

Forschungsbericht BWPLUS

BabbA

Biologisch abbaubare Beutel in der Bioabfallverwertung

von

Jens Forberger, Prof. Dr. Ruth Freitag

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT
Universität Bayreuth

Förderkennzeichen: BWBAW 20101-07
Laufzeit: 01.11.2020 – 31.08.2022

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

September 2023



Babba

Biologisch abbaubare Beutel
in der Bioabfallverwertung

Biologisch abbaubare Beutel in der Bioabfallverwertung:
Potential zur Verdrängung konventioneller Plastikbeutel,
Abbau in der Anlage, Umweltrelevanz; Akronym: Babba

Abschlussbericht

Laufzeit: 01.11.2020 – 31.08.2022

Jens Forberger (Projektkoordinator – Fraunhofer ICT)

Prof. Dr. Ruth Freitag (stellvertretende Projektkoordinatorin – Universität Bayreuth)

Universität Bayreuth (Lehrstuhl für Tierökologie, **TÖK 1**):

Förderkennzeichen: BWBAW20101, Ansprechpartner: Hr. Dr. Martin Löder; Fr. Julia Möller, Hr. Prof. Dr. Christian Laforsch

Universität Hohenheim (Institut für Bodenkunde und Standortslehre, **IBS**):

Förderkennzeichen: BWBAW20102, Ansprechpartner: Hr. Dr. Holger Pagel, Fr. Prof. Dr. Ellen Kandeler

BEM Umweltservice GmbH:

Förderkennzeichen: BWBAW20103, Ansprechpartner: Hr. Jürgen Geyer, Fr. Ulrike Kröner

Universität Bayreuth (Lehrstuhl für Bioprozesstechnik, **BPT**):

Förderkennzeichen: BWBAW20104; Ansprechpartnerin: Prof. Dr. Ruth Freitag, Hr. Thomas Steiner

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT:

Förderkennzeichen: BWBAW20105, Ansprechpartner: Dipl.-Ing. FH Jens Forberger, Fr. Ansilla Bayha, Fr. Gabriela Gromer



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Juni 2023

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	8
Executive Summary	9
1. Kurzdarstellung des Projektes.....	17
2. Ziele des BabbA Projektes	18
3. Vorgehensweise.....	19
3.1 Auswahl der Prüf- und Referenzmaterialien (BAW-Beutel und wachsbeschichtete Papiertüten)	19
3.2 Planung der Versuchskampagnen.....	20
3.2.1 Ausgewählte Modellregionen, Sammelgebiete und Beutelverteilung	22
3.2.2 Beschreibung der Versuchskampagnen	24
3.2.3 Beschreibung der untersuchten Bioabfallverwertungsanlagen	24
3.3 Chargenanalysen.....	25
3.4 Kunststoffanalysen	28
3.4.1 Vorgehen zur Kunststoffanalyse größer 1 mm im Bioabfall und Kompost.....	28
3.4.2 Methodenentwicklung zur Analyse von kleinen Mikrokunststoffen (< 1 mm) im Kompost.....	30
3.4.3 Raman Analyse von Mikrokunststoffen kleiner als 10 µm im Kompost.....	31
3.5 Laborexperimente zur Untersuchung des Abbauverhaltens der BAW-Projektbeutel ...	33
3.6 Bodenversuche.....	33
3.7 Öffentlichkeitsarbeit	37
3.7.1 Erstellung von Informationsblättern (Flyer) zur Information der Bevölkerung über die Praxistests.....	38
3.7.2 Erstellung Projekthomepage	40
3.7.3 Umfragekampagne.....	40
4. Ergebnisse	41
4.1 Stoffstromanalysen der Anlagen.....	41

4.1.1 Chargenanalysen: Führt die Verteilung von BAW-Sammelbeuteln zu einer Verdrängung von konventionellen Kunststoff-Sammelbeuteln im angelieferten Bioabfall?	41
4.1.2 Ergebnisse zu den Stoffstromanalysen in den Anlagen: Kunststoffgehalte im Sommersversuch	51
4.1.2.1 Anlage 1 reine Kompostierung – Sommersversuch.....	52
4.1.2.2 Anlage 2 Vergärung im mesophilen Boxenfermenter mit anschließender Kompostierung – Sommersversuch.....	61
4.1.2.3 Anlage 3 Vergärung in thermophiler Trockenfermentationsanlage mit anschließender Kompostierung – Sommersversuch	67
4.1.3 Ergebnisse zu den Stoffstromanalysen in den Anlagen: Kunststoffgehalte im Winterversuch	72
4.1.3.1 Anlage 1 reine Kompostierung – Winterversuch.....	72
4.1.3.2 Anlage 2 Vergärung im mesophilen Boxenfermenter mit anschließender Kompostierung – Winterversuch	80
4.1.3.3 Anlage 3 Vergärung in thermophiler Trockenfermentationsanlage mit anschließender Kompostierung – Winterversuch	85
4.1.4 Fazit	87
4.2 Laborexperimente zur Untersuchung des Abbauverhaltens.....	89
4.3 Abschätzung des Abbauverhaltens von BAW-Materialien im Boden	90
4.3.1 Abbaubarkeit.....	90
4.3.2 Auswirkungen von BAW-Sammelbeuteln auf Enzymaktivitäten im Boden	92
4.3.3 Fazit	93
4.4 Öffentlichkeitsarbeit/ Ergebnisse der Umfragekampagne	94
4.4.1 Umfragekampagne - Sommersversuch	94
4.4.2 Umfragekampagne – Winterversuch.....	95
5. Handlungsempfehlungen.	97
6. Diskussion	99
7. Quellenverzeichnis	101

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen	Bezeichnung
ATR-FTIR	Abgeschwächte Totalreflexions-Fourier Transformations Infrarot- (Spektroskopie)
AVL	Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V
BAW	Biologisch abbaubare Werkstoffe, zertifiziert nach DIN EN 13432
GOA	Gesellschaft im Ostalbkreis für Abfallbewirtschaftung
EBS	Ersatzbrennstoff
FTIR	Fourier-Transformierte Infrarot (Spektroskopie)
fm	Feuchtmasse
MHKW	Müllheizkraftwerk
LDPE	Low-Density Polyethylen
MiKoBo	Mikrokunststoffe in Kompost und Boden (Projektkronym)
MKS	Mikrokunststoffe
p	Einstichproben-t-Test
PBAT	Polybutylenadipat-terephthalat (Bestandteil von BAW-Beuteln)
PHB	Polyhydroxybutyrat
pF	pF-Wert, dekadischer Logarithmus der Bodenwasserspannung
PLA	Polylactid (Bestandteil von BAW-Beuteln)
PTFE	Polytetrafluorethylen
tm	Trockenmasse
μ -FTIR	Mikro-Fourier-Transformations-Infrarot Spektroskopie
UM	Umweltministerium
σ	Standardabweichung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitsablauf der Aufreinigung und Analyse der kleinen Mikrokunststoffpartikel aus Kompostproben	31
Abbildung 2: Focal Plane Array Detektor (FPA)-basierte μ -FTIR Analyse einer Kompostteilprobe mit automatisierter Mikrokunststoffpartikelidentifikation	31
Abbildung 3: Verbesserung des Raman Signals von kompostiertem PBAT durch Erhöhung der Laserintensität (von rechts nach links 5 mW, 15 mW und 20 mW).....	32
Abbildung 4: Ergebnisse zur Raman Analyse einer Kompostprobe im Größenbereich 5-10 μ m	32
Abbildung 5: Folienstücke (5 mm \times 5 mm) kompostierter BAW-Beutel aus ecovio® nach biologischer Vorbehandlung in den Anlagen 1 (links) und 2 (Mitte) und unbehandelter BAW-Beutel aus ecovio® (rechts).....	35
Abbildung 6: Abbauversuch der Wintercharge 2022 (ohne Materialien aus Anlage 2), vor (oben) und nach (unten) dem Untermischen der Prüfmaterialien in den Boden (Versuchsstart)	36
Abbildung 7: Kompostierte BAW-Beutel Mater-Bi® (Standard) der Wintercharge 2022 mit biologischer Vorbehandlung in der Anlage 2.....	37
Abbildung 8: Titelseite der Homepage des BabbA-Projektes	38
Abbildung 9: Darstellung des BabbA-Logos, der verteilten Flyer und Infobrief.....	39
Abbildung 10: Gerlingen, Sommer - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	44
Abbildung 11: Markgröningen, Sommer - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	45
Abbildung 12: Steinheim, Sommer - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	46
Abbildung 13: Gerlingen, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	47
Abbildung 14: Markgröningen, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	48

Abbildung 15: Steinheim, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	49
Abbildung 16: GOA, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B).....	50
Abbildung 17: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in der Modellregion Gerlingen an der Anlage 1	54
Abbildung 18: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Gerlingen an der Anlage 1	55
Abbildung 19: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in der Anlage 1 mit Bioabfall aus der Modellregion Markgröningen	57
Abbildung 20: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Markgröningen an der Anlage 1	58
Abbildung 21: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in Anlage 1 mit Bioabfall aus Modellregion Steinheim	60
Abbildung 22: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Steinheim an der Anlage 1	61
Abbildung 23: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 2 (mesophile Boxenfermentation mit anschließender Kompostierung) im Sommersversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Gerlingen	63
Abbildung 24: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in Anlage 2 mit dem Bioabfall der Modellregion Gerlingen	64
Abbildung 25: Stoffstromanalyse > 1 mm der Anlage 2 (mesophile Boxenfermentation mit anschließender Kompostierung) im Sommersversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Markgröningen	66
Abbildung 26: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Markgröningen an der Anlage 2	67
Abbildung 27: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in Anlage 3 (thermophile Trockenfermentation mit anschließender Kompostierung) mit den Bioabfällen aus Modellregionen AVL-Gerlingen und Markgröningen	70
Abbildung 28: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in den Modellregionen Gerlingen und Markgröningen an der Anlage 3.....	71
Abbildung 29: Stoffstromanalysen für Kunststoffpartikel > 1 mm im Winterversuch der Anlage 1 für Bioabfälle aus der Modellregion AVL-Gerlingen; SÜ (Siebüberlauf).....	73
Abbildung 30: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Markgröningen; SÜ (Siebüberlauf)	75

Abbildung 31: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Steinheim; SÜ (Siebüberlauf)	77
Abbildung 32: Stoffstromanalyse der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion GOA; SÜ (Siebdurchlauf)	79
Abbildung 33: Kunststoffpartikel < 1 mm im Fertigkompost der Versuchscharge in den Modellregionen Gerlingen und GOA an der Anlage 1 im Winterversuch	80
Abbildung 34: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 2 (diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage - mit anschließender Kompostierung) im Winterversuch mit den Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Gerlingen.....	82
Abbildung 35: Stoffstromanalyse (>1 mm) des Winterversuchs in der Modellregion GOA an der Anlage 2	84
Abbildung 36: Kunststoffpartikel <1 mm im Fertigkompost der Versuchscharge in den Modellregionen Gerlingen und GOA an der Anlage 2 im Winterversuch	85
Abbildung 37: Stoffstromanalyse (>1 mm) des Winterversuchs in den Modellregionen Markgröningen und GOA an der Anlage 3	86
Abbildung 38: Darstellung der Kompostierung und der Beutelfragmente nach einer sechswöchigen Kompostierung. a) Kompostierer; b) ecovio®-Tragebeutel; c) Mater-Bi® (Biosackerl); d) Mater-Bi® (Standard).....	89
Abbildung 39: Abbauversuch Sommercharge 2021.....	90
Abbildung 40: Abbauversuch Wintercharge 2022	92
Abbildung 41: Abbauversuch Sommercharge 2021 Enzymaktivität.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht verwendete BabbA-BAW-Beutel und BabbA-Papierbeutel	20
Tabelle 2: Übersicht zu den am Projekt beteiligten Sammelgebieten, der Anzahl an teilnehmenden Haushalten und die verteilten Sammelmedien	21
Tabelle 3: Übersicht über die Modellregionen und deren Sammellogistik	23
Tabelle 4: Übersicht über die durchgeführten Chargenanalysen	26
Tabelle 5: Kompostierte BAW-Materialien	34
Tabelle 6: Unbehandelte Referenzmaterialien	34
Tabelle 7: Massenanteil von Kohlenstoff (%) der Prüfmaterialien.....	35
Tabelle 8: Sommerkampagne: Übersichtstabelle zu den Versuchsgebieten, dem Material der verteilten Beutel und den Anlagen, an die das entsprechende Bioabfall aus den Modellregionen angeliefert und untersucht wurde	42
Tabelle 9: Winterkampagne: Übersichtstabelle zu den Versuchsgebieten, dem Material der verteilten Beutel und den Anlagen, an die das entsprechende Bioabfall aus den Modellregionen angeliefert und untersucht wurde.	42
Tabelle 10: Darstellung der an die Haushalte verteilten Umfragen und der Rücklauf - Sommerversuch	94
Tabelle 11: Darstellung der an die Haushalte verteilten Umfragen und der Rücklauf - Winterversuch	95
Tabelle 12: Qualitätsbewertung der Beutel, Angabe der Mittelwerte	95

Executive Summary

Organische Haushaltsabfälle („Bioabfall“) stellen eine wertvolle Ressource dar, die sich sinnvoll stofflich-energetisch verwerten lässt. Die Infrastruktur für die getrennte Sammlung von Bioabfällen ist bereits in weitem Umfang eingeführt, allerdings stehen die Bioabfallverwertungsanlagen vor dem Problem, dass trotz Mülltrennungsmandat große Mengen an Fremdstoffen, insbesondere Kunststoffe, mit dem Bioabfall angeliefert werden. Um die Qualitätskriterien für organischen Dünger und Kompost, den vermarktungsfähigen Endprodukten der Bioabfallverwertung, zu erfüllen, müssen die Kunststoffe und andere Fremdstoffe im Bioabfall aufwendig entfernt werden. Hierbei geht auch immer ein signifikanter Anteil an wertvollem organischem Material verloren. Ein großer Teil der Kunststoffe im Bioabfall sind Kunststofftüten, die zum Teil von Bürger*innen fälschlicherweise zur Sammlung des organischen Abfalls verwendet werden. Eine Alternative zu konventionellen Kunststofftüten für die hygienische und bequeme Sammlung von organischen Abfällen könnten Sammelbeutel aus biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) und Papierbeutel darstellen. Allerdings ist noch nicht endgültig geklärt, ob BAW- und Papierbeutel sich in technischen Bioabfallverwertungsanlagen wie beabsichtigt vollständig abbauen, oder ob es bei der Mitbehandlung insbesondere der BAW-Sammelbeutel in den Bioabfallverwertungsanlagen lediglich zur Fragmentierung und Bildung von BAW-Mikro- und Nanokunststoffen kommt, welche dann mit dem fertigen Kompost in die Umwelt gelangen würden. In den aktuellen Qualitätskriterien von Komposten sind bei den festgelegten Grenzwerten nur Kunststofffragmente > 1 mm berücksichtigt. Sollte es bei BAW- und Papiersammelbeuteln in den Anlagen zu einer weitestgehenden Fragmentierung in Partikel < 1 mm kommen, würden diese derzeit hier nicht erfasst werden. Jedoch ist bekanntermaßen gerade bei Kunststofffragmenten < 1 mm mit einer höheren Umweltrelevanz zu rechnen, da diese Größenfraktion auch von kleinen Bodentieren aufgenommen werden können.

Zudem steht die Befürchtung im Raum, dass BAW-Fragmente, die in den Anlagen nicht abgebaut werden, potenziell nach der Ausbringung mit dem Kompost weiter im Boden verbleiben und dort weiterhin nur sehr langsam abgebaut werden. Darum werden Informationen zum Verhalten von BAW-Materialien in technischen Bioabfallverwertungsanlagen und in Böden dringend benötigt.

Um hier Klarheit zu schaffen, führte das Forschungsprojekt BabbA in Pionierarbeit eine systematische Analyse zum Fragmentierungs- und Abbauverhalten von BAW-Beuteln in unterschiedlichen technische Bioabfallverwertungsanlagen durch. Die Untersuchungen auf den Anlagen wurden mit zusätzlichen standardisierter Labortests zur Abbaubarkeit von unbehandelten und kompostierten BAW-Fragmenten im Boden ergänzt. Die im Projekt

erzielten Ergebnisse sollen eine Grundlage zur faktenbasierten Bewertung des Einsatzes von BAW- und Papiersammelbeuteln für die Sammlung von Bioabfällen in Haushalten schaffen.

Projektziele

Das Forschungsprojekt BabbA verfolgte drei Hauptziele:

- 1) Die Untersuchung des Fragmentierungs- und Abbauverhaltens von BAW- und Papiersammelbeuteln unter praxisnahen und abfalltechnisch relevanten Bedingungen während der stofflichen Bioabfallverwertung in realen Anlagen.
- 2) Die Abschätzung des Abbauverhaltens von unbehandelten und kompostierten BAW-Materialien im Boden und die Bewertung ihrer Auswirkung auf Bodenfunktionen.
- 3) Die Erhebung und Analyse der Einstellungen, Erwartungen und Erfahrungen der Bevölkerung in Bezug auf BAW- und Papiersammelmedien für Bioabfall sowie die Ermittlung der Bereitschaft der Bürger*innen diese zu nutzen.

Durchführung des Forschungsvorhabens

Um jahreszeitliche Variationen im Bioabfall zu erfassen, wurden zwei großangelegte Versuchskampagnen durchgeführt: Eine im Sommer (Jun/Jul 2021) und eine im Herbst/Winter (Sep/Okt/Nov 2021). Im Sommerversuch waren drei Sammelgebiete der Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg (AVL) (Steinheim, Markgröningen, Gerlingen) beteiligt, im Winterversuch konnte zusätzlich noch die Modellregion der Gesellschaft im Ostalbkreis für Abfallbewirtschaftung (GOA) hinzugewonnen werden. Die Sammelgebiete der AVL nutzen Biotonnen, die wöchentlich geleert werden (im Winter alle zwei Wochen), während in der Modellregion der GOA dickwandige PE-Kunststoffbeutel für die Sammlung der Bioabfälle verteilt werden, die wöchentlich eingesammelt werden. Etwa zwei Wochen vor den Kampagnen wurden verschiedene Bioabfall-Sammelmedien aus zertifiziert kompostierbaren Materialien (Papierbeutel, Mater-Bi®-Hemdchenbeutel, Mater-Bi®-Standardbeutel und Ecovio®-Standardbeutel) an Haushalte aus den insgesamt vier Sammelgebieten der beiden Modellregionen verteilt.

Zusammen mit den Sammelmedien wurden in den Modellregionen innerhalb des BabbA-Projektes entwickelte Informationsmaterialien und ein auf die Versuchsziele abgestimmter Umfragebogen an Bürger*innen ausgegeben, mit der Aufforderung in einem vorgegebenen Versuchszeitraum die gelieferten BabbA-Sammelbeutel für die Bioabfallsammlung zu

verwenden. Zudem wurden die Bürger*innen gebeten ihre Eindrücke im Fragebogen festzuhalten und diese dann per Post oder online an die Projektmitarbeiter zur Auswertung zurückzuschicken.

Die Bioabfälle des Versuchszeitraumes wurden auf den Umschlagplätzen der Entsorger separat in Containern gelagert, um eine Vermischung mit anderem Material auszuschließen und dann an die im Projekt beteiligten Bioabfallverwertungsanlagen geliefert. Im Rahmen des BabbA-Projektes wurden die Untersuchungen an drei verschiedenen Anlagentypen durchgeführt:

- 1) einer reinen Kompostierungsanlage (Anlage 1),
- 2) einer diskontinuierlichen, mesophilen Trockenvergärungsanlage (Boxenfermentieranlage) mit anschließender Kompostierung (Anlage 2),
- 3) einer kontinuierlichen, thermophilen Trockenfermentationsanlage (Pfropfenstromfermentieranlage) mit anschließender Kompostierung (Anlage 3).

An diesen Anlagen wurde vor Versuchsbeginn für jede Modellregion eine Chargenanalyse zur Untersuchung der Qualität (Fremdstoffanteil, Grüngutananteil, Feuchtigkeit) der angelieferten Bioabfälle unter „Normalbedingungen“ (Nullchargen) durchgeführt, mit speziellem Augenmerk auf die Menge und Art der im Bioabfall vorhandenen Kunststoffbeutel. Während der Versuchslaufzeit, in der die Bürger*innen die verteilten BAW- und Papier-Sammelbeutel nutzen sollten, wurden weitere Chargenanalysen der Bioabfälle durchgeführt, um eventuelle Änderungen im Sammelverhalten der Bürger*innen zu erkennen. Die Chargenanalysen wurden nach der Vorschrift der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., mit jeweils zwei Stichprobeneinheiten durchgeführt. Die Kunststoffbeutel-Gehalte wurden dabei nach zwei Methoden erhoben. Zum einen wurden sie vor Ort (inklusive Anhaftungen) gewogen und auf die Frischmasse des Bioabfalls bezogen, zum anderen wurden sie im Anschluss an die Analyse gewaschen, getrocknet und auf die Trockenmasse des Bioabfalls bezogen.

Anschließend wurden auf den Anlagen Stoffstromanalysen zum Verhalten der Sammelbeutel in den Anlagen durchgeführt. Hierzu wurden im zeitlichen Verlauf der Prozessierung Proben an verschiedenen Stationen in den Anlagen (vom angelieferten Bioabfall bis zum Kompost) auf Kunststofffragmente untersucht, um ein besseres Verständnis für die Fragmentierungsprozesse von konventionellen Kunststoffen und BAW-Materialien innerhalb der Anlagen zu bekommen. Aufgrund der verwendeten Analysemethoden, welche auf die BAW- und Papiermaterialien adaptiert wurden, wurde zwischen Fragmenten größer 1 mm und Fragmenten kleiner 1 mm unterschieden. Für standardisierten Analysen der Größenfraktion < 1 mm im Kompost wurden die analytischen Methoden aus dem Projekt MiKoBo weiterentwickelt.

In der Winterkampagne wurden die Komposte aus den Sammelgebieten AVL-Gerlingen und GOA auf Kunststofffragmente < 1 mm untersucht. Für die Sommerkampagne liegen diese Ergebnisse aus den Sammelgebieten für den angelieferten Bioabfall und die im Rahmen der Stoffstromanalyse untersuchten Zwischenprodukte vor.

Neben den Versuchen in den Anlagen wurden die im Projekt verwendeten Sammelbeutel (Papierbeutel, Mater-Bi®-Standardbeutel und Ecovio®-Standardbeutel) auch auf ihre Abbaubarkeit im Boden mittels standardisierter Labortests untersucht. Dabei wurden sowohl kompostierte wie auch unbehandelte Fragmente der Projektsammelbeutel betrachtet.

Ergebnisse der Chargenanalysen

Ziel der Chargenanalysen war es zu ermitteln, ob sich durch den Einsatz von BAW- und Papiersammelbeuteln der Anteil an konventionellen Kunststoffbeuteln im Bioabfall verringert. Es konnten die im Rahmen des Projektes eingesetzten Papierbeutel während der Chargenanalysen nicht mehr eindeutig identifiziert werden und wurden somit nicht mit aufgenommen. Durch die inhomogene Verteilung der Kunststoffe im Bioabfall waren breite Schwankungen zwischen den Kunststoffanteilen in verschiedenen Chargenanalysen zu erwarten, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden musste. Im Sommersversuch konnte ein durchschnittlicher Rückgang des Anteils an konventionellen Kunststoffen im Bioabfall der Modellregion AVL im Vergleich zu den Nullchargen beobachtet werden (in Gerlingen von 6,1 kg/t in der Nullcharge auf 1,3 kg/t in der Versuchscharge, in Markgröningen von 11,1 kg/t auf 4,3 kg/t und in Steinheim von 4,9 kg/t auf 2,7 kg/t, bezogen auf die Trockenmasse des Bioabfalls). Dies konnte im Winterversuch bei denselben Sammelgebieten nicht beobachtet werden. Hier blieben die Kunststoffanteile unter Berücksichtigung der Standardabweichung in etwa gleich. Im Modellgebiet der GOA lässt sich auf Grund des Sammelsystems in PE-Säcken keine Aussage bezüglich einer Verdrängung von konventionellen Kunststoffen durch BAW-Sammelbeutel treffen. Der Fokus der der Untersuchungen lag hier auf der Abbaubarkeit der BAW-Beutel.

Betrachtet man die Gesamtfremdstoffgehalte, so zeigten die Chargenanalysen, dass hier keine Verringerung durch den Einsatz der BAW-Sammelbeutel zu verzeichnen ist: Im Sommer betrug der Mittelwert des Fremdstoffgehalts der drei Sammelgebiete der AVL-Modellregion in den Nullchargen 2,40 % und in den Versuchschargen 2,49 %. Im Winter 2,39 % in den Nullchargen und 2,05 % in den Versuchschargen.

Bei der Modellregion GOA betrug der Fremdstoffgehalt im Winter in der Nullcharge 6,73 % und in der Versuchscharge 5,22 %. Trotz der Zurverfügungstellung von kostenlosem BAW-

und Papiersammelbeutel konnte auch hier keine signifikante Reduzierung der Kunststoffanteile verzeichnet werden.

Ergebnisse der Stoffstromanalysen

In den Stoffstromanalysen zeigte sich, dass dort, wo BAW-Beutel im Bioabfall vorhanden waren, meist auch eine große Menge an PBAT (Polybutylenadipat-Terephthalat) -Partikeln < 1 mm im Kompost zu verzeichnen war. Eine statistisch abgesicherte Proportionalität der im Bioabfall gefundenen BAW-Beutel zu den im Kompost vorhandenen PBAT-Partikeln konnte jedoch nicht festgestellt werden, was wahrscheinlich an der hohen Varianz innerhalb der Stichproben liegt. Da PBAT jedoch ein Hauptbestandteil der BAW-Sammelbeutel ist, ist davon auszugehen, dass die eingesetzten BAW-Sammelbeutel die Quelle der PBAT-Fragmente im Kompost sind. Im Vergleich scheinen BAW-Beutel stärker zu fragmentieren als konventionelle Kunststofftüten und verursachen dadurch mehr kleinere Mikrokunststoffe (< 1 mm) im Kompost. Im Durchschnitt bestanden etwa 88 % der Kunststofffragmente < 1 mm im Kompost der Versuchschargen aus PBAT, der Median lag sogar bei 92 %. Der Anteil an konventionellen Kunststoffen hingegen war gering, was vermutlich daran liegt, dass die stabilen Kunststoffbeutel in der Regel als Ganzes während der Siebung aussortiert werden können.

Insgesamt konnte der von der Düngemittelverordnung geforderte Grenzwert von 0,1 Masseprozent für Kunststoffpartikel > 1 mm für die hier untersuchten Komposte stets eingehalten wurde. Die Tatsache, dass im Kompost aller Anlagen dennoch eine große Anzahl an PBAT-Fragmenten im Bereich 10 µm – 1 mm gefunden wurde zeigt, dass die BAW-Beutel innerhalb der Anlagen im Versuch nicht vollständig abgebaut wurden, sondern weitestgehend fragmentierten.

Insgesamt zeigten sich große Unterschiede im Fragmentierungsverhalten der BAW-Beutel zwischen den Anlagentypen, aber auch innerhalb derselben Anlage zwischen dem Sommer- und Winterversuch. In der reinen Kompostierungsanlage (Anlage 1) zeigte sich in den Chargen aus Gerlingen und Markgröningen, dass die weitestgehende Fragmentierung zu Partikeln < 1 mm erst in den Stufen nach der Intensivrotte stattfand. In Anlage 2 (Boxenfermenter) hingegen wurden an den verschiedenen Stufen der Prozessierung nach Anlieferung des Bioabfalls so gut wie keine Fragmente > 1 mm gefunden. Hier wird davon ausgegangen, dass die Fragmentierung recht früh im Vergärungsprozess einsetzt. Für Anlage 3 konnten aufgrund der Anlagentechnik nur der angelieferte Bioabfall und der Kompost untersucht werden, weshalb hier keine Aussagen zum Fragmentierungsverhalten der BAW-Beutel in der Anlage getroffen werden können. Es wurden keine BAW-Fragmente > 1 mm im Kompost der Versuchscharge gefunden.

Die Ergebnisse des Winterversuchs unterscheiden sich teils stark von denen des Sommersversuchs. Beim Winterversuch wurden zusätzlich die Siebüberläufe der Siebungsstufen beprobt, da vor allem in der Anlage 1 im Winter im Siebüberlauf (nach der Kompostierung) visuell BAW-Fragmente beobachtet wurden, die so im Sommersversuch nicht zu verzeichnen waren. Für alle Modellregionen konnten im Winter in den Siebüberläufen der Anlage 1 BAW-Fragmente nachgewiesen werden (durchschnittlich 0,27 kg/t). Auch in Anlage 2 wurden im Winter sowohl im Gärrest als auch im Rottegut nach der Intensivrotte und im Siebüberlauf noch BAW-Fragmente > 1 mm gefunden. Im Kompost wurden in Anlage 2 hingegen kaum BAW-Fragmente > 1 mm gefunden. In Anlage 3 wurden auch im Winterversuch keine BAW-Fragmente > 1 mm im Kompost gefunden. Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu folgern, dass sowohl der Anlagentyp, der eingebrachte Bioabfall und die Lagerungs- und Sammelverhältnisse, sowie potenziell auch die unterschiedlichen Witterungsverhältnisse eine Rolle beim Fragmentierungsverhalten von BAW- und Papierbeuteln innerhalb der Anlagen (Ausnahme Anlage 3) spielen können. Um zu gewährleisten, dass aus dem angelieferten Bioabfall qualitativ hochwertigen Kompost hergestellt werden kann, sollten BAW-Materialien im Einsatz als Bioabfallsammelmedium daher auch unter variierenden Prozessbedingungen in Bioabfallverwertungsanlagen abgebaut werden können.

Ergebnisse der Bodenabbauversuche

Das Abbauverhalten der im Projekt eingesetzten Materialien im Boden wurde mit zwei standardisierten Labortests bestimmt. Zur Abschätzung des Verhaltens von prozessiertem BAW-Material wurden die beiden Materialien Ecovio® und Mater-Bi® ohne und mit vorhergehender Prozessierung in Bioabfallverwertungsanlagen in den Versuchen eingesetzt (fabrikneu und prozessiert).

Für den ersten Abbauversuch stand nur prozessiertes Ecovio® aus der Sommercharge zur Verfügung. Im zweiten Abbauversuch wurde zusätzlich prozessiertes Mater-Bi® aus der Wintercharge berücksichtigt.

Wachsbeschichtete Papierbeutel wurden in den ersten 30 Tagen im Vergleich zu allen anderen Materialien am schnellsten mineralisiert und erreichten im ersten Versuch nach 145 Tagen einen Mineralisierungsgrad von 43 %. Das vollständig biologisch abbaubare Referenzmaterial (PHB) erreichte nach 145 Tagen einen vergleichbar hohen Mineralisierungsgrad von 46 %.

Fragmente kompostierter Ecovio®-Standardbeutel (Anlage 1 Sommercharge) wurden in den Labortests innerhalb von 145 Tagen zu 25% mineralisiert. Das prozessierte Material wies

damit einen deutlich höheren Mineralisierungsgrad auf als fabrikneues Ecovio® (5 %). LDPE wurde erwartungsgemäß innerhalb von 145 Tagen nicht mineralisiert. Im zweiten Abbauversuch bestätigten sich diese Ergebnisse zum Abbauverhalten von wachsbeschichteten Papiertüten, Ecovio® (prozessiert und fabrikneu) und LDPE. Durch Fermentierung und anschließende Kompostierung vorbehandeltes Ecovio® (Anlage 2) zeigte eine deutlich geringere Mineralisierungsrate als ausschließlich kompostiertes Ecovio® (Anlage 1). Augenscheinlich war der abbaubare Anteil bei den entnommenen Ecovio®-Fragmente nach kombinierter Fermentierung und Kompostierung geringer als bei ausschließlich kompostiertem Material.

Der Vergleich von Materialien aus verschiedenen Bioabfallverwertungsanlagen zeigte, dass die Mineralisierbarkeit von Ecovio®-Fragmenten im Boden mit zunehmendem Zersetzungsgrad in Folge der Prozessierung abnimmt. Bei dem Material Mater-Bi® hatte die vorhergehende Prozessierung in Bioabfallanlagen keinen Einfluss auf die Mineralisierbarkeit im Boden. Kompostiertes Mater-Bi® war nach 86 Tagen zu 12 % mineralisiert, das fabrikneue Material erreichte einen Mineralisierungsgrad von 14%.

Die Enzymanalysen im Boden unterstützen die Befunde zur Mineralisierung und deuten darauf hin, dass Bodenmikroorganismen BAW-Sammelmedien teilweise nach enzymatisch katalysierter Depolymerisierung als Wachstumssubstrat nutzen können. Auswirkungen der BAW-Materialien auf die mikrobielle Biomasse im Boden oder auf die Aktivitäten von am Umsatz der organischen Bodensubstanz beteiligten Enzymen konnten bei den Labortests nicht festgestellt werden. Unter Feldbedingungen ist aufgrund von Abbaulimitierungen durch suboptimale Bodenfeuchte und -temperatur eine deutliche geringere Mineralisierung zu erwarten als die unter Laborbedingungen festgestellte maximale Mineralisierung von 25% innerhalb von 5 Monