestellten Minimierungsmaßnahmen eine erhebliche Reduzierung ermöglichen (FFL, 2022, Magnusson and Mácsik, 2020):

Austrag durch Pflege und Wartung

- Angepasste Geschwindigkeit der Pflegefahrzeuge beim regelmäßigen Egalisieren der Füllstoffe
- Vermeidung von „springenden“ Granulaten
- Vermeidung von Überfahren der Umgebungsbereiche im Zuge der Wendemaßnahmen mit im Eingriff befindlichen Pflegegeräten

- Reinigen der Pflegegeräte und der Zugmaschinen - Abkehren mit Bürsten oder Besen
- Abkehren von Restgranulat von Bürsten und Zugmatten oder Einrichtungen der Geräte und Maschinen (Platten, Träger und Balken etc.)

Austrag durch Spieler*Innen und Nutzung

- Installieren von Reinigungsmatten/Schuhbürsten zur Vermeidung des Austrags von Gummi-Granulat über die Sohlen der Spielenden, Betreuenden oder Begehenden des Kunststoffrasenplatzes
- Installation und regelmäßige Reinigung von Rückhaltesieben in Gitterrosten, Fanggittern und Wasserabläufe und Wiedereinbringen der aufgefangenen Füllstoffe in das Spielfeld
- Regelmäßige Reinigung der Trainer-/Ersatzbank
- Einbau von Barrieren- und Bandensystemen zum Rückhalt von Bällen

Austrag durch Umwelteinflüsse:

- Rückführung von Gummi-Granulat in den Kunststoffrasenplatz, welches durch Schneeräumen verlagert wurde - betrifft nur 2 % aller in Europa installierten Kunststoffrasenplätze
- Bauliche Maßnahmen, wie zum Beispiel Eingrenzungen, welche einen Austrag durch Wind und Regen eingrenzen. Alle baulichen Maßnahmen müssen an die örtlichen Gegebenheiten (Lage Spielfeld, Position der Versorgungsgebäude, Zufahrten und Stellplätze) angepasst werden.

Darüber hinaus kann durch technische Maßnahmen Austräge minimiert werden. Dazu gehört z. B. die Verwendung von Kunststoffrasenbelägen, die eng getuftet sind. Zudem kann auch bei der Herstellung und Optimierung der Polymer-Formulierungen Maßnahmen ergriffen werden, um eine bessere mechanische Stabilität und damit Abriebfestigkeit der Komponenten zu gewährleisten. Ferner ist der Austausch von Kunststoffrasenbelag in verschlissenen Spielfeldzonen anzuraten. In der Literatur wird beschrieben, dass die o. g. Minimierungsmaßnahmen MP-Austräge v. A. von Gummi-Granulat erheblich um 27 - 97 % reduzieren können (Magnusson and Mácsik, 2020). Diese große Varianz und damit die Effektivität des Maßnahmeneinsatzes erklärt sich durch die individuellen Platzbedingungen und der Ausgangslage. Daher müssen individuelle Betrachtungen der baulichen Situation erfolgen, um belastbare Werte zu erhalten.

5.6 Recyclingfähigkeit von Altrasen

Die Ergebnisse zeigten, dass folgende Randbedingungen bzw. Degradationseffekte das Recycling von Altrasen verkomplizieren:

1. Umfangreiche Reinigung des Altrasens nach dem Zerkleinern zur Extraktion von Sand, Gummi-Granulat, Staub und organischen Anteilen aus der Umwelt
2. Polyolefine in Altrasen zeigen erhebliche strukturelle Degenerationseffekte: Oxidation, Kettenbrüche und Quervernetzung im Polymer erschweren ein thermisches Verarbeiten durch Aptrusion
3. Gummi-Granulat zeigt erhebliche Schädigungen durch die Nutzungsdauer, indem Weichmacher verloren gehen und Versprödung eintritt

Um ein effizientes Recycling zu ermöglichen, müssen für alle oben genannten Alterungseffekte geeignete Maßnahmen gefunden und industriell implementiert werden, um eine Verarbeitung, insbesondere mit Fokus auf den *Second Life* Einsatz in Form von Produkten, effektiv umsetzen zu können. Diese Maßnahmen sind auf der Materialeite zu formulieren, was aufgrund der Effekte eine sehr komplexe Herausforderung darstellt. Diverse Unternehmen, welche diese Art von Recycling betreiben, mischen den Polyolefinen des Altrasens bis zu 60 % neues mineralöl-basiertes Material zu, um eine Verarbeitung mittels Kunststoff-Extrusion zu ermöglichen und daraus neue Produkte herzustellen. Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche haben jedoch gezeigt, dass die Verarbeitbarkeit der Rezyklatmasse und damit das Recycling von Altrasen auch bereits bei einer maximal zugegebenen Menge von ca. 7 % mineralöl-basiertem, neuem Material möglich ist.

6. Schlussworte

Zwar liegen für einzelne Komponenten von Kunststoffrasensystemen Daten über die Freisetzung von Schadstoffen vor, eine Bewertung des Risikos für Boden und Grundwasser lässt sich daraus jedoch nicht ableiten. Stattdessen hat sich in diesem Projekt erneut der Ansatz bewährt, die gesamte Struktur von Kunststoffrasen-Systemen zu betrachten, da er auch für die Quantifizierung des MP-Austrags geeignet war. Die Kunststoffrasen-Ergebnisse zeigten, dass alle Schadstoffemissionen an PAK und Schwermetallen unter den deutschen gesetzlichen Grenzwerten und damit unkritisch waren - auch bei den gealterten Proben. Was die MP-Emissionen über den Boden-Grundwasser-Pfad betrifft, so wiesen alle neuen Kunststoffrasen-Systeme nur minimale MP-Emissionen in der Fraktion 1.000 - 5 µm auf. Dahingegen führte die Alterung von Kunststoffrasen zu Anstiegen der MP-Emissionen, hauptsächlich von synthetischen Gummi-Granulaten und Grasfasern. Die maximal ermittelten MP-Austräge über das Sickerwasser entsprachen ca. 1 kg über die Nutzungsdauer von 15 Jahren. Der erstmalige Vergleich der Labor-Ergebnisse mit den Realsportplatz-Ergebnissen zeigte, dass kein größeres MP ($\geq 5 \mu\text{m}$) in den Grundwasser-Proben detektierbar war und daher wahrscheinlich im Boden durch Filtrationseffekte zurückgehalten wird. Daher sind die MP-Gehalte ebenfalls abhängig von der Bodentiefe der Probenahme. Insgesamt weisen die Ergebnisse darauf hin, dass der Boden-Grundwasser-Pfad für MP-Austräge quantitativ weniger relevant ist als z. B. der Luft-Pfad. Für zukünftige Studien ist es wichtig die Emissionen von kleineren, potenziell schädlichen Partikeln ($< 5 \mu\text{m}$, Nanoplastik) miteinzubeziehen, da von diesen potentiell die höchsten gesundheitlichen Gefahren ausgehen können, und experimentell die weiteren MP-Emissionspfade (z. B. Wind, Wasserabfluss und Kunststoffrasenpflege) quantitativ mit geeigneten Probenahme- und Analyseverfahren zu untersuchen, um eine robuste Datenbasis für die MP-Gesamtemissionen aus Kunststoffrasenplätzen zu schaffen. Um MP-Einträge in die Umwelt weiter zu reduzieren, empfehlen wir die Umsetzung und Installation von Minimierungsmaßnahmen, wie z. B. Filter- und Rückhaltesysteme für Sickerwasser, Auffangsysteme für Regen- und Windverdrängungen, Abdecksysteme für Spielfelder.

In der Praxis erwiesen sich zudem das neu entwickelte MEL als geeignetes ganzheitliches Probenahmegerät für eine einfaches, unkompliziertes und automatisiertes Monitoring von partikulären und gelösten Schadstoff-Emissionen aus einfachen Bodenmatrices, wie z. B. aus Kunststoffrasen. Darüber hinaus könnte MEL auch für Emissions-Analysen anderer Materialien, z. B. im Bauwesen, eingesetzt werden, um MP-Transporte und mögliche Auswaschungen gefährlicher Stoffe zu untersuchen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die MEL das Potenzial für die Umsetzung in zukünftige Überwachungskonzepte hat, wie sie von der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie gefordert werden und die Datengrundlage für zukünftige europäische Regelungen bilden können.

7. Anhang

7.1 Ergebnis-Transfer

Institutionen und Normung

- Bundesinstitut für Sportwissenschaft
- ECHA
- FLL Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V.
- RAL Gütegemeinschaft Kunststoffbeläge und Kunststoffrasensysteme in Sportfreianlagen e.V.
- DIN-Normenausschuss Bauwesen NA 005-01-22 AA NA 005-01-22 AA „Kunststoffflächen und Kunststoffrasenflächen“

Begutachtete Artikel in Fachzeitschriften

Maria Kittner, Bianca Coesfeld, Thomas Werischak, Sven Schlau, Korinna Altmann, Ute Kalbe. (In Submission). Simultaneous Sampling for Microplastics and Environmental Pollutants in Artificial Turf - Development of a new integrated Microplastics Eluate Lysimeter. Submitted to Environmental Science Europe, Springer, erscheint voraussichtlich 2025.

Maria Kittner, Vanessa Bauer, Korinna Altmann, Oliver Kraft, Thomas Nordmann und Ute Kalbe. (In Submission). Mikroplastik-Austräge aus Sportplätzen ins Grundwasser: Erstmaler Vergleich von Labor- & Realsportplatz-Ergebnissen. Bodenschutz, Erich Schmidt Verlag, erscheint in Ausgabe 04/2025.

Workshop

Bewertung der Freisetzung von (Schad)stoffen aus Materialien mit Elutionsverfahren, 21.01.2025, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland.

Vorträge

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 29.01.2025. Schadstoff-Austräge aus Kunststoffrasenplätzen – Simultane Beprobung auf Mikroplastik, PAK- & Schwermetall-Emissionen. Abteilungskolloquium der 4. Abteilung, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 27.11.2024. Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis. 28. Projekttag der Bauforschung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Online, Deutschland.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 24.09.2024. Development of a new Lysimeter System to assess Microplastic, PAH and Heavy Metal Emissions from Artificial Turf Sports Pitches, MICRO 2024: Plastic Pollution from Macro to Nano, Lanzarote, Spain.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 12.09.2024. Contaminant Emissions from Artificial Turf Sports Pitches – Simultaneous Sampling for Microplastics, PAH and Heavy Metals, 22nd European Symposium on Polymer Spectroscopy, Berlin, Deutschland.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 25.09.2023. Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis. Projektbegleitkreissitzung von DBU-Projekt „Ermittlung und Minderung von Mikroplastik- und Schadstoffemissionen von Kunststoffrasen-Sportplätzen (MiMiK)“, Sittensen, Deutschland.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 14.06.2023. Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis. 24. Projekttag der Bauforschung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, Deutschland.

Poster

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 17.03.2025. Assessment of Microplastic Emissions from Artificial Turf Pitches. Themenfeld Umwelt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 05. - 09.05.2024. Assessment of Microplastic Emissions from Artificial Turf Pitches. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Sevilla, Spanien.

Maria Kittner, Korinna Altmann, Ute Kalbe. 16.03.2023. Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis. Themenfeld Umwelt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland.

Weitere Veröffentlichungen

Maria Kittner, Korinna Altmann, Sven Hamann, Rüdiger Weyer, Ute Kalbe. 2024. Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden. Zukunft Bau Journal 2024, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn, Deutschland.

Thomas Werischak. 28.05.2024. Analytik und Steuerung von oxidativer Schädigung in Verbundmaterial aus Recyclingrohstoffen. Masterarbeit, Freie Universität Berlin, Berlin, Deutschland.

7.2 Danksagung

Unser größter Dank gilt Sven Schlau, Jörg-Ronald Lehmann und seinem Team, Igor Uzelac, Jurij Gerliz, Guido Söhring und Karsten Wetzel für die Konstruktion, Herstellung und Installation der MEL-Anlage. Sehr dankbar sind wir zudem Bianca Coesfeld für die große Unterstützung bei der Konstruktion und Entwicklung des gemeinsamen Probenahme-Konzepts. Zudem danken wir Thomas Werischak, Antje Bollwahn, Maren Riedel und Anna-Maria Böwe für die Unterstützung bei der Analyse und Probenahme. Weiterhin danken wir Dr. Volker Wachtendorf und Yannick Wäger für die UV-Bewitterung und die manuelle Feuchtbeanspruchung der Kunststoffrasenproben sowie Christiane Weimann und Dr. Johanna Säger für die REM-Aufnahmen (alle BAM). Ein großer Dank geht auch an die FormaTurf GmbH für die Bereitstellung der real-gealterten Kunststoffrasenproben.

7.3 Abkürzungsverzeichnis

aRasen	Altrasen
ATR-FTIR	Abgeschwächte Totalreflexion-Fourier Transform Infrarotspektroskopie
B	Bewittert beansprucht
BBodSchV	Bodenschutzverordnung
bEPDM	EPDM-Granulat mit biobasiertem Hanf-Anteil
BM	Bewittert und mechanisch beansprucht
BMH	Bewittert, hydrolytisch und mechanisch beansprucht
bRasen	Kunststoffrasen mit biobasierten PE-Fasern
BW	Blindwert
\varnothing_A	Durchschnittsfläche
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
DTG	Derivative Thermogravimetrie
DTG_{max}	Maximum der DTG-Kurve
DoE	Design of Experiment
ECHA	Europäische Chemikalien Agentur
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
fEPDM	Fossilbasiertes EPDM
fRasen	Kunststoffrasen mit fossilbasierten PE-Fasern
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie
GC	Gaschromatograph
GC/MS	Gaschromatographie/Massenspektrometrie
GKD-Tiegel	Mikroliterfiliertiegel der Firma Gebr. Kufferath AG
H	Hydrolytisch beansprucht
ICP-OES	Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
IR	Infrarot
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik
LOD	Nachweisgrenze, <i>engl.</i> limit of detection
LOQ	Bestimmungsgrenze, <i>engl.</i> limit of quantification
MiMiK	Abkürzung Projekttitel „Ermittlung und Minderung von Mikroplastik- und Schadstoffemissionen von Kunststoffrasen-Sportplätzen“
MEL	Mikroplastik Eluat Lysimeter
ML	Masseverlust
ML_{Wasser}	Masseverlust von Wasser von 25 - 180 °C
ML_{pyr}	Masseverlust pyrolysierbarer Organik von 180 - 600 °C
ML_{ox}	Masseverlust oxidierbarer Organik von 600 - 900 °C
MP	Mikroplastik

MP-Sport	Abkürzung Projekttitle „Bewertung der Freisetzung von Mikroplastik aus Sportböden auf Kunststoffbasis“
MR	Anorganischer Masserest
MS	Massenspektrometer
m/z	Masse-zu-Ladung-Verhältnis
p. a.	Chemikalie mit besonders hohem analytischem Reinheitsgrad, <i>lat. pro analysi</i>
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PU	Polyurethan
R	Real beansprucht
rRasen	Kunststoffrasen mit recycelten PE-Fasern
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
T₁	Freibewitterungstemperatur
T₂	Temperatur der künstlichen Bewitterung
TED-GC/MS	Thermo Extraktion Desorption-Gaschromatographie/Massenspektrometrie
TGA	Thermogravimetrische Analyse
T_g	Glasübergangstemperatur
t_R	Retentionszeit
T_m	Schmelztemperatur
TPE	Thermoplastische Elastomere
U	Unbeanspruchte, fabrik-neue Probe
UV	Ultraviolett
W/F	Wasser-Feststoff-Verhältnis

7.3 Literaturverzeichnis

- BAM. 2023. *Reference Material BAM-P206 - Polyethylene terephthalate (powder)* [Online]. Available: https://webshop.bam.de/media/wysiwyg/Kategorien/Referenzmaterialien/Polymermaterialien/Mikroplastik/Bericht/bam_p201repe.pdf [Accessed 01.10.2024].
- BERTLING, J., BERTLING, R. & HAMANN, L. 2018. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik: Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen*. Oberhausen: Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT.
- BERTLING, J., DRESEN, B., BERTLING, R., ARYAN, V. & WEBER, T. 2021. *Kunstrasenplätze – Systemanalyse unter Berücksichtigung von Mikroplastik- und Treibhausgasemissionen, Recycling, Standorten und Standards, Kosten sowie Spielermeinungen*. Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik.
- BMUV 2021. "Mantelverordnung" Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bundesgesetzblatt, Jg. 2021, Teil I, Nr. 43, Bonn 16. Juli 2021.
- BOCCA, B., FORTE, G., PETRUCCI, F., COSTANTINI, S. & IZZO, P. 2009. Metals contained and leached from rubber granulates used in synthetic turf areas. *Science of the Total Environment*, 407, 2183-2190.
- BRAUN, U., ALTMANN, K., BANNICK, C.-G., BEDNARZ, M., HERPER, D. & KNEFEL, M. 2019. *Mikrofiltrertiegel zur Probenfiltration und direkten Messung mittels thermischer Analyse*. Germany patent application DE 10 2019 135 311.4.
- BRAUN, U., ALTMANN, K., BANNICK, C. G., BECKER, R., BITTER, H., BOCHOW, M., DIERKES, G., ENDERS, K., ESLAHIAN, K. A., FISCHER, D., FÖLDI, C., FUCHS, M., GERDTS, G., HAGENDORF, C., HELLER, C., IVLEVA, N. P., JEKEL, M., KERPEN, J., KLAEGER, F., KNOOP, O., LABRENZ, M., LAFORSCH, C., OBERMAIER, N., PRIMPKKE, S., REIBER, J., RICHTER, S., RICKING, M., SCHOLZ-BÖTTCHER, B., STOCK, F., WAGNER, S., WENDT-POTTHOFF, K. & ZUMBÜLTE, N. 2020. Statuspapier Mikroplastik-Analytik - Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren.
- BRAUN, U., ALTMANN, K., HERPER, D., KNEFEL, M., BEDNARZ, M. & BANNICK, C. G. 2021a. Smart filters for the analysis of microplastic in beverages filled in plastic bottles. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 1-10.
- BRAUN, U., MÜLLER, A., KITTNER, M., ALTMANN, K., MEIERDIERKS, J., GRATHWOHL, P., LACKMANN, C., ŠIMIĆ, A., WELTMEYER, A., SCHMITZ, M., TOFAN, S., ROß-NICKOLL, M., VELKI, M. & HOLLERT, H. 2021b. Abschlussbericht Plastik in Böden - Vorkommen, Quellen, Wirkungen. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt.
- BROWNE, M. A., UNDERWOOD, A. J., CHAPMAN, M. G., WILLIAMS, R., THOMPSON, R. C. & VAN FRANEKER, J. A. 2015. Linking effects of anthropogenic debris to ecological impacts. *Proceedings of the Royal Society B*, 282, 20142929.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ,, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2021. *Mantelverordnung: Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung*. Bonn: Bundesgesetzblatt.
- CAMPANALE, C., MASSARELLI, C., SAVINO, I., LOCAPUTO, V. & URICCHIO, V. F. 2020. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 1212.
- CAPOLUPO, M., SORENSEN, L., JAYASENA, K. D. R., BOOTH, A. M. & FABBRI, E. 2020. Chemical composition and ecotoxicity of plastic and car tire rubber leachates to aquatic organisms. *Water Research*, 169, 115270.
- CHEW, C. H., GAN, L. M. & SCOTT, G. 1977. Mechanism of the Photo-Oxidation of Polyethylene *European Polymer Journal*, 13, 361-364.
- CHOI, S.-S. & KIM, Y.-K. 2011. Analysis of 5-ethylidene-2-norbornene in ethylene-propylene-diene terpolymer using pyrolysis-GC/MS. *Polymer Testing*, 30, 509-514.

- DANOPOULOS, E., TWIDDY, M., WEST, R. & ROTCHELL, J. M. 2022. A rapid review and meta-regression analyses of the toxicological impacts of microplastic exposure in human cells. *Journal of Hazardous Materials*, 457, 127861.
- DEUTSCHER BUNDESTAG 2020. Antwort der Bundesregierung, 19. Wahlperiode, 1916387.
- DEUTSCHER WETTERDIENST. 2023a. *Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland - Mittlere Monatssummen, Zeitraum: Januar 1991-2020* [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_mvs.html?nn=16102 [Accessed 13.01.2023].
- DEUTSCHER WETTERDIENST. 2023b. *Lufttemperatur Potsdam Mittel- und Extremwerte 01.01.1983 - 14.01.2023* [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/berlin-brandenburg/potsdam/_node.html [Accessed 15.01.2023].
- DFB 2021. DFB-Handlungsempfehlung für Fußballvereine & Kommunen - Mikroplastikaustrag bei bestehenden Kunststoffrasenplätzen.
- DIN 18035-7: 2014 Sportplätze - Teil 7: Kunststoffrasenflächen. *Sports grounds - Part 7: Synthetic turf areas*. German Standardization Organization: Deutsches Institut für Normung.
- DIN 19528 2009-01. Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm - Grundlegende Charakterisierung mit einem ausführlichen Säulenversuch und Übereinstimmungsuntersuchung mit einem Säulenschnelltest. *Leaching of solid materials - Percolation method for the joint examination of the leaching behaviour of organic and inorganic substances for materials with a particle size upto 32 mm - Basic characterization using a comprehensive column test and compliance test using a quick column test*. Deutsches Institut für Normung.
- DIN 19529: 2023 Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen.
- DIN 19529: 2023 Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren mit einem Wasser-/Feststoffverhältnis von 2 l/kg zur Untersuchung der Elution von anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm - Übereinstimmungsuntersuchung.
- DIN 66137-2: 2019 Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie.
- DIN 32645: 2008 Chemische Analytik - Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen - Begriffe, Verfahren, Auswertung.
- DIN EN 933-1: 2012 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren.
- DIN EN 15306: 2014 Sportböden für den Außenbereich - Simulierter Verschleiß von Kunststoffrasenflächen.
- DIN EN 15330-1: 2013 Sportböden - Überwiegend für den Außenbereich hergestellte Kunststoffrasenflächen und Nadelfilze - Teil 1: Festlegungen für Kunststoffrasenflächen für Fußball, Hockey, Rugbytraining, Tennis und multifunktionale Kunststoffrasenflächen.
- DIN EN ISO 4892-3: 2016 Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 3: UV-Leuchtstofflampen.
- DIN EN ISO 22036: 2022 Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von Elementen mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES).
- DIN NA 005-01-22 AA 2019. Stellungnahme zur ECHA Public Consultation Microplastic.
- DONG, S., ZHOU, M., SU, X., XIA, J., WANG, L., WU, H., SUAKOLLIE, E. B. & WANG, D. 2022. Transport and retention patterns of fragmental microplastics in saturated and unsaturated porous media: A real-time pore-scale visualization. *Water Research*, 214, 118195.
- DÜMICHEN, E., EISENTRAUT, P., CELINA, M. & BRAUN, U. 2019. Automated thermal extraction-desorption gas chromatography mass spectrometry: A multifunctional tool for comprehensive characterization of polymers and their degradation products. *Journal of Chromatography A*, 1592, 133-142.

- EBERHARD, T., CASILLAS, G., ZARUS, G. M. & BARR, D. B. 2024. Systematic review of microplastics and nanoplastics in indoor and outdoor air: identifying a framework and data needs for quantifying human inhalation exposures. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 34, 185-196.
- EISENTRAUT, P., DÜMICHEN, E., RUHL, A. S., JEKEL, M., ALBRECHT, M., GEHDE, M. & BRAUN, U. 2018. Two Birds with One Stone - Fast and Simultaneous Analysis of Microplastics: Microparticles Derived from Thermoplastics and Tire Wear. *Environmental Science & Technology Letters*, 5, 608-613.
- EN 14405: 2017 Charakterisierung von Abfällen - Untersuchung des Elutionsverhaltens - Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom (unter festgelegten Bedingungen).
- EN ISO 5667-3: 2018 Wasserbeschaffenheit – Probenahme - Teil 3: Konservierung und Handhabung von Wasserproben.
- EN ISO 21268-3: 2019 Bodenbeschaffenheit -Elutionsverfahren für die anschließende chemische und ökotoxikologische Untersuchung von Boden und von Bodenmaterialien - Teil 3: Perkolationsstest im Aufwärtsstrom.
- EUROPEAN CHEMICALS AGENCY 2019. Annex to Background document to the opinion on the Annex XV dossier proposing restrictions on rubber granules (PAHs in synthetic turf infill granules and mulches).
- EUROPEAN COMMISSION 2020. Circular Economy Action Plan - The European Green Deal.
- EUROPEAN COMMISSION 2022. Proposal for a Directive amending the Water Framework Directive, the Groundwater Directive and the Environmental Quality Standards Directive (2022/0344).
- EUROPEAN COMMISSION 2023a. Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards synthetic polymer microparticles.
- EUROPEAN COMMISSION 2023b. Protecting environment and health: Commission adopts measures to restrict intentionally added microplastics.
- EUROPEAN UNION 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.
- FFL 2022. Fachbericht Kunststoffsportböden - Nachhaltige Kunststoffbelagsauswahl für Sportfreianlagen. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.
- FORSKNINGSKAMPANJEN 2017. Sjekk kunstgressbanen - Rapport fra undersøkelser om svinn av gummigranulat fra kunstgressbaner, gjennomført av over 12 000 elever og spillere høsten 2017.
- GOMES, F. O., ROCHA, M. R., ALVES, A. & RATOLA, N. 2021. A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124998.
- GULMINEA, J. V., JANISSEKB, P. R., HEISEC, H. M. & AKCELRUD, L. 2003. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. *Polymer Degradation and Stability*, 79, 385–397.
- HABTE, A., SENGUPTA, M., GUEYMARD, C. A., NARASAPPA, R., ROSSELER, O. & BURNS, D. M. 2019. Estimating Ultraviolet Radiation from Total Radiation. *Conference: Solar Power International*. Anaheim, CA, USA.
- HANN, S., SHERRINGTON, C., JAMIESON, O., HICKMAN, M., KERSHAW, P., BAPASOLA, A. & COLE, G. 2018. Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products - Report for DG Environment of the European Commission.
- HUA, J., LUNDQVIST, M., NAIDU, S., EKVALL, M. T. & CEDERVALL, T. 2024. Environmental risks of breakdown nanoplastics from synthetic football fields. *Environ Pollut*, 347, 123652.
- ISO/DIS 16094-3: 2024 2024. Wasserbeschaffenheit - Analyse von Kunststoffen in Wasser - Teil 3: Thermoanalytisches Verfahren für Wasser mit geringen Gehalten an natürlichen Schwebstoffen.
- ISO/TR 21960: 2020 Plastics - Environmental aspects – State of knowledge and methodologies.
- KALBE, U., KRÜGER, O., WACHTENDORF, V. & BERGER, W. 2012. *Umweltverträglichkeit von Kunststoff- und Kunststoffrasenbelägen auf Sportfreianlagen*, Hellenthal, Sportverlag Strauß.

- KALBE, U., KRÜGER, O., WACHTENDORF, V., BERGER, W. & HALLY, S. 2013. Development of leaching procedures for synthetic turf systems containing scrap tyre granules. *Waste and Biomass Valorization*, 4, 745-757.
- KALBE, U., SUSSET, B. & BANDOW, N. 2016. *Umweltverträglichkeit von Kunststoffbelägen auf Sportfreianlagen - Modellierung der Stofffreisetzung aus Sportböden auf Kunststoffbasis zur Bewertung der Boden- und Grundwasserverträglichkeit*, Hellenthal, Sportverlag Strauß.
- KHAN, F. R., RØDLAND, E. S., KOLE, P. J., VAN BELLEGHEM, F. G. A. J., JAÉN-GIL, A., HANSEN, S. F. & GOMIERO, A. 2024. An overview of the key topics related to the study of tire particles and their chemical leachates: From problems to solutions. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 172.
- KITTNER, M., BAUER, V., ALTMANN, K., KRAFT, O., NORDMANN, T. & KALBE, U. 2025. Mikroplastik-Austräge aus Sportplätzen ins Grundwasser: Erstmaler Vergleich von Labor- mit Realsportplatz-Ergebnissen *Bodenschutz*, 04/2025.
- KITTNER, M., EISENTRAUT, P., DITTMANN, D. & BRAUN, U. 2023. Decomposability versus detectability: First validation of TED-GC/MS for microplastic detection in different environmental matrices. *Applied Research*, e202200089.
- KITTNER, M., KERNDORFF, A., RICKING, M., BEDNARZ, M., OBERMAIER, N., LUKAS, M., ASENOVA, M., BORDÓS, G., EISENTRAUT, P., HOHENBLUM, P., HUDCOVA, H., HUMER, F., ISTVÁN, T. G., KIRCHNER, M., MARUSHEVSKA, O., NEMEJCOVÁ, D., OSWALD, P., PAUNOVIC, M., SENGL, M., SLOBODNIK, J., SPANOWSKY, K., TUDORACHE, M., WAGENSONNER, H., LISKA, I., BRAUN, U. & BANNICK, C. G. 2022. Microplastics in the Danube River Basin: A First Comprehensive Screening with a Harmonized Analytical Approach. *ACS Environmental Science & Technology Water*, 2, 1174-1181.
- KRAUSE, S., OUELLET, V., ALLEN, D., ALLEN, S., MOSS, K., NEL, H. A., MANASEKI-HOLLAND, S. & LYNCH, I. 2024. The potential of micro- and nanoplastics to exacerbate the health impacts and global burden of non-communicable diseases. *Cell Rep Med*, 5, 101581.
- KRÜGER, O., KALBE, U., BERGER, W., NORDHAUß, K., CHRISTOPH, G. & WALZEL, H. P. 2012. Comparison of Batch and Column Tests for the Elution of Artificial Turf System Components. *Environmental Science & Technology*, 46, 13085-13092.
- LI, W., BRUNETTI, G., BOLSHAKOVA, A. & STUMPP, C. 2024. Effect of particle density on microplastics transport in artificial and natural porous media. *Science of The Total Environment*, 935, 173429.
- LUNDSTRÖM, J. 2019. *Spridning av mikroplaster från konstgräsplaner via dagvatten - Optimering av reningsmetoden granulatfälla*. PhD, KTH - School of Engineering Sciences in Chemistry, Biotechnology and Health.
- MAGNUSSON, S. & MÁCSIK, J. 2020. Determining the effectiveness of Risk Management Measures to minimize infill migration from synthetic turf sports fields. *Ecoloop*.
- MENICHINI, E., ABATE, V., ATTIAS, L., DE LUCA, S., DI DOMENICO, A., FOCHI, I., FIORTE, G., IACOVELLA, N., IAMICELI, A. L., IZZO, P., MERLI, F. & BOCCA, B. 2011. Artificial-turf playing fields: Contents of metals, PAHs, PCBs, PCDDs and PCDFs, inhalation exposure to PAHs and related preliminary risk assessment. *Science of the Total Environment*, 409, 4950-4957.
- NORCE 2018. Preliminær undersøkelse av mikroplast og gummigranulat ved kunstgressbaner. Bergen.
- O'BRIEN, S., RAUERT, C., RIBEIRO, F., OKOFFO, E. D., BURROWS, S. D., O'BRIEN, J. W., WANG, X., WRIGHT, S. L. & THOMAS, K. V. 2023. There's something in the air: A review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Science of the Total Environment*, 874, 162193.
- PATRICK, M., ENGLERT, A. & BURKHARDT, M. 2024. Kunststoffrasenflächen in der Schweiz und Relevanz von Mikroplastik. Rapperswil: OST – Ostschweizer Fachhochschule Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC).
- PLASTICS EUROPE 2023. *Plastics the fast Facts 2023*.
- REGNELL, F. 2019. Dispersal of microplastic from a modern artificial turf pitch with preventive measures - Case study Bergaviks IP, Kalmar. *Ecoloop*.

- RIECKHOF, C., MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, V., HOLZBECHER, E. & MEFFE, R. 2024. Effect of particle size on the transport of polystyrene micro- and nanoplastic particles through quartz sand under unsaturated conditions. *Environmental Pollution*, 363, 125193.
- SANG, T., WALLIS, C. J., HILL, G. & BRITOVSEK, G. J. P. 2020. Polyethylene terephthalate degradation under natural and accelerated weathering conditions. *European Polymer Journal*, 136.
- SAWASAKI, T. & NOJIRI, A. 1988. Radiation Crosslinking of Polypropylene. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 31, 877-886.
- SUND, H. 2020. *Mikroplastförluster från konstgräsplaner via snöröjning - En kvantitativ studie samt kostnad-nyttöanalys av hanteringsmetoder för granulat*. Uppsala Universitet.
- SUSSET, B. & GRATHWOHL, P. 2011. Leaching standards for mineral recycling materials - A harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. *Waste Management*, 31, 201-214.
- TSUGE, S., OHTANI, H. & WATANABE, C. 2011. *Pyrolysis-GC/MS Data Book of Synthetic Polymers - Pyrograms Thermograms and MS of Pyrolyzates*, Elsevier.
- WHO 2021. *WHO global air quality guidelines*, Bonn.
- WIESNER, Y., HOFFMANN, T., RANGE, D. & ALTMANN, K. 2023. Microplastics in sediments of the river Rhine - A workflow for preparation and analysis of sediment samples from aquatic river systems for monitoring purposes. *Applied Research*, e202200125.
- XIE, F., ZHANG, T., BRYANT, P., KURUSINGAL, V., COLWELL, J. M. & LAYCOCK, B. 2019. Degradation and stabilization of polyurethane elastomers. *Progress in Polymer Science*, 90, 211-268.
- YANG, X. & TANG, D. W. S. 2024. Modeling microplastic transport through porous media: Challenges arising from dynamic transport behavior. *J Hazard Mater*, 484, 136728.
- ZAGHDOUDI, M., KÖMMLING, A., JAUNICH, M. & WOLFF, D. 2023. Understanding the recovery behaviour and the degradative processes of EPDM during ageing. *Polymer Testing*, 121.
- ZHAO, Q., LI, X., HU, J. & YE, Z. 2010. Degradation Characterization of Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) Rubber in Artificial Weathering Environment. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 10, 240-244.

7.5 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Kunststoffrasens der dritten Generation.	9
Abb. 2: Mikroskopie-Aufnahmen fabrik-neuer, unbeanspruchter Proben. Abgebildet sind a) Oberseite fossilbasierter Rasen (fRasen, 20x), b) Detailaufnahme PE-Faser von fRasen (200x), c) fEPDM-Infill (20x) und d) Detailaufnahme fEPDM-Granulat (200x), e) Oberseite und f) Rückseite mit Vertaftung und PU-Verklebung recycelter Rasen (rRasen, 20x).....	16
Abb. 3: Umsetzung der UV-Bewitterung. Dargestellt sind die künstliche UV-Beanspruchung im Bewitterungsgerät durch a) vertikale Aufhängung von Kunststoffrasen, b) von EPDM-Granulat in Edelstahlbehältern mittels Umlenkspiegeln und c) Detailaufnahme EPDM-Granulat während der Eis-Phase.	18
Abb. 4: Mechanische Beanspruchung mittels Lisport-Tester: a) Totale, b) Detailaufnahme Edelstahlwalzen und c) des Prüf-Aufbaus.	20
Abb. 5: Verlauf der mechanischen Beanspruchung im Lisport-Tester. Abgebildet sind die Totalen und Nahaufnahmen nach jeweils 50, 30.000 und 60.000 Zyklen am Beispiel fRasen.....	21
Abb. 6: Aufbau und zentrale Elemente der MEL: a) Totalaufnahme, b) Technische Zeichnung, c) Entleerungshilfe, d) Kontroll-Modul, e) Berechnungssystem, f) Kunststoffrasen-System im Glaszylinder, g) Unterer Flansch mit Überlauf, h) MP-Filter Modul, i) MP-Filtertiegel.	26
Abb. 7: Recycling-Prozess von Kunststoffrasen: a) Ausgangsmaterialien, b) Aptrusionsanlage, c) Aptrusion der Recyclatmasse, d) ausgehärtete Recyclatmasse, e) Proben-Knochen, f) Endprodukt, z. B. Unterbau für Kunststoffrasenplatz.....	34
Abb. 8: Effekte der beschleunigten Alterung auf die Oberflächenfunktionalisierung des fossilbasierten fEPDM. Dargestellt sind die normierten ATR-FTIR-Spektren bei vier Beanspruchungen (neu, hydrolytisch beansprucht, bewittert, bewittert und mechanisch beansprucht) im Vergleich mit real gealterten aEPDM. Die charakteristischen Bandenänderungen sind markiert.....	36
Abb. 9: Oberflächenfunktionalisierung der PE-Grasfasern von fRasen (oben) und rRasen (unten) durch die beschleunigte Alterung. Dargestellt sind die normierten ATR-FTIR-Spektren bei vier Beanspruchungen (fabrikneu, hydrolytisch, bewittert, bewittert und mechanisch beansprucht) im Vergleich mit real gealterten Grasfasern von aRasen ² . Die charakteristischen Bandenänderungen sind markiert.	40
Abb. 10: PAK-Ergebnisse der MEL-Versuche mittels GC/MS. Dargestellt sind die mittleren Σ^{16} PAK-Konzentrationen aller untersuchten Kunststoffrasen-Systeme bei unterschiedlichem Alterungszustand mit ihren Spannen in $\mu\text{g/L}$ über den Verlauf des Flüssigkeits-Feststoff-Verhältnisses (W/F). Als Faustregel kann man davon ausgehen, dass ein W/F von 2 L/kg etwa einem Jahr Beregnung unter deutschen Bedingungen entspricht. Die Σ^{16} PAK-Ergebnisse für beide in Echtzeit gealterten Rasen (aRasen ¹ /aRasen ²) waren ähnlich und sind daher zusammen dargestellt.....	51
Abb. 11: Schwermetallergebnisse der MEL-Experimente mit ICP-OES. Dargestellt sind die gemittelten Metallkonzentrationen der untersuchten Kunststoffrasenszenarien (n= 2) mit ihren Spannen in unterschiedlichen Alterungszustände im Verlauf des untersuchten Wasser-Feststoff-Verhältnisses (W/F). Als Faustregel kann man davon ausgehen, dass ein W/F von 2 L/kg etwa einem Jahr Niederschlag unter deutschen Bedingungen entspricht. Zusätzlich stellen die rot gestrichelten Linien die jeweiligen Grenzwerte für Bodenmaterialien bei W/F 2 L/kg dar (BMUV, 2021). Da nur die Zinkkonzentrationen der beiden in Echtzeit gealterten Rasen (aRasen ¹ /aRasen ²) stark variierten, werden ihre Zink-Ergebnisse einzeln dargestellt. Bei Kupfer, Nickel und Chrom waren die Werte ähnlich und werden daher gemeinsam als Mittelwert angegeben.	53
Abb. 12: Mikroplastik-Ergebnisse der Schüttelversuche. Dargestellt sind die MP-Gehalte der Fraktion 5 - 50 μm (log) von neuen, ungealterten Kunststoffrasen-Komponenten.....	55
Abb. 13: Ergebnis der Siebung nach der mechanischen Beanspruchung der Lisport-Prüfung.	56

Abb. 14: Mikroplastik-Masse-Ergebnisse der Labor-Untersuchungen mittels Mikroplastik Eluat Lysimeter-Anlage und TED-GC/MS. Dargestellt sind die mittleren Summen der Masse-Gehalte der Doppelbestimmungen mit ihren Spannen (log), unterteilt in Kunststoffrasen-Szenarien mit/ohne synthetische Gummi-Granulat und Alterungsstatus. Die Polymer-Abkürzungen sind wie folgt: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PU), Polystyrol (PS), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), thermoplastisches Elastomer (TPE). 57

7.6 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Probenübersicht über die untersuchten Kunststoffrasensysteme und ihrer Einzelkomponenten. Die verwendeten polymeren Materialien sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PU), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) und Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR).....	17
Tab. 2: Prüfparameter des simulierten Verschleißes mittels Lisport-Tester.....	20
Tab. 3: Übersicht über alle analysierten Polymermarkerverbindungen mit ihren charakteristischen Fragmenten (m/z) und Retentionszeiten (t_R). Die Sternchen beschreiben Diastereomere der jeweiligen Substanzen, deren Peaks chromatographisch getrennt sind. Durch diese Arbeit neu hinzugekommene Polymermarker sind kursiv dargestellt. Die zur Quantifizierung und LOD-Bestimmung verwendeten Marker, m/z und t_R sind unterstrichen.	28
Tab. 4: Abkürzungsverzeichnis der Beanspruchungszustände der analysierten Kunststoffrasenkomponenten.	35
Tab. 5: TGA-Ergebnisse der EPDM-Granulate. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fEPDM und teils biobasiertem bEPDM jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealtertem (R) aEPDM.	35
Tab. 6: DSC-Ergebnisse der EPDM-Granulate. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fEPDM und teils biobasiertem bEPDM jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealtertem (R) aEPDM.	36
Tab. 7: Morphologische Oberflächenänderungen des EPDM-Granulats in Abhängigkeit von dem Beanspruchungszustand und Probe aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen in der Totalen (45x) und Detail-Aufnahme (900x).	37
Tab. 8: TGA-Ergebnisse der HDPE-Grasfasern. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recyceltem rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealtertem (R) Altproben (aRasen ¹ /aRasen ²). Da DTG_{max} je nach Farbe variierte, wurde in hell- und dunkelgrüne Fasern unterschieden. Ein Bindestrich bedeutet, dass keine hellgrünen Fasern vorhanden waren.	38
Tab. 9: DSC-Ergebnisse der HDPE-Grasfasern. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu real gealterten (R) Altproben (aRasen ¹ /aRasen ²). Da sich die Schmelztemperaturen (T_{m1}/T_{m2}) abhängig von der Struktur (glatt/texturiert) unterschieden, sind sie getrennt dargestellt. Die Glasübergangstemperaturen konnten aufgrund von Überlagerungen mit exothermen Reaktionen nicht bestimmt werden. Ein Bindestrich, dass keine T_m bzw. texturierten Fasern in der Probe vorhanden waren.....	38
Tab. 10: Morphologische Oberflächenänderungen der Grasfasern in Abhängigkeit von dem Beanspruchungszustand und Probe aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen in der Totalen (45x) und Detail-Aufnahme (900x).	41
Tab. 11: TGA-Ergebnisse des PP-Trägermaterials. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewittert, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real gealterten (R) Altprobe (aRasen ¹).....	43
Tab. 12: DSC-Ergebnisse der PP-Trägermaterial. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B),	

bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real beanspruchten (R) Altprobe (aRasen ¹).....	43
Tab. 13: Morphologische Oberflächenänderungen des PP-Trägers in Abhängigkeit von dem Beanspruchungszustand und Probe aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen in der Totalen (45x) und Detail-Aufnahme (900x).....	44
Tab. 14: TGA-Ergebnisse des PET-Umwindegarns. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewittert, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real gealterten (R) Altprobe (aRasen ¹).....	46
Tab. 15: DSC-Ergebnisse des PET-Umwindegarns. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewittert, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH) im Vergleich zu der real gealterten (R) Altprobe (aRasen ¹). Ein Bindestrich bedeutet, dass keine T _g oder T _m detektierbar waren.....	46
Tab. 16: TGA-Ergebnisse des PU-Klebers. Dargestellt sind die Mittelwerte von fossilbasiertem fRasen, recycelten rRasen und biobasiertem bRasen jeweils im unbeanspruchten (U), hydrolytisch (H), bewitterten (B), bewitterten und mechanisch beanspruchten (BM) sowie bewitterten, mechanisch und hydrolytisch beanspruchten Zustand (BMH).....	47
Tab. 17: Übersicht der Konzentrationen an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in den unbeanspruchten Kunststoffrasenproben. Dargestellt sind die Mittelwerte des fossilbasierten Rasens (fRasen) und EPDM-Granulat (fEPDM), Rasen mit Recyclinganteil (rRasen), Elastikschiicht (EL), Sand-Infills (S), ungebundenen Tragschiicht aus Kies (UT) und der Blindwerte (BW). < LOQ meint, dass ein Signal detektierbar, aber unter der PAK-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ, limit of quantification) lag.	49
Tab. 18: Übersicht der Element-Konzentrationen in den unbeanspruchten Kunststoffrasenproben. Dargestellt sind die Mittelwerte (n= 2) des fossilbasierten fEPDM und fRasens, recycelten rRasen, Elastikschiicht (EL), Sand-Infill (S), ungebundenen Tragschiicht aus Kies (UT) und der Blindwerte (BW). < LOQ meint, dass ein Signal detektierbar, aber unter der Schwermetall-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ, limit of quantification) lag.	50
Tab. 19: PAK-Ergebnisse der Kunststoffrasen-Szenarien bei einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2 L/kg. Dargestellt sind die gemittelten Konzentrationen (n= 2) des Vergangenheits- (aRasen ¹ /aRasen ²), Gegenwarts- (fRasen) und Zukunfts-Szenarios (rRasen) jeweils im ungealterten (neu) un beschleunigt gealterten Zustand (gealtert) sowie die Blindwerte (BW). < LOQ bedeutet, dass das Signal unterhalb der PAK-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ) lag.	52
Tab. 20: Element-Konzentrationen der Kunststoffrasenszenarien bei einem Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F) von 2 L/kg. Dargestellt sind die gemittelten Konzentrationen (n= 2) des Vergangenheit- (aRasen ¹ /aRasen ²), Gegenwarts- (fRasen) und Zukunfts-Szenarios (rRasen) jeweils im ungealterten (neu) und beschleunigt gealterten Zustand (gealtert) sowie die Blindwerte (BW). < LOQ bedeutet, dass das Signal unterhalb der Element-spezifischen Bestimmungsgrenze (LOQ) lag.....	54
Tab. 21: Mikroplastik-Ergebnisse der Schüttelversuche der unbeanspruchten Kunststoffrasenkomponenten zur Ermittlung des Mikroplastik-Freisetzungspotenzials der Fraktion 5 – 50 µm. Dargestellt sind die Mittelwerte der Dreifachbestimmungen. Ein Bindestrich bedeutet, dass kein Mikroplastik detektiert wurde.	56
Tab. 22: Zusammenfassung der Mikroplastik-Emissionen aller untersuchten Kunststoffrasen-Szenarien unterschiedlicher Alterungszustände, ausgedrückt in mg/m ² . Da Doppelbestimmungen durchgeführt wurden, sind die Polymermassen-Gehalte mit ihren Spannen angegeben. Ein Bindestrich bedeutet, dass kein MP detektiert wurde.....	58