

Abteilung Funktionelle Schichten
der FILK Freiberg Institute gGmbH

Nachhaltige Substitution erdölbasierter Polymere für Flächendrainagesysteme unter Einhaltung für die Außenanwendung erforderlicher Eigenschaften

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 37879/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Mandy Gersch

Freiberg, Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	3
1.1	Abbildungsverzeichnis	3
1.2	Tabellenverzeichnis	4
2	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	4
3	Zusammenfassung.....	6
3.1	Durchgeführte Untersuchungen.....	6
3.2	Erzielte Ergebnisse	6
3.3	Empfehlungen für das weitere Vorgehen.....	6
3.4	Angabe von Kooperationspartnern und Hinweis auf die DBU Förderung.....	6
3.5	Bezugsmöglichkeiten des Abschlussberichtes	6
4	Einleitung	7
5	Hauptteil.....	10
5.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte und erzielten Ergebnisse	10
5.1.1	Auswahl der Polymere	10
5.1.2	Extrusion von Folien verschiedener Dicke.....	12
5.1.3	Tiefziehen der Folien	13
5.1.4	Bewertung der anwendungstechnischen Eigenschaften	14
5.1.5	Bewertung der Tiefziehfähigkeit und Qualität der Formteile	17
5.1.6	Bewertung der Recyclingfähigkeit	21
5.1.7	Ermittlung des CO ₂ -Fußabdruckes der Materialien	25
5.2	Diskussion der Ergebnisse mit Bezug auf die Zielsetzung	28

5.3	Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	29
5.4	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	32
6	Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis durch Gutjahr	32
7	Fazit	33
8	Literaturverzeichnis	35

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

1.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht verschiedener Arten von Flächendrainagen für Außenanwendungen; Foto: Gutjahr [3].....	7
Abb. 2: Prozessschritte der Newcycling®-Technologie (Bild: APK)	11
Abb. 3: Konfiguration der Extrusionsanlage zur Folienherstellung	12
Abb. 4: Tiefziehgerät KFG37 und verwendete Tiefziehform ‚Besteckkasten‘	13
Abb. 5: Kennwerte des Zugversuches der vier alternativen Materialien (1,0 mm; quer) und zweier fossil basierter Referenzen	15
Abb. 6: Speicher- und Verlustmodul der Materialien, ermittelt mit DMA	16
Abb. 7: Tiefziehteil Besteckkasten und Messstellen Wand- und Bodendicke	18
Abb. 8: Wandstärken der tiefgezogenen Bauteile an den verschiedenen Messstellen.....	19
Abb. 9: 3D-gefertigte Tiefziehform Drainage - links: FDM (Material Onyx) und rechts: SL (Material Rigid10K).....	19
Abb. 10: Beispiele für tiefgezogene Drainagen; links: HDPE + LDPE1 1,0 und 2,0 mm; rechts: PBS 2,0 mm	20
Abb. 11: Test Druckfestigkeit der Flächendrainagen	20
Abb. 12: Einschneckenextruder mit Strangdüse, Wasserbad (links) und Granulator (rechts)	21
Abb. 13: Vergleich der MFI-Werte (Messtemperatur 190 °C/ Gewicht 2,16 kg).....	22
Abb. 14: Prozentuale Veränderung der Festigkeits- und Dehnungswerte aus dem Zugversuch	23

Abb. 15: DMA-Ergebnisse der Folien neu (hellgrün) und 7fach verarbeitet (blau) im Vergleich: oben HDPE / unten LDPE2	24
Abb. 16: Vergleich der Musterdrainagen aus Neuware und mehrfach verarbeitetem HDPE (links) und LDPE2 (rechts)	25
Abb. 17: Schematische Darstellung des untersuchten Systems und der Systemgrenzen (am Beispiel der Referenz aus PP)	26
Abb. 18: CFP des Granulates und CFP der Herstellung der Flächendrainage	27
Abb. 19: Carbon Foot Print der Materialien im Vergleich zur Referenz PP	28

1.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der ausgewählten Materialien	10
Tabelle 2: Einstell- und Prozesskennwerte der Extrusion der Folien (0,5 mm/ * 1,0 mm/ ** 2,0 mm)	12
Tabelle 3: Tiefziehparameter für Muster aus 1,0-mm-Folien	14
Tabelle 4: Glastemperatur T_g und Speichermoduln bei verschiedenen Temperaturen.....	16
Tabelle 5: Materialbewertung nach Kälte-, Wärme- und Wasserlagerung.....	17
Tabelle 6: Bewertung der tiefgezogenen Drainagen	20
Tabelle 7: Vergleich der DSC-Ergebnisse von Neugranulat und 6-fach verarbeitetem Granulat	23
Tabelle 8: Primärdaten für die Cradle-to-Gate-Analyse	26
Tabelle 9: Gesamtbewertung der untersuchten Kunststoffe als geeignetes Substitutionsmaterial	29
Tabelle 10: Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	32

2 Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Cradle-to-Gate Wiege bis Werktor

Cradle-to-Grave Wiege bis Bahre

CFP	Carbon Footprint
CO ₂	Kohlendioxid
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EU	Europäische Union
E'	Speichermodul
E''	Verlustmodul
FDM	Fused Deposition Modeling
HDPE	High Density Polyethylen
H _s	Schmelzenthalpie
H _k	Rekristallisationsenthalpie
LDPE	Low Density Polyethylen
MFI	Melt Flow Index
PBS	Polybutylensuccinat
PP	Polypropylen
SL	Stereolithographie
tan δ	Verlustfaktor
T _g	Glastemperatur
T _s	Schmelztemperatur
T _k	Rekristallisationstemperatur
t	Tonne

3 Zusammenfassung

3.1 Durchgeführte Untersuchungen

Vier Polymere (biobasiert oder rezykliert) wurden auf ihr Potential zur nachhaltigen Substitution des aktuell für Flächendrainagen verwendeten, fossil basierten Kunststoffes untersucht. Dabei waren die Verarbeitbarkeit (Extrusion, Tiefziehen), die anwendungstechnisch relevantesten Eigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Temperatur- und Wasserbeständigkeit) sowie die Recyclingfähigkeit Gegenstand der Untersuchungen. Des Weiteren erfolgte die Ermittlung des CO₂-Fußabdruckes.

3.2 Erzielte Ergebnisse

Die Evaluierung der vier Polymere ergab, dass ein zu 94 % biobasiertes HDPE das größte Potential als Substitut besitzt. Der über einen Cradle-to-Gate Ansatz ermittelte CO₂-Fußabdruck der heute eingesetzten Drainagen kann durch die Verwendung des HDPE von 1,65 auf -0,49 kg/m² CO₂-Äquivalente reduziert werden. Allerdings könnte die Marktakzeptanz einer klimaneutraleren Drainage durch den deutlich höheren Preis des HDPE-Granulates negativ beeinflusst werden.

3.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Zur Erhöhung der Nachhaltigkeit der aktuellen Flächendrainage können kurzfristig ökonomisch sowie ökologisch sinnvoll Maßnahmen wie die Verbesserung der Energieeffizienz von Extrusion/Tiefziehen, die Wiederverwendung der Materialabfälle aus der Herstellung und der Einsatz von käuflich erworbenem Rezyklat ergriffen werden.

3.4 Angabe von Kooperationspartnern und Hinweis auf die DBU Förderung

Kooperationspartner war die GUTJAHR Systemtechnik GmbH, Philipp-Reis-Straße 5-7, 64404 Bickenbach. Das Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen 37879/01.

3.5 Bezugsmöglichkeiten des Abschlussberichtes

FILK Freiberg Institute gGmbH

4 Einleitung

Der Aktionsplan im Rahmen der Circular Economy Strategie der EU fordert besonders im Bereich der Kunststoff-Produkte, die Entkopplung von den fossilen Rohstoffen voranzutreiben und durch alternative biobasierte sowie rezyklierte Rohstoffe zur CO₂-Emissionsneutralität beizutragen [1]. Dementsprechend wird auch im Marktsegment der Flächendrainagen nach nachhaltigen und kreislauffähigen Lösungen entlang der Wertschöpfungskette gesucht.

Flächendrainagen werden unter Belägen im Außenbereich (Pflaster, Beton, Kies + Splitt, Terrassen, Balkon, Gründach) eingesetzt. Sie führen über die Fugen eindringendes Oberflächenwasser gezielt ab und vermeiden damit Staufeuchte auf den Belägen. Die Drainagen gewährleisten dadurch eine dauerhafte Schadensfreiheit, verlängern die Lebensdauer der Beläge und leisten entsprechend schon heute einen Beitrag zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung.

Da die Flächendrainagen zum Teil extremen Witterungsbedingungen (Frost / Tauwechsel, Dauernassbelastung, alkalisches Milieu) ausgesetzt sind, werden sie aus erdölbasierten Kunststoffen hergestellt [2]. Diese Kunststoffe (Polyolefine) werden zu Halbfabrikaten wie Folien oder Tafeln extrudiert und anschließend über das Tiefziehen verformt, um Rinnen für die schnelle Wasserableitung zu bilden. Anschließend werden sie mit Vliesen oder Geweben kaschiert und/oder die Rinnen geschlitzt bzw. perforiert (Abb. 1).

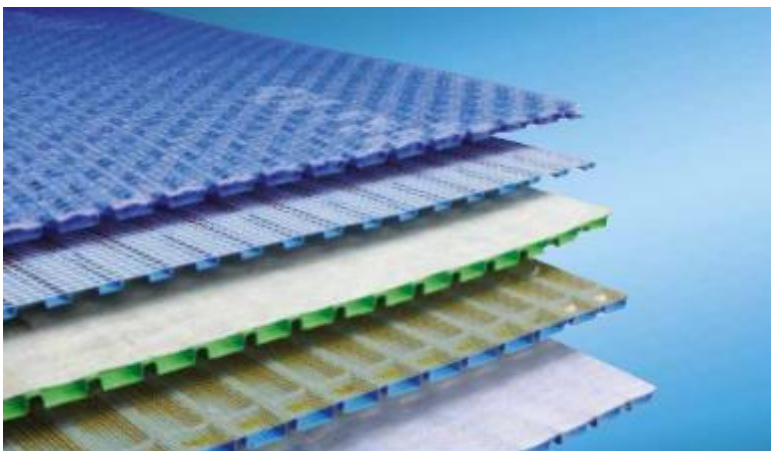


Abb. 1: Übersicht verschiedener Arten von Flächendrainagen für Außenanwendungen; Foto: Gutjahr [3]

Bei der Erfüllung des Klimaschutzplanes der Bundesregierung kommt der Baubranche und dem Gebäudesektor eine Schlüsselrolle zu, da diese 30 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland verursachen. Um das Ziel „klimaneutraler Gebäudebestand“ zu erreichen, sind fünf Handlungsfelder identifiziert, von denen das Handlungsfeld 2 – Kreislauffähige Konstruktionen - und das Handlungsfeld 5 – Niedriger CO₂-Fußabdruck der verwendeten Materialien – auf die Flächendrainagen angewandt werden können [4]. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland ca. 700.000 m² Flächendrainagen in Belägen im Außenbereich verbaut (ohne Gründachanwendungen), das sind ca. 700 t. Die Gesamtmenge der bei der Herstellung von einer Tonne der Flächendrainage freiwerdenden Treibhausgase entspricht ca. 1,3 t CO₂-Äquivalenten. Die gesamte durch die Herstellung von Flächendrainagen verursachte Treibhausgasemission betrug im Jahr 2019 demnach ca. 910 t. Nach dem Gebrauch werden bei der Verbrennung von einer Tonne einer beispielhaften Flächendrainage wiederum ca. 3,0 t CO₂-Äquivalent erzeugt. Werden jährlich ca. 350 t verbrannt entspricht das ca. 1.050 t CO₂. Der durch Flächendrainagen verursachte CO₂-Gesamtausstoß beläuft sich ausgehend von den genannten Zahlen also auf ca. 2.000 t jährlich. Dieser Ausstoß kann durch eine Erhöhung der Recyclingquote reduziert werden. Gemessen an den Gesamtemissionen des Gebäudesektors von 118 Mio. t im Jahr 2020 hätte das zwar vergleichsweise wenig Einfluss, doch berücksichtigt man das tägliche Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsflächen (2018 - 2021 um 55 ha [5]) und das zunehmend genutzte Potential von Dachbegrünungen (jährliches Wachstum um 7,5 % [6]), so ist von einer verstärkten Nutzung an Drainagesystemen auszugehen. Die geplante Entwicklung sollte außerdem als Modellprojekt zur Substitution von erdölbasierten Polymeren für andere Produkte im Bausektor (Stelzlager für Balkon- und Terrassenbeläge, Trägermatten für elektrische Fußbodenheizungen, Entkopplungs- und Trittschallmatte) angesehen werden, so dass bei entsprechender Marktdurchdringung ein relevanter Beitrag zur Verringerung klimaschädlicher Emissionen im Bausektor geleistet werden könnte.

Ziel des Vorhabens war deshalb die Entwicklung eines Flächendrainagesystems mit einem kleineren CO₂-Fußabdruck als bisherige Systeme. Dieses soll aus einem biobasierten oder

rezyklierten Material bestehen und mit den industriell vorhandenen Verfahren zum Produkt verarbeitet werden und die Option zum werkstofflichen Recycling bieten. Dabei lag der Fokus der Forschungstätigkeit sowohl auf der materialeitigen Entwicklung des nachhaltigen recyclingfähigen Drainagesystems als auch auf der Ermittlung geeigneter Prozessparameter zur Herstellung der neuartigen Drainagen mit folgenden Schwerpunkten und Aufgabenstellungen:

- **Auswahl der Materialien zur Abdeckung des erwarteten Lebenszyklus**

Identifizierung von mindestens zwei geeigneten Polymeren, für deren Synthetisierung nachwachsende Rohstoffe verwendet werden oder die Rezyklate sind und deren wesentliche Kennwerte (Literatur) wie Zugeigenschaften, Temperaturbeständigkeit und Medienbeständigkeit im Bereich der aktuell verwendeten fossilen Materialien liegen. Weiterhin werden Preis und Verfügbarkeit als Auswahlkriterium genutzt.

- **Überprüfung verfahrenstechnisch notwendiger Anpassungen im Herstellungsprozess durch die Verwendung der alternativen Polymere**

Die ausgewählten Materialien werden über Extrusion zu Flachfolien in mit dem Industriepartner abgestimmten Schichtdicken verarbeitet und anschließend zu einer quantitativ und qualitativ bewertbaren Form tiefgezogen. Die Flachfolien werden zur Ermittlung der anwendungsrelevanten Kennwerte genutzt. Anhand der ausgeformten Proben wird die Tiefziehfähigkeit der Materialien über die Formgenauigkeit, die Maßhaltigkeit und vorhandene Fehlstellen evaluiert.

- **Optimierung hinsichtlich Eigenschaften, Verarbeitung und Wirtschaftlichkeit**

In Abhängigkeit von den Ergebnissen werden andere Polymere ausgewählt und/oder Compounds der bereits untersuchten Materialien mit Füllstoffen hergestellt und über die Folienherstellung, das Tiefziehen sowie die ausgewählten Prüfungen qualifiziert. Das geeignetste Compound oder eine daraus hergestellte Folie wird dem Industriepartner zur Bewertung zur Verfügung gestellt.

- **Bewertung der Recyclingfähigkeit der neuartigen Flächendrainagen**

Die Möglichkeit der Wiederverwendung herstellungsbedingter Materialabfälle wird im Labormaßstab über die Mehrfachverarbeitung des Granulates ermittelt. Aus diesem thermomechanisch beanspruchten Material werden erneut Folien extrudiert, tiefgezogene Formen hergestellt und entsprechende Prüfungen durchgeführt. Aus dem Vergleich der Eigenschaftsänderungen kann die Recyclingfähigkeit bewertet und der Mengenanteil Regranulat für die Wiederverwendung in Flächendrainagen abgeleitet werden. Ebenso kann das Einsatzpotential für andere Anwendungen abgeschätzt werden.

- **Aufklärung der ökologischen Bilanz der neuartigen Flächendrainagen im Vergleich zu am Markt etablierten Produkten**

Als Bemessungsgröße dient der CO₂-Fußabdruck der Produkte. Dazu wird der Energieverbrauch der einzelnen Herstellungsschritte ermittelt und die Emissionen bei der Synthese und beim Transport über Daten der Hersteller oder vorhandene Datenbanken genutzt.

5 Hauptteil

5.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte und erzielten Ergebnisse

5.1.1 Auswahl der Polymere

Über eine Marktrecherche zu biobasierten Polymeren und Rezyklaten wurden anhand der Verfügbarkeit, des Preises und der technischen Datenblätter die in Tabelle 1 aufgeführten Materialien für die Untersuchungen ausgewählt.

Tabelle 1: Übersicht der ausgewählten Materialien

Kurzzeichen	Beschreibung	Charakteristik
PBS	Polybutylensuccinat	100 % biobasiert und biologisch abbaubar
HDPE	High Density Polyethylen	94 % biobasiert
LDPE 1	Low Density Polyethylen	95 % biobasiert
LDPE 2	Low Density Polyethylen	100 % Post Consumer Rezyklat

PBS ist ein biologisch abbaubarer linearer Polyester, der über die Polymerisation von biobasierter Bernsteinsäure und 1,4 Butandiol entsteht und bezüglich der Mechanik zum Polyethylen vergleichbare Eigenschaften aufweist.

Das biobasierte HDPE und LDPE1 sind sogenannte Drop-in Lösungen, die es ermöglichen, fossil basierte Typen ohne Investitionen und signifikante Verfahrensanpassung zu ersetzen. Das für ihre Herstellung notwendige Ethylen wird aus Zuckerrohr gewonnen. Ein weiterer Vorteil ist die 100%ige Recyclingfähigkeit und die mögliche Nutzung der vorhandenen Infrastruktur für das Sammeln, Sortieren und Aufbereiten der daraus hergestellten Produkte am Ende des Lebenszyklus.

Das LDPE2 wird über die lösemittelbasierte Newcycling®-Technologie aus Post-Consumer-Verpackungsabfällen insbesondere aus Mehrschichtmaterialien gewonnen. Im Gegensatz zum energieintensiven klassischen chemischen Recycling, bei dem die Kunststoffe in ihre Monomere aufgespalten und anschließend neu synthetisiert werden, erfolgt hier ein selektives Lösen der Polyethylen-Fraktion und die anschließende mechanische Trennung von der Feststoff-Fraktion (Abb. 2) [7].

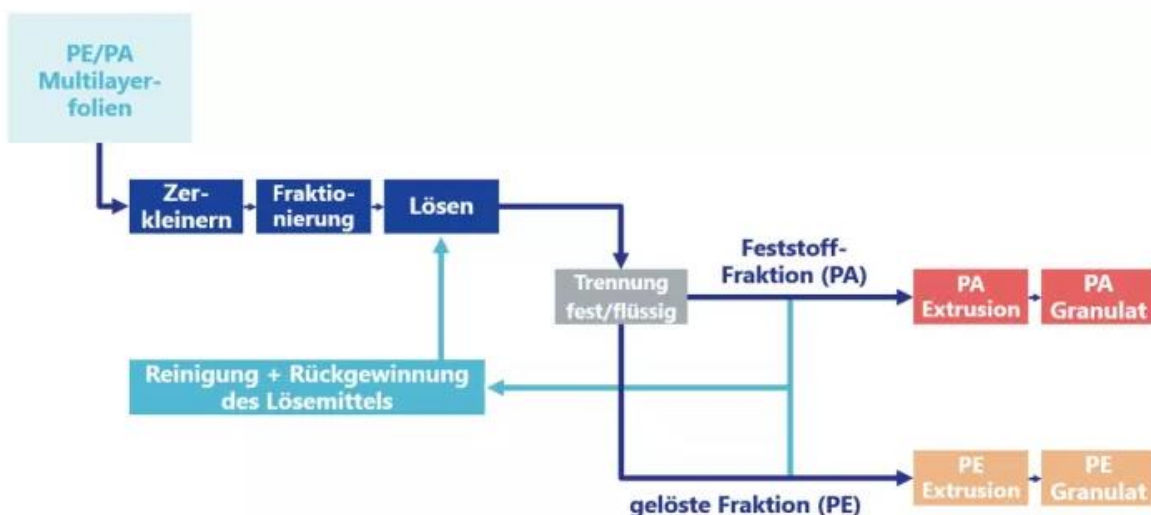


Abb. 2: Prozessschritte der Newcycling®-Technologie (Bild: APK)

Die Eigenschaften der erhaltenen LDPE-Reggranulate liegen im Bereich von Neuware.

5.1.2 Extrusion von Folien verschiedener Dicke

Aus den ausgewählten Polymeren wurden mit einem Einschneckenextruder und einer nachgeschalteten 300 mm-Breitschlitzdüse Folien in drei verschiedenen Dicken (0,5 mm, 1,0 mm und 2,0 mm) als Rollenmaterial hergestellt (Abb. 3).

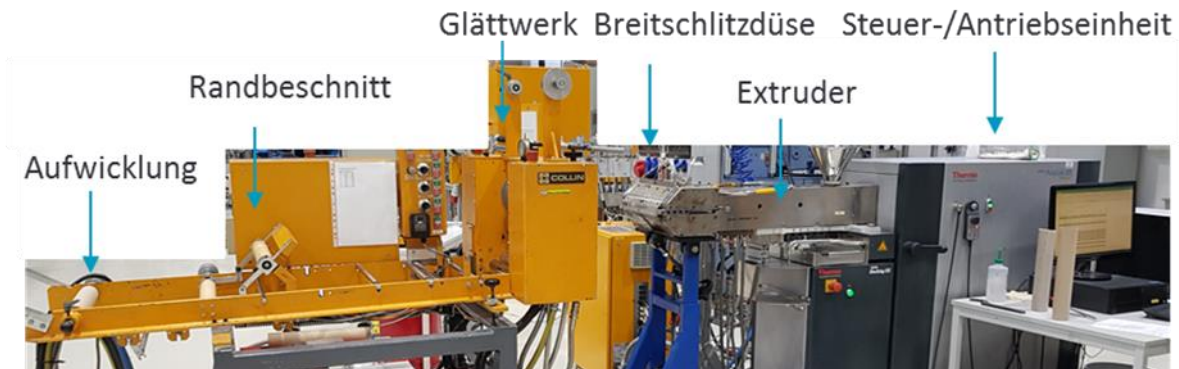


Abb. 3: Konfiguration der Extrusionsanlage zur Folienherstellung

Alle Materialien konnten problemlos über die Extrusion zu homogenen Folien verarbeitet werden. Die Einstellung der Temperatur an den vier Heizzonen des Extruderzylinders und der Drehzahl konnte anhand vorliegender Standard-Werte vorgenommen werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Einstell- und Prozesskennwerte der Extrusion der Folien (0,5 mm/ * 1,0 mm/ ** 2,0 mm)

	PBS	HDPE	LDPE1	LDPE2
Temperatur [°C] Zone 1	120	180	120	135
Temperatur [°C] Zone 4/ Düse	150	210/230	170	185/195
Drehzahl [Upm]	70/120*/170**	130/160*/160**	80/130*/190**	80/130*/150**
Massedruck [bar]	23/27*/28**	96/93*/72**	45/45*/52**	66/70*/60**
Massetemperatur [°C]	153	214/233**	174	188/198**
Drehmoment [Nm]	13/18*/20**	54/56*/53**	18/19*/20**	36/46*/45**

5.1.3 Tiefziehen der Folien

Beim Tiefziehen (Thermoformen, Vakuumformen) werden die Folien der thermoplastischen Materialien mithilfe von Temperatur, Unterdruck und einem entsprechenden Werkzeug umgeformt. Die eingespannte Folie wird bis zur Erweichungstemperatur erwärmt und anschließend mittels Unterdrucks über das Thermoformwerkzeug gezogen. Dabei nimmt die Folie die Werkzeugform an. Anschließend wird das Thermoformteil abgekühlt und kann formstabil entformt werden.

Das für die Herstellung der Tiefziehformen verwendete manuell bedienbare Kleinformgerät hat eine Arbeitsfläche von 250 mm x 350 mm und kann bis zu 3 mm dicke Folien verarbeiten. Als Formwerkzeug wurde ein Besteckkasten mit einer Ziehtiefe von 20 mm verwendet (Abb. 4).



Abb. 4: Tiefziehgerät KFG37 und verwendete Tiefziehform ‚Besteckkasten‘

Für die drei extrudierten Foliendicken pro Material wurden entsprechend Tiefziehversuche mit Ermittlung der notwendigen Parameter (Tabelle 3) zur Ausformung falten- und blasenfreier formgetreuer Muster durchgeführt. Alle vier Kunststoffe konnten über das Tiefziehen verarbeitet werden, wobei für das PBS die Ermittlung der Parameter am zeitintensivsten war.

Tabelle 3: Tiefziehparameter für Muster aus 1,0-mm-Folien

Material	Heizleistung [%] (von 2,5 kW)	Dauer [s]	Druck [bar] (-)
PBS	60	60	0,60
HDPE	100	60	0,92
LDPE1	100	30	0,92
LDPE2	100	40	0,92

5.1.4 Bewertung der anwendungstechnischen Eigenschaften

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften wurden aus den extrudierten Folien in Längs- und Querrichtung Schulterproben (Prüfkörpertyp 5A) gestanzt und mittels Zugversuch nach DIN EN ISO 527-2 geprüft. Zur Bewertung und zum Vergleich erfolgte die Entnahme solcher Probekörper ebenfalls aus zwei verschiedenen Referenz-Flächendrainagen. Die Kraft-Dehnungs-Diagramme verdeutlichten, dass die beiden Referenzproben ein Deformationsverhalten unter Zugbeanspruchung von zäh (Referenz 1) bis spröd (Referenz 2) abdeckten. Hier korrespondierten die HDPE-Folie (Quer) und die PBS-Folie (Längs und Quer) mit ihrem Deformationsverhalten am besten. Der Vergleich der Kennwerte E-Modul, Zug - und Bruchfestigkeit sowie der Bruchdehnung (Abb. 5) ergab,

- dass das PBS hinsichtlich seines Moduls und seiner Bruchdehnung eine Alternative für Referenz 1 ist. Die höheren Festigkeiten von PBS stellen keinen Nachteil dar.
- dass sowohl das LDPE1 als auch das LDPE2 zwar in den Festigkeitswerten mit den Referenzmaterialien nahezu gleichwertig sind, aber in Bezug auf den E-Modul und die Bruchdehnung nicht die Anforderungen erfüllen.

- dass das Niveau der Kennwerte Modul und Bruchdehnung des HDPE dem von Referenz 2 entspricht. Auch hier kann die höhere Zugfestigkeit von Vorteil sein. Der im Vergleich zu den anderen Materialien starke Abfall von der Zug- zur Bruchfestigkeit ist für die Bewertung nicht relevant, da das durch die starke Einschnürung der Proben verursacht wird.

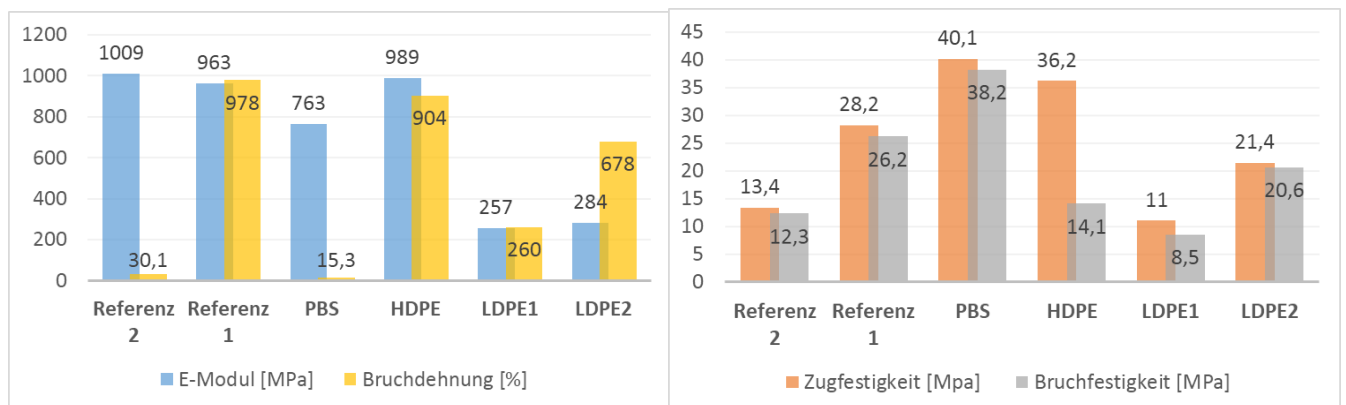


Abb. 5: Kennwerte des Zugversuches der vier alternativen Materialien (1,0 mm; quer) und zweier fossil basierter Referenzen

Zur weiteren Analyse kam die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) zum Einsatz. Diese ermöglicht eine umfassende Charakterisierung der viskoelastischen Eigenschaften von Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur und/oder der Frequenz. Ermittelt werden der Speicher- (E') und Verlustmodul (E'') als Maß für die vom Polymer aufgenommene (elastischer Anteil) und dissipierte Energie (viskoser Anteil) sowie der Dämpfungsfaktor $\tan \delta$ als Verhältnis von Verlust - zu Speichermodul. Anhand des Temperaturverlaufes dieser Kennwerte, der mit der molekularen Beweglichkeit der Polymerketten verbunden ist, können Schlussfolgerungen zum Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten, zur Morphologie und zu Phasenübergängen (Parameter Glasübergangstemperatur) von Polymeren getroffen werden. Die Prüfkörper wurden einer in Frequenz (1 Hz) und Amplitude (40 μm) konstanten, sinusförmig wechselnden Zugbeanspruchung im Bereich von $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Aufheizgeschwindigkeit 3 K/min) ausgesetzt. Der Kurvenverlauf des Speichermoduls (signifikanter Abfall) und des Verlustmoduls (Maximum) der untersuchten Materialien zeigte, dass bereits bei Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ das PBS und beide LDPE-Typen aus dem Glasbereich in den Glasübergangsbereich wechseln. Während die Festigkeit von LDPE1 und LDPE2 bis zur Endtemperatur von $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ kontinuierlich abnimmt, bleibt die Festigkeit des PBS bis $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ relativ

konstant und auf höherem Niveau (Abb. 6). Das HDPE erwies sich im Bereich von -20 °C bis +80 °C als das Material mit dem höchsten Speichermodul. Die Glasübergangstemperatur liegt bei 41 °C und der Abfall des Speichermoduls im untersuchten Temperaturbereich ist mit 88 % am niedrigsten (Tabelle 4).

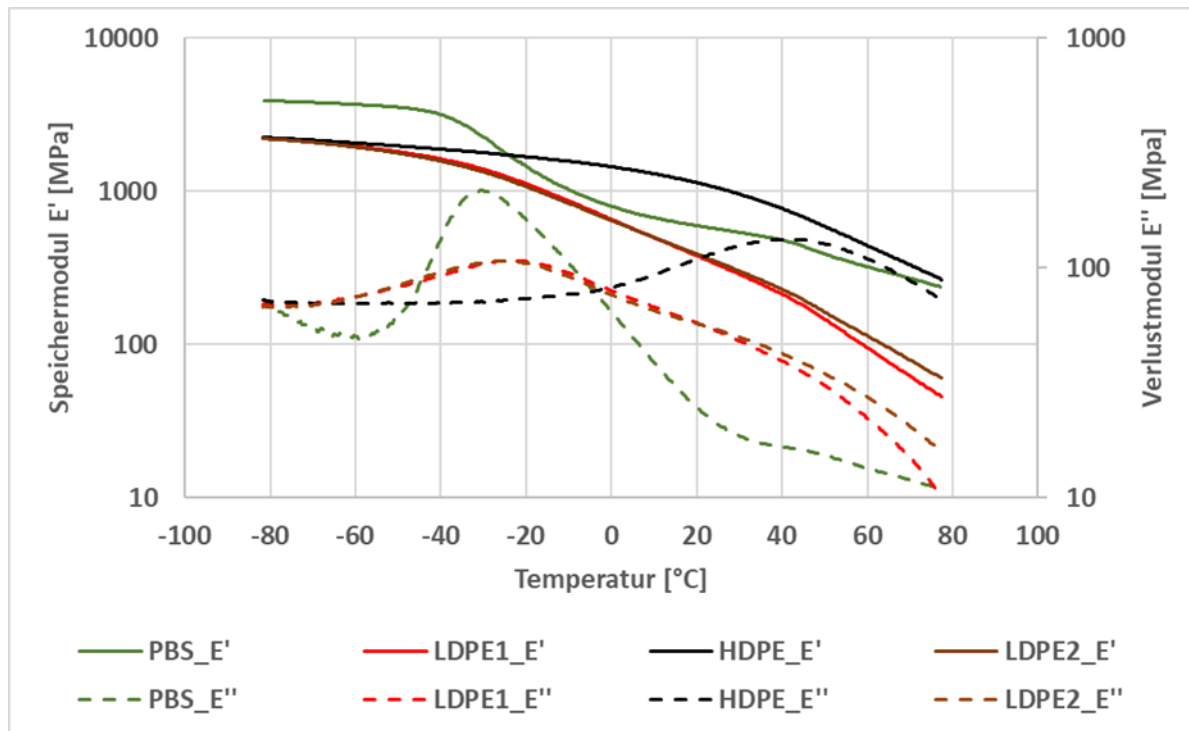


Abb. 6: Speicher- und Verlustmodul der Materialien, ermittelt mit DMA

Tabelle 4: Glasübergangstemperatur T_g und Speichermoduln bei verschiedenen Temperaturen

Material	T_g [°C]	E'' Max	E' [MPa]	E' [MPa]	E' [MPa]	E' [MPa]
			$T = -80$ °C	$T = 0$ °C	$T = 25$ °C	$T = +80$ °C
PBS	- 30,6		3891	795	566	237
HDPE	+ 41,0		2233	1439	1048	266
LDPE1	- 24,0		2208	654	331	45
LDPE2	- 24,9		2192	643	344	60

Interessant ist auch, dass sich das LDPE2 bis zu Temperaturen von 20 °C in der Höhe und Temperaturabhängigkeit von Speicher- und Verlustmodul wie das LDPE1 verhält. Erst bei höheren Temperaturen zeigte es einen leicht höheren Speichermodul.

Weitere durchgeführte Untersuchungen zur Materialevaluierung unter an den Flächendrainagen angelehnten Einsatzbedingungen waren die Überprüfung der Kältebeständigkeit unter Biegebeanspruchung, die Maßhaltigkeit bei Wärmelagerung und die Gewichtsveränderung bei Wasserlagerung (Tabelle 5).

Tabelle 5: Materialbewertung nach Kälte-, Wärme- und Wasserlagerung

Material	Kältebeständigkeit	Wasserbeständigkeit Gewichtsänderung [%]/ Farbe*		Wärme/ Maßhaltigkeit Längenänderung [%]
	DIN EN 1876 - 1/Biegung Lagerung 4 h/ - 20 °C	in Anlehnung an DIN EN ISO 175 Lagerung 168 h/ 40 °C/ H ₂ O		in Anlehnung an DIN 53377 Lagerung 7 Tage/ 40 °C
PBS	Keine Risse oder Brüche	0,69	4 - 5/ Flecken	0,2
HDPE		0,02	4 - 5/ Flecken	0,2
LDPE1		0,03	4 - 5/ Flecken	0,2
LDPE2		0,04	4 - 5/ Belag	0,4

*Farbprüfung mit Graumaßstab DIN EN 20105-A02;
4 - 5 kaum Veränderung

Die Ergebnisse weisen eine sehr gute Beständigkeit der Materialien unter den untersuchten Lagerungs- und Beanspruchungsbedingungen aus. Als problematisch muss jedoch die Gewichtsänderung des PBS bei Wasserlagerung mit 0,69 % und die höhere Längenänderung des LDPE2 nach der Wärmelagerung eingestuft werden.

5.1.5 Bewertung der Tiefziehfähigkeit und Qualität der Formteile

Die aus den vier Materialien und den drei Folienstärken tiefgezogenen Formen wurden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Homogenität der Abformung begutachtet. Dazu erfolgte neben der visuellen Bewertung die Messung der Wandstärke an ausgewählten Stellen der Form (Abb. 7). Für die 0,5 mm dicken Folien zeigte sich, dass unabhängig vom Materialtyp die resultierenden Wandstärken für eine mechanische Belastung zu gering und zu ungleichmäßig ausgeformt wurden. Des Weiteren musste bei den aus den 2,0 mm dicken Folien gezogenen Mustern festgestellt werden, dass die Abformgenauigkeit sich deutlich verschlechterte.

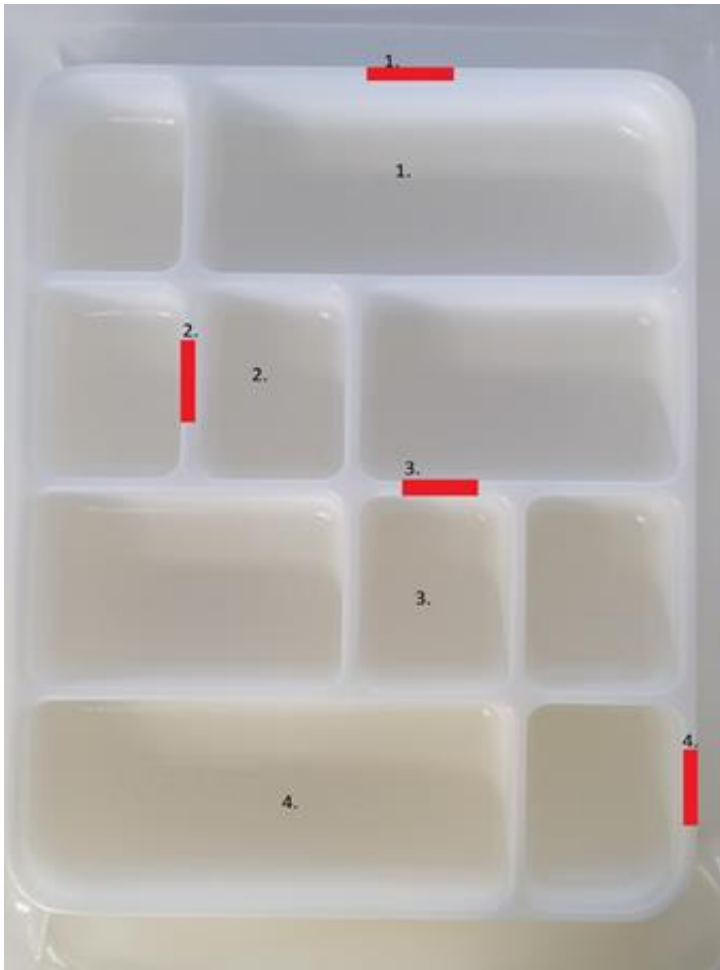


Abb. 7: Tiefziehteil Besteckkasten und Messtellen Wand- und Bodendicke

Die mit einem magnetinduktiven Schichtdickenmessgerät bestimmten Wand- und Bodendicken der aus 1,0 mm dicken Folien tiefgezogenen Besteckkästen sind in Abb. 8 dargestellt. Für alle Polymere ergab sich im Kurvenverlauf die charakteristische Wannenförmigkeit. Diese wurde durch Schwankungen in der Verteilung von Temperatur und/ oder des Vakuums verursacht. Ausgehend von dem für handelsübliche Flächendrainagen maximal zulässigen Dickenunterschied von 0,3 mm musste jedoch festgestellt werden, dass das HDPE mit 0,6 mm zu große Inhomogenitäten in der Wand- und Bodenstärke hat. Die anderen drei Materialien erfüllten den Qualitätsanspruch, wobei sich das PBS hinsichtlich Homogenität der Wand- und Bodendicke gegenüber den beiden LDPE-Typen sehr positiv abhob.

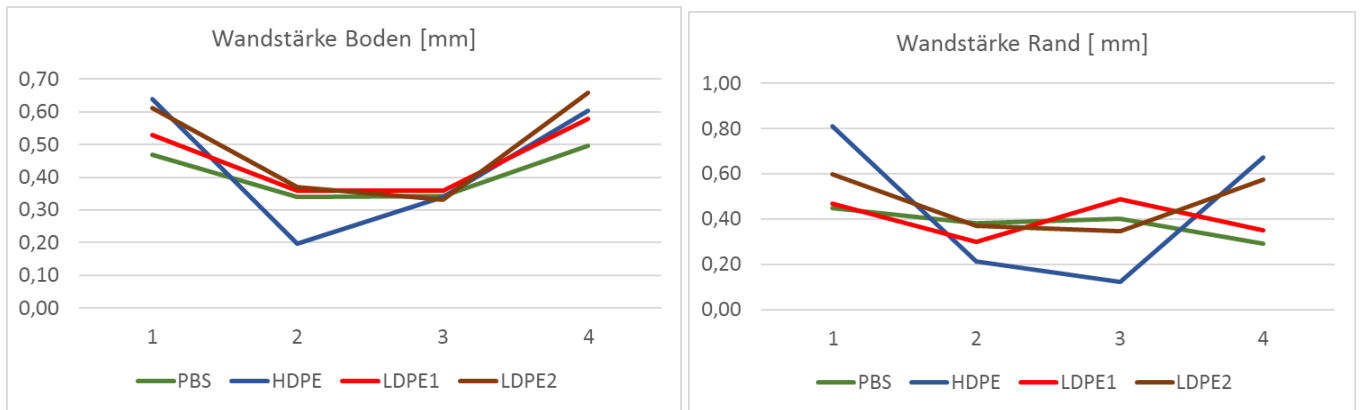


Abb. 8: Wandstärken der tiefgezogenen Bauteile an den verschiedenen Messstellen

Aufgrund der festgestellten geräte- und werkzeugspezifischen Einflüsse und der im Vergleich zu den industriellen Drainagen größeren Ziehtiefe wurden zur weiteren Begutachtung der Tiefziehfähigkeit über die additiven Fertigungsverfahren FDM- und Stereolithographie (SL) zwei Drainage-Modelle gefertigt (Abb. 9) und Tiefziehversuche durchgeführt.

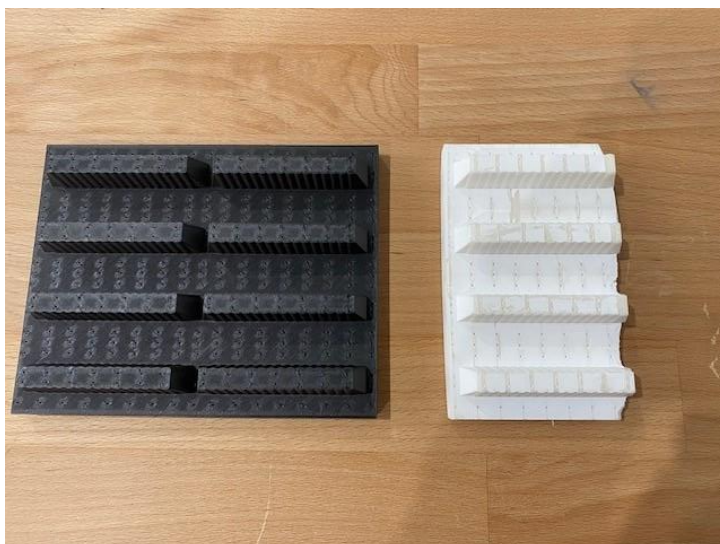


Abb. 9: 3D-gefertigte Tiefziehform Drainage - links: FDM (Material Onyx) und rechts: SL (Material Rigid10K)

Zur Qualitätsbewertung wurden die Abformgenauigkeit, die Dickenunterschiede und die Stabilität bzw. Druckfestigkeit bewertet. Auch bei diesen Versuchen konnten unabhängig vom Material die Folien mit einer Dicke von 0,5 mm verworfen werden, da die tiefgezogenen Muster mit Wandstärken zwischen 0,1 und 0,2 mm zu instabil waren. Ebenso zeigte sich erneut, dass sich bei Foliendicken von 2,0 mm die Präzision der Abformung stark verschlechterte. Die aus 1,0 mm tiefgezogenen Drainage-Muster wiesen die beste Qualität auf und konnten geprüft werden (Abb. 10, Tabelle 6).



Abb. 10: Beispiele für tiefgezogene Drainagen; links: HDPE + LDPE1 1,0 und 2,0 mm; rechts: PBS 2,0 mm

Tabelle 6: Bewertung der tiefgezogenen Drainagen

	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	Dicke Δ [mm] max	Stabilität Druck 76 kPa
PBS	X Festigkeit	✓	X Abform- genauigkeit	0,32	> 360 h
HDPE		✓ ✓ ✓ ✓		0,18	
LDPE1		✓ ✓		0,21	
LDPE2		✓ ✓		0,22	

Die aus den HDPE hergestellten Musterdrainagen schnitten in Bezug auf die Abformgenauigkeit und Homogenität der Wanddicken (maximaler Unterschied 0,18 mm) am besten ab. Auch die LDPE1- / LDPE2-Drainagen erfüllen das Qualitätskriterium maximale Wanddickenunterschiede von 0,3 mm. Allerdings erkennt man an den tiefgezogenen Stegen deutliche Verformungen (Abb. 10). Am stärksten ausgeprägt war dies bei den PBS-Drainagen, so dass in Verbindung mit dem Dickenunterschied von über 0,3 mm dieses Material am schlechtesten bewertet werden muss. Hinsichtlich der Druckstabilität verhielten sich alle Materialien gleichwertig (Abb. 11).

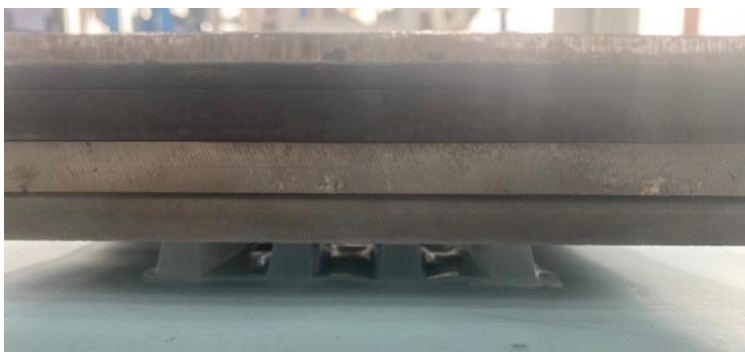


Abb. 11: Test Druckfestigkeit der Flächendrainagen

5.1.6 Bewertung der Recyclingfähigkeit

Die im Projektantrag ursprünglich vorgesehene Vorgehensweise zur Untersuchung der Recyclingfähigkeit wurde im Projektverlauf mit dem Projektpartner neu definiert. Hintergrund war die Tatsache, dass mit einer Lebensdauer von in der Regel mehr als 15 Jahren zurückgebaute Drainagen nicht extra gesammelt, gesäubert und zu Rezyklat aufbereitet werden. Für die Materialevaluierung entscheidender ist die Möglichkeit, die bei der Produktion der Drainagen entstehenden Abfälle aufzubereiten und in den Herstellungsprozess zurückzuführen. Deshalb wurden zwei Materialien ausgewählt – das HDPE und das LDPE2 – und diese über Mehrfachextrusion thermomechanisch beansprucht (Abb. 12)



Abb. 12: Einschneckenextruder mit Strangdüse, Wasserbad (links) und Granulator (rechts)

Über einen Einschneckenextruder mit nachgeschalteter Strangdüse (Durchmesser 3 mm) und folgendem Wasserbad konnte ein Kunststoffstrang generiert werden, der über einen Granulator wieder in verarbeitungsfähiges Granulat überführt wurde. Insgesamt fanden sechs solcher Durchläufe statt. Im Anschluss daran wurden mit dem in 5.1.2 beschriebenen Versuchsaufbau erneut Folien extrudiert. Als Untersuchungsmethoden zur Ermittlung des Abbaugrades der Materialien kamen die Schmelzindex (MFI)- und DSC-Messung am Granulat sowie der Zugversuch, die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) und die Ermittlung des Flächengewichtes an den Folien zum Einsatz. Des Weiteren wurden mit Hilfe der 3D-

gedruckten Tiefziehformen Musterdrainagen hergestellt. Der MFI ist ein Maß für die Fließfähigkeit einer Kunststoffschmelze und kann bereits minimale Veränderungen in der Molekulargewichtsverteilung oder Schmelzmorphologie detektieren. Für das sechsfach verarbeitete LDPE2-Granulat ergab sich ein Anstieg des Schmelzindexes, was auf eine verringerte Viskosität infolge von Abbauprozessen in Form von Kettenspaltungen schließen lässt. Im Gegensatz dazu konnte beim HDPE keine Veränderung des MFI-Wertes festgestellt werden (Abb. 13).

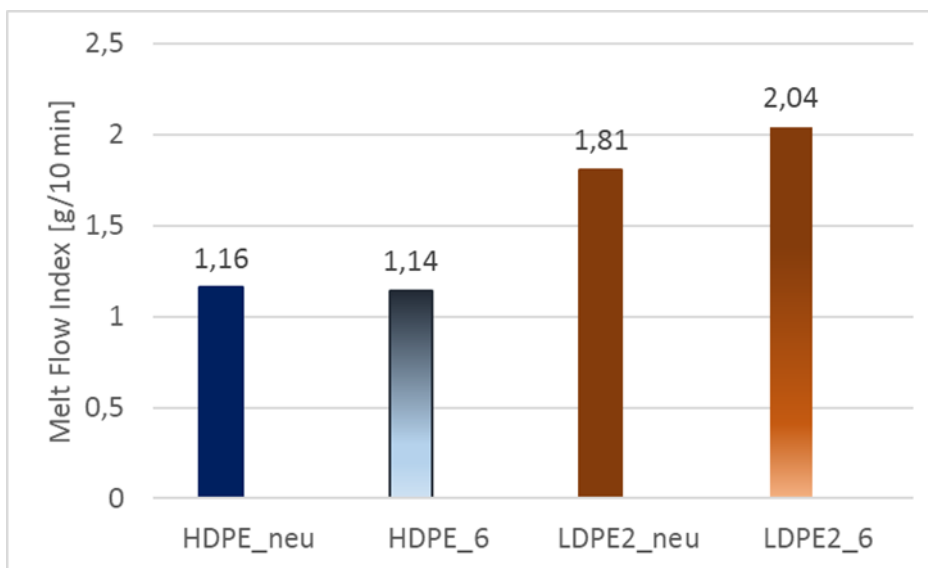


Abb. 13: Vergleich der MFI-Werte (Messtemperatur 190 °C/ Gewicht 2,16 kg)

Bei der Betrachtung des Schmelz- und Abkühlverhaltens musste jedoch anhand der Verschiebung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur zu höheren bzw. niedrigeren Temperaturen auch für das HDPE auf Veränderungen der Kettenstruktur und -beweglichkeit geschlossen werden (Tabelle 7). Obwohl bei den DSC-Messungen keine signifikante Veränderung der Kristallinität des HDPE / LDPE2 durch die thermomechanische Schädigung ableitbar war, zeigte jedoch der Vergleich der Festigkeits- und Dehnungswerte sowie der dynamisch-mechanischen Kennwerte Unterschiede zwischen den Folien aus Neuware und aus mehrfach verarbeitetem Granulat.

Tabelle 7: Vergleich der DSC-Ergebnisse von Neugranulat und 6-fach verarbeitetem Granulat

	T _{g1} [°C]	T _{s1} [°C]	T _{s2} [°C]	H _{s1} [J/g]	H _{s2} [J/g]	T _k [°C]	H _k [J/g]
HDPE		136	137	150	177	114	173
HDPE-6		143	140	149	176	111	174
LDPE2	57	113	109/118*	71	80	104/96*	78
LDPE2_6	40	116	111/121*	72	84	104/95*	76

*Doppelpeak

Die Festigkeitswerte E-Modul, Zug- und Bruchfestigkeit reduzierten sich bis maximal 28 %, wobei für das HDPE die Zugfestigkeit und für das LDPE2 der E-Modul am stärksten betroffen war. Im Vergleich dazu fielen die Bruchdehnungen nur geringfügig ab (Abb. 14).

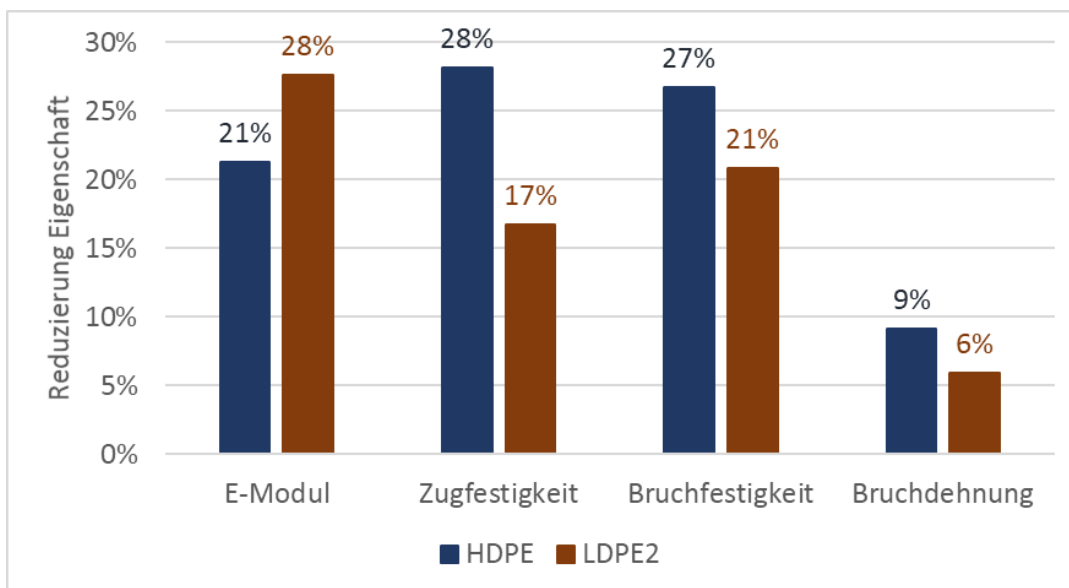


Abb. 14: Prozentuale Veränderung der Festigkeits- und Dehnungswerte aus dem Zugversuch

Beim HDPE zeigte sich, dass das höhere Niveau des Speichermoduls der Folien aus Neugranulat mit ansteigender Temperatur verschwindet. Die aus dem Verlustmodul abgeleitete Glasübergangstemperatur verschob sich minimal um knapp 4 °C zu höheren Temperaturen. Die viskoelastische Charakteristik des HDPE hatte sich aber nicht signifikant verändert, die Temperaturabhängigkeit von Speicher- und Verlustmodul und somit des Verlustfaktors blieb in seiner Charakteristik erhalten. Neben den kleineren Moduln und der geringfügigen Veränderung des Maximums des Verlustmoduls zu höheren Temperaturen war beim mehrfach

verarbeiteten LDPE2 eine signifikante Verschiebung des Peaks des Verlustfaktors um ca. 20 °C zu tieferen Temperaturen ein weiteres Indiz für eine Veränderung in der Kettenbeweglichkeit (Abb. 15).

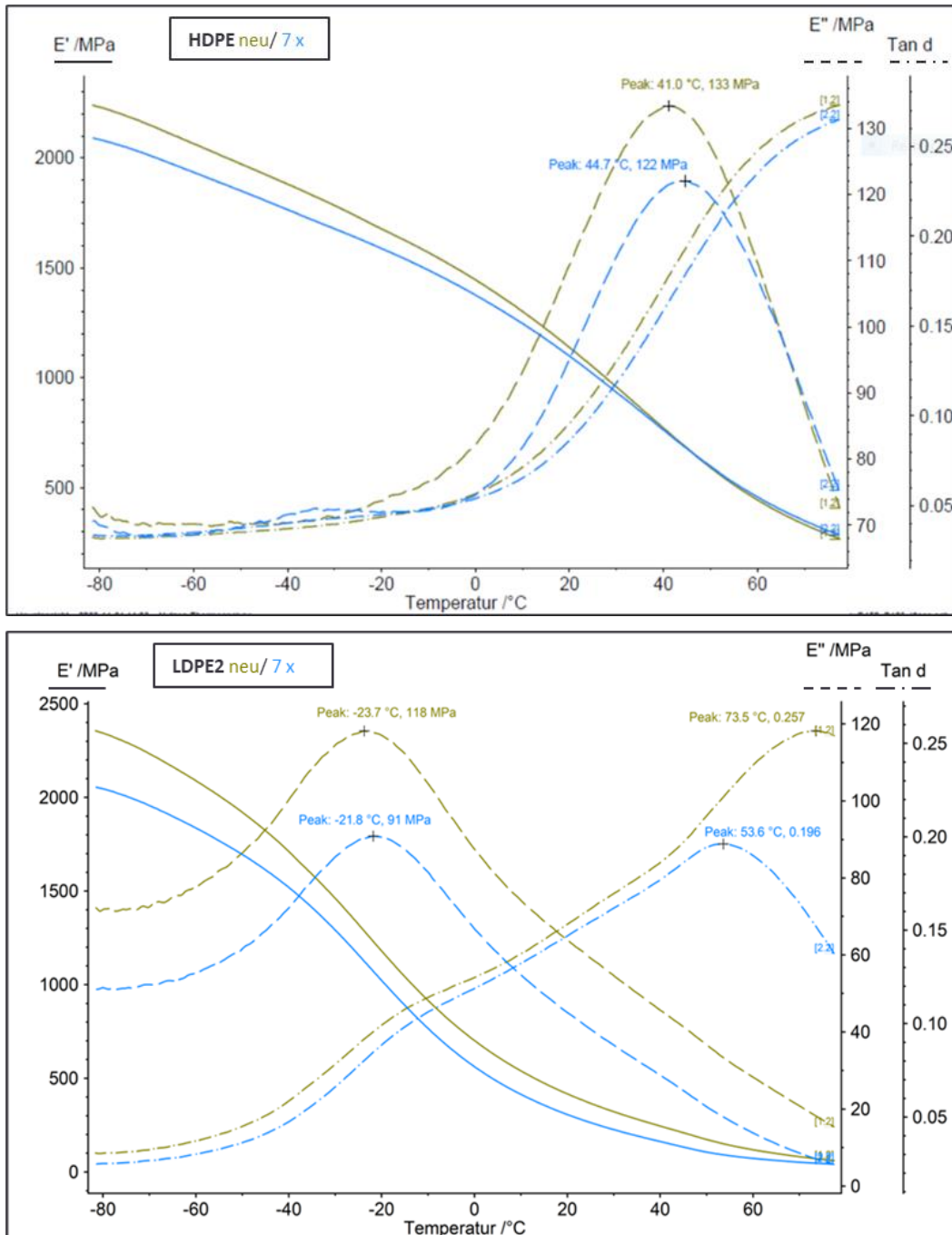


Abb. 15: DMA-Ergebnisse der Folien neu (hellgrün) und 7fach verarbeitet (blau) im Vergleich: oben HDPE / unten LDPE2

Die Flächengewichte der Folien aus mehrfach verarbeitetem Granulat reduzierten sich um 10 %, was aber keinen negativen Einfluss auf die Tiefziehfähigkeit hatte. Beim HDPE konnten die gleichen Parameter (Heizleistung und Zeit) angewandt werden, während beim LDPE2 mit

kürzeren Zeiten gearbeitet werden musste. Trotz dieser Optimierung zeigten die hergestellten LDPE2-Musterdrainagen eine Verschlechterung der Abformgenauigkeit (Abb. 16).

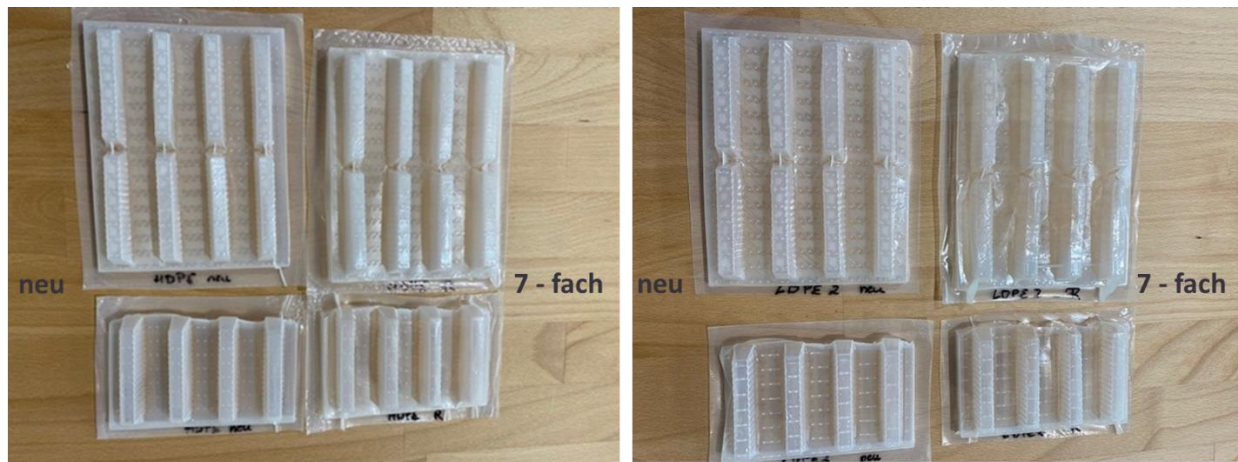


Abb. 16: Vergleich der Musterdrainagen aus Neuware und mehrfach verarbeitetem HDPE (links) und LDPE2 (rechts)

Aus dem Grad der Veränderungen der untersuchten Eigenschaften kann abgeleitet werden, dass das LDPE2 wesentlich stärker als das HDPE durch die thermomechanische Beanspruchung verändert wurde. Das Ausmaß der Eigenschaftsveränderung durch die Mehrfachverarbeitung war aber so gering, dass für beide Materialien auf die Option des werkstofflichen Recyclings mit einer Wiedergabe der Rezyklate von maximal 30 % (HDPE) bzw. 10 % (LDPE2) bei der Herstellung der Drainage geschlossen werden kann.

5.1.7 Ermittlung des CO₂-Fußabdruckes der Materialien

Für die Ermittlung des Carbon Foot Print (CFP) wurde von einem Cradle-to-Gate-System ausgegangen, so dass die Herkunft der Rohstoffe, der Transport, die Herstellung des Granulates sowie die Produktion der Flächendrainagen über die Extrusion und das Tiefziehen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen analysiert wurden (Abb. 17). Nicht mit einbezogen wurde die Wiederverwendung der bei der Produktion entstehenden Abfälle (Post Industrial Rezyklat) sowie die Nutzungs- und Verwertungsphase. Für die Kalkulation war eine Umrechnung von Masse zu Fläche notwendig. Aus der eingesetzten Menge an Kunststoff wurden für alle Materialien eine vergleichbare Folien-Fläche von 4,5 m² mit einer Foliendicke von 1,0 mm erzeugt und daraus die Musterdrainagen tiefgezogen. Die Primärdaten der Herstellung konnten erfasst und genutzt werden (Tabelle 8).

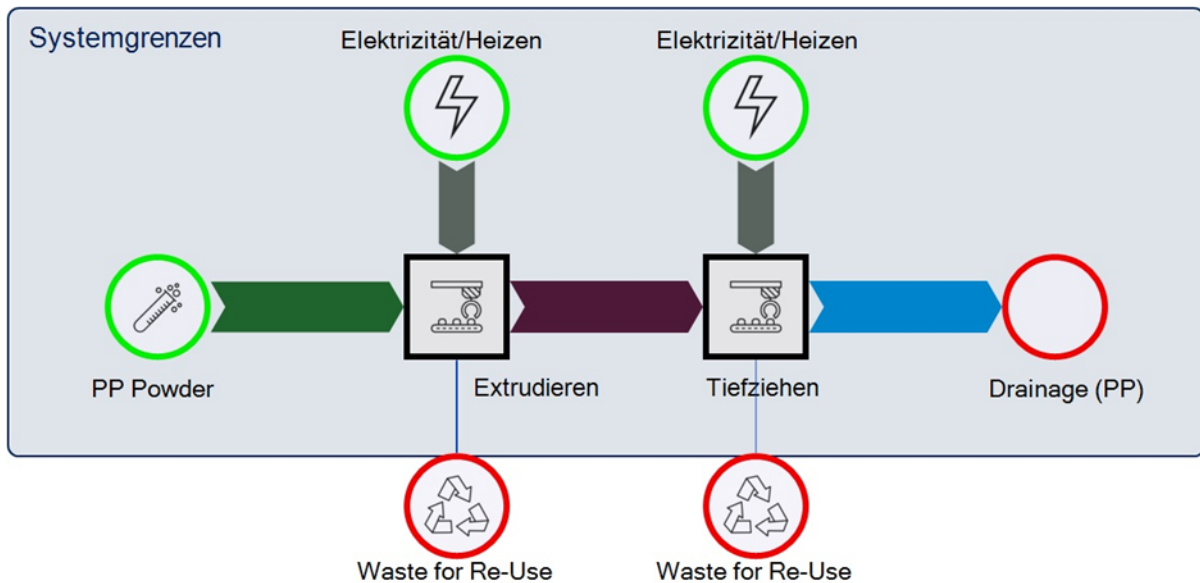


Abb. 17: Schematische Darstellung des untersuchten Systems und der Systemgrenzen (am Beispiel der Referenz aus PP)

Tabelle 8: Primärdaten für die Cradle-to-Gate-Analyse

Prozessparameter		HDPE	LDPE 1	LDPE 2	
Temperatur	Extrusion	180 - 210	120 - 170	135 - 185	°C
Drehzahl	Extrusion	130	80	80	U/min
Heizleistung	Tiefziehen	100	100	100	%
Zeit/Stk	Tiefziehen	60	30	40	s
Energieverbrauch		HDPE	LDPE 1	LDPE 2	
Extrusion	Heizen	2,95	2,05	2,16	kWh
	Antrieb	2,75	2,06	2,29	
Tiefziehen	Heizen	5,70	4,12	4,46	
SUMME		11,40	8,23	8,91	

Die weiteren Daten für die Berechnung des CFP stammten aus der LCA-Datenbank ecoinvent 3.9.1, wissenschaftlichen Publikationen [7] und Herstellerangaben [8]. Für den Transport wurden folgende Annahmen getroffen:

- Transport mit Schiffscontainer von Hersteller/Brasilien – Hafen Rotterdam (10.500 km)
- Transport mit LKW – Container <32 t von Hafen Rotterdam – zu Lieferanten Deutschland (210 km)
- Transport mit LKW 3,5-7,5 t von Lieferanten – Verarbeiter (600 km).

Der für die vier Materialien berechnete Carbon Foot Print setzt sich aus zwei Beträgen zusammen – dem CFP für das Granulat und dem CFP für die Herstellung der Flächendrainage. Wie aus Abb. 18 deutlich wird, profitieren das biobasierte HDPE und LDPE1 aus der CO₂-Gutschrift für den landwirtschaftlichen Anbau des Zuckerrohrs, dem die Speicherung von CO₂ aus der Umgebungsluft für das Wachstum der Pflanzen angerechnet wird. Da in der Literatur [7] ein für die Polymerisation des Ethylens zu LDPE1 im Vergleich zum HDPE höherer CO₂-Wert angegeben wird, ergeben sich die dargestellten Unterschiede im CFP der biobasierten Granulate.

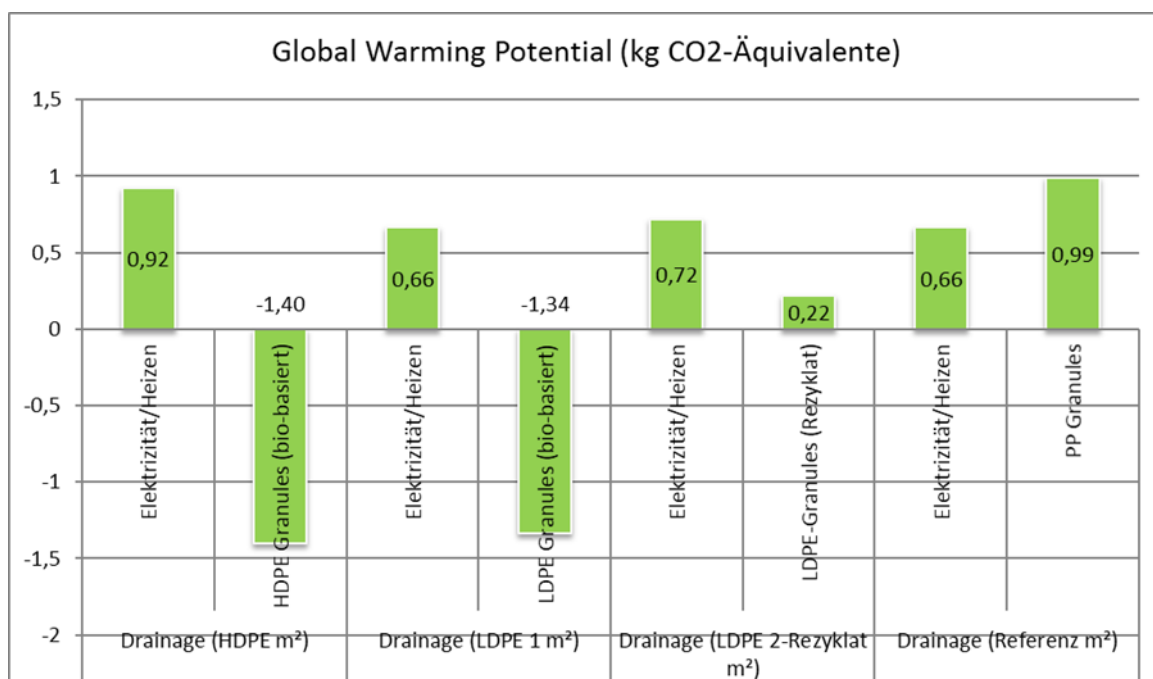


Abb. 18: CFP des Granulates und CFP der Herstellung der Flächendrainage

Sowohl das chemisch recycelte LDPE2 als auch das petrochemisch basierte Polypropylen (PP) haben den Vorteil des gespeicherten Kohlenstoffs nicht. Die Herstellung des chemisch recycelten LDPE2-Granulates ist aber mit einem 4,5-fach geringeren CO₂-Ausstoß verbunden als die Herstellung des Polypropylens. Unter Berücksichtigung des Energieverbrauches beim Extrudieren und Tiefziehen, der für das HDPE am größten und für das LDPE1 sowie das PP am kleinsten ist, ergeben sich die in Abb. 19 dargestellten finalen CFPs. Am ökologisch wertvollsten ist demnach eine Flächendrainage aus LDPE1 dicht gefolgt von einer aus HDPE. Der ökologische Vorteil beim Einsatz von chemisch recyceltem LDPE2 gegenüber PP ist rein rechnerisch gegeben. Allerdings wäre hier eher zu empfehlen, PP-Rezyklate (PIR und PCR)

bei der Drainage-Herstellung zu verwenden, wodurch der CPF von 1,65 kg/m² CO₂-Äquivalent je nach Höhe des Rezyklat-Anteiles auch halbiert werden kann.

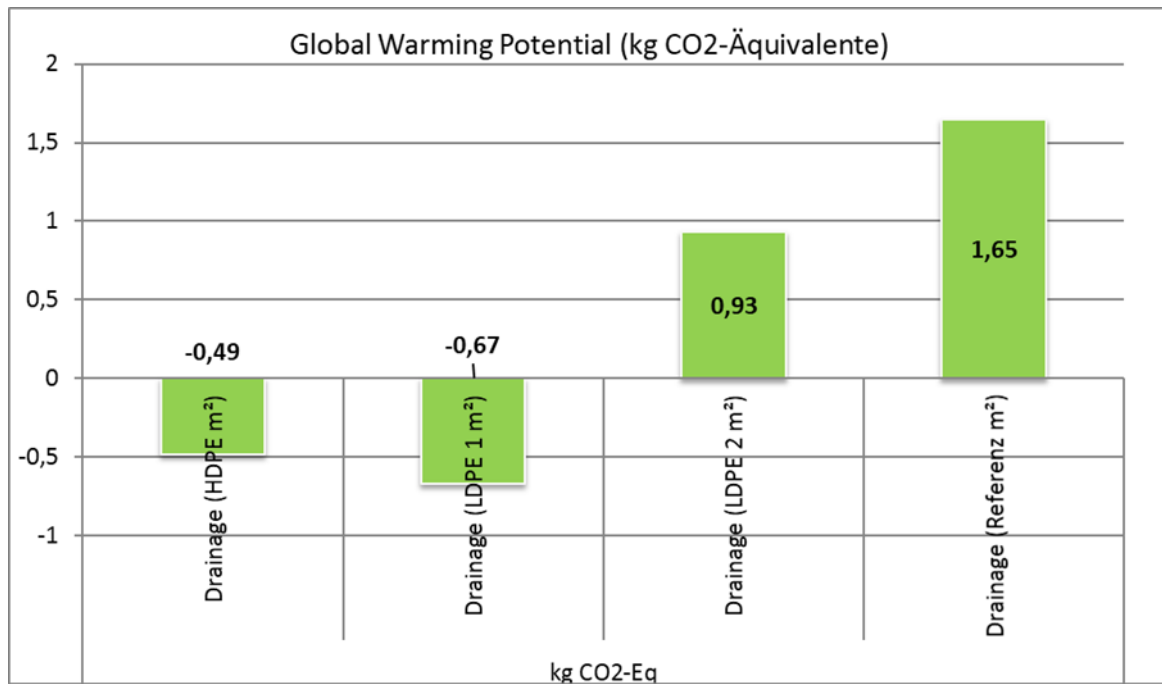


Abb. 19: Carbon Foot Print der Materialien im Vergleich zur Referenz PP

5.2 Diskussion der Ergebnisse mit Bezug auf die Zielsetzung

Die dargelegten Ergebnisse wurden genutzt, um eine gesamtheitliche Bewertung der vier Materialien im Hinblick auf ihre Eignung zur Substitution der bisher eingesetzten erdölbasierten Polyolefine vorzunehmen. Dazu erfolgte die Einstufung der ermittelten Eigenschaften von 1 (bestes Material) bis 4 (schlechtestes Material). Als zusätzliches Kriterium kam der Granulat-Preis mit zur Anwendung (Tabelle 9). Es zeigte sich, dass das PBS am schlechtesten geeignet ist. Der Unterschied in der Gesamtnote des PBS und den beiden LDPE-Typen war jedoch nur minimal, weshalb eine Wichtung zumindest der mit der Note 4 bewerteten Eigenschaften sinnvoll erschien. Insbesondere die Gefahr des hydrolytischen Abbaus unter Einsatzbedingungen sowie die stark eingeschränkte Recyclingfähigkeit des biologisch abbaubaren PBS muss als sehr kritisch eingestuft werden.

Tabelle 9: Gesamtbewertung der untersuchten Kunststoffe als geeignetes Substitutionsmaterial

	PBS	HDPE	LDPE1	LDPE2
Festigkeit/ Dehnung	1	1	4	4
DMA	2	1	4	3
Kältebeständigkeit	1	1	1	1
Wärmebeständigkeit	1	1	1	2
Wasserbeständigkeit	4	1	2	2
Tiefziehen	4	1	2	2
Recycling	4	1	2	2
Granulat-Preis	4	2	2	1
CO ₂ -Fußabdruck	3	2	1	4
GESAMT	2,7	1,2	2,1	2,3

Ebenso müssen beide LDPE-Typen als Ersatzmaterial aufgrund des Niveaus der mechanischen Eigenschaften insbesondere der Festigkeiten ausgeschlossen werden. Natürlich ist eine Optimierung durch entsprechende Füllstoffe möglich. Allerdings wären so hohe Massenanteile notwendig, dass sich sowohl die anderen relevanten anwendungstechnischen Eigenschaften negativ verändern als auch die Tiefziehfähigkeit verschlechtern würde. Das größte Potential als Substitutionsmaterial hat somit das HDPE. Eine Feinjustierung der mechanischen Eigenschaften des HDPE mit Füllstoffen wäre empfehlenswert. Die erforderlichen Masseanteile würden sich auch positiv auf den Materialpreis auswirken, der das 4,3-fache der zurzeit genutzten Polymere beträgt.

5.3 Bewertung der Vorhabensergebnisse

Drei biobasierte Polymere und ein chemisch recyceltes Kunststoffgranulat wurden hinsichtlich ihres Potentials als Ersatzmaterial für Flächendrainagen anhand anwendungsrelevanter Eigenschaften sowie der Verarbeitungs- und Recyclingfähigkeit evaluiert. Es ergab sich, dass für die Einsatzbedingungen und die Einsatzdauer der Flächendrainagen das PBS im speziellen und biologisch abbaubare Polymere im Allgemeinen nicht geeignet sind. Deren aus ökologischer Sicht sinnvolle

Charakteristik der Abbaubarkeit unter bestimmten Umweltbedingungen schränkt die Funktionsfähigkeit und Lebensdauer der Flächendrainagen ein. Es wurde ermittelt, dass von den biobasierten Polyolefinen HDPE und LDPE1 sowie dem chemisch recycelten LDPE2 das HDPE am geeignetsten für die Substitution des bisher verwendeten Polypropylens ist. Im Hinblick auf die Verarbeitung über Extrusion und Tiefziehen ergeben sich keinerlei Einschränkungen, so dass die industriell vorhandenen Anlagen ohne zusätzliche Investitionen genutzt werden können. Ebenso ist das Kaschieren oder das Heißkleben der textilen Oberlage problemlos umsetzbar. Eine Feinjustierung der mechanischen Eigenschaften über Füllstoffe und Additive ist Stand der Technik.

Der CO₂-Fußabdruck der heute eingesetzten Drainagen von +1,65 kg/m² CO₂-Äquivalente könnte durch die Verwendung des biobasierten HDPE signifikant auf -0,49 kg/m² gesenkt werden, da die mit dem Wachstum des pflanzlichen Rohstoffes verbundene Kohlendioxid-Aufnahme das beim Transport sowie bei der Herstellung freiwerdende CO₂ kompensiert. Ein werkstoffliches Recycling und die Wiederverwendung oder Kaskadennutzung des gebrauchten HDPE ist ebenfalls möglich, so dass die formulierte Zielsetzung von einer Reduktion des CO₂-Äquivalents um mindestens 50 % erreichbar wäre. Zur detaillierten Bewertung der Nachhaltigkeit einer HDPE-Flächendrainage ist aber die Durchführung einer vollständigen Lebenszyklusanalyse empfehlenswert. Das bedeutet nicht nur den Cradle-to-Grave-Ansatz von der Rohstoffentnahme über die Fertigung und Nutzung bis hin zum Recycling oder der Entsorgung der Drainagen zu verfolgen, sondern neben dem CO₂-Fußabdruck weitere Auswirkungen auf die Umwelt zu untersuchen. Insbesondere bei den biobasierten Kunststoffen, die auf nachwachsenden Rohstoffen wie Zuckerrohr basieren, sind Kriterien wie Wasserverbrauch, Landnutzung, Versauerung oder Eutrophierung für eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung notwendig. Hinsichtlich der

Durchsetzung einer biobasierten Drainage auf dem Markt ist der Granulatspreis eindeutig als Hindernis einzustufen. Auch hier zeigt sich das für die kontinuierliche und signifikante Durchsetzung von nachhaltigeren Kunststoffen gegenüber erdölbasierten Polymeren nicht förderliche Spannungsfeld der Marktakzeptanz einer zwar klimaneutralen aber dafür wesentlich teureren Drainage. Mittelfristig wird sich an dieser Konstellation der Materialpreise nichts ändern, so dass auch für den Anwendungsfall Drainage wohl erst gesetzlich festgeschriebene Forderungen zu einem maximal zulässigen CO₂-Fußabdruck, zur 100%igen-Biobasis der verwendeten Rohstoffe oder zur Recyclingquote die Substitution des erdölbasierten Polymers erzwingen.

Da Flächendrainagen bereits über ihre Funktion die Lebensdauer von Belägen verlängern und eindeutig nicht als kurzzeitig eingesetzte Kunststoffprodukte eingestuft werden können, sind für deren signifikante Verbesserung der Nachhaltigkeit auch ohne Materialsubstitution folgende Maßnahmen sofort umsetzbar:

- die Verbesserung der Energieeffizienz bei der Herstellung, da Verfahren wie die Extrusion oder das Tiefziehen sehr energieintensive Verfahren sind
- die konsequente Wiederverwendung der bei der Herstellung anfallenden Materialabfälle, da gerade beim Tiefziehen technologisch bedingt beachtliche Mengen anfallen
- der Einsatz von einem Rezyklat auf der gleichen fossilen Kunststoffbasis, welches auf dem Markt in konstanter Qualität erhältlich und um ca. 0,20 €/kg teurer als Neuware ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Eigenschaften der untersuchten Materialien können auch für weitere Machbarkeitsstudien zur Substitution von erdölbasierten Polymeren durch biobasierte oder chemisch recycelte Materialien herangezogen

werden. Damit kann nicht nur ein Beitrag zur Verwirklichung des klimaneutralen Bauens, sondern auch zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsstrategie in anderen vom Einsatz fossiler Kunststoffe dominierten Bereiche geleistet werden.

5.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die bereits durchgeführten und kommenden Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Maßnahme	Ziele	Status
Erstellung eines Projektflyers	Bekanntmachung des Projektes als Handreichung und auf der Website der Forschungseinrichtung	erledigt
Vorstellung der Ergebnisse im Rahmen einer Messepräsenz	Zugänglichmachung der Projektergebnisse für ein Fachpublikum	In Abstimmung mit Messeauftritten des Projektpartners; z.B. GaLaBau September 2024, Nürnberg
Vortrag auf Fachkonferenz	Verbreitung der Ergebnisse für ein wissenschaftlich orientiertes Fachpublikum	25. Fachtagung Fortschritte in der Kunststofftechnik Osnabrück Juni 2024
News/ Mitteilung auf Homepage Projektpartner	Kurzmitteilung der Projektergebnisse, innovative und ökologische Entwicklungen	In Abstimmung mit Projektpartner vor Messeauftritt
Ergebnisvorstellung im industriegetragenen Förderverein der Forschungseinrichtung	Bekanntmachung der Projektergebnisse für ein weiter gefasstes Industriepublikum	September 2024

6 Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis durch Gutjahr

Im Bestreben, die Forschungsergebnisse in die Praxis zu überführen und zu validieren, suchte Gutjahr intensiv nach Kooperationen mit seinen Produzenten. Das Ziel war klar definiert: die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt in konkrete Produkte umzusetzen, die den Anforderungen des Marktes gerecht werden. Zu diesem Zweck

entschied sich das Unternehmen dafür, Bio-HDPE als vielversprechendes Substitutionsmaterial für erdölbasierte Polymere einzusetzen.

In verschiedenen Versuchsreihen wurden Bio-HDPE in Kombination mit verschiedenen Füllstoffen getestet, um ähnliche Steifigkeiten wie bei dem bisher verwendeten Polypropylen zu erreichen. Dabei zeigte sich, dass die Zugabe von Calciumcarbonat als Füllstoff eine vielversprechende Lösung darstellt. Allerdings stellte sich die Extrusion des Bio-HDPE an der bisher genutzten Tiefziehmaschine als problematisch heraus. Um dieses Hindernis zu überwinden, entschied Gutjahr, auf eine andere Maschine umzusteigen, bei der der Extruder besser auf die Verarbeitung von HDPE ausgelegt ist.

Obwohl noch einige Herausforderungen zu bewältigen sind, ist das Unternehmen zuversichtlich, dass bis zum Jahr 2025 die erste Drainagematte aus biobasiertem Kunststoff erfolgreich auf den Markt gebracht werden kann. Diese Bemühungen sind ein wichtiger Schritt in Richtung nachhaltigerer Bauprodukte und tragen dazu bei, die Umweltbelastung durch den Einsatz erdölbasierter Polymere zu reduzieren. Besonders hervorzuheben ist dabei der negative CO₂-Fußabdruck dieser biobasierten Drainagematten, der durch die Verwendung von Bio-HDPE und die damit verbundenen Kohlenstoffbindungsprozesse im pflanzlichen Rohstoff entsteht.

7 Fazit

Die nachhaltige Substitution der bei den Flächendrainagen zurzeit eingesetzten erdölbasierten Polymere durch auf dem Markt vorhandene biobasierte Kunststoffe – bewertet am CO₂-Fußabdruck – ist möglich. Bei den in diesem Projekt untersuchten Materialien zeigte ein biobasiertes High Density Polyethylen das größte Potential. Eine weitere Optimierung der anwendungstechnischen Eigenschaften über biobasierte Füllstoffe und Additive ist zu empfehlen. Im Hinblick auf die Marktakzeptanz einer

klimateutralen biobasierten Drainage muss der um Faktor vier höhere Granulatpreis als Haupthindernis eingestuft werden. Nichtsdestotrotz kann bereits jetzt unabhängig von einer Materialsubstitution der CO₂-Fußabdruck der Flächendrainagen über die Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz sowie den Einsatz von auf dem Markt erhältlichen, qualitativ hochwertigen Rezyklaten reduziert werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] „ec.europa.eu,“ 11. März 2020. [Online]. Available:
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_420. [Zugriff am 17. Januar 2024].
- [2] „www.gutjahr.com,“ April 2012. [Online]. Available:
https://www.gutjahr.com/Mediathek/Prospekte/Fachberichte/biGala_Fachbericht_Schaeden_an_Belaegen_verhindern_2012_06.pdf. [Zugriff am 17. Januar 2024].
- [3] „www.gutjahr.com,“ März 2019. [Online]. Available:
https://www.gutjahr.com/Mediathek/Prospekte/Studien/Gutjahr_Studie_Wasserableitung_Drainagen_2019_03.pdf. [Zugriff am 17. Januar 2024].
- [4] „issuu.com,“ 18. März 2020. [Online]. Available:
https://issuu.com/dgnb1/docs/dgnb_broschuere_klimapositiv_issue. [Zugriff am 19. Januar 2024].
- [5] „www.destatis.de,“ 14. Februar 2023. [Online]. Available:
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/anstieg-suv2.html>. [Zugriff am 18. Januar 2024].
- [6] „www.gebaeudegruen.info,“ 2022. [Online]. Available:
https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Marktreport/BuGG-Marktreport_Gebaeudegruen_2022.pdf. [Zugriff am 22. Januar 2024].
- [7] M. M.-L. e. al, „Life cycle assessment of mechanical recycling of post-consumer polyethylene flexible films based on a real case in Spain,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 365, Nr. September, p. 132625, 2022.
- [8] „www.braskem.com,“ 2016. [Online]. Available:
https://www.braskem.com.br/portal/imgreen/arquivos/LCA%20PE%20I%27m%20green%20bio-based_FINAL%20EN.pdf. [Zugriff am 23. November 2023].

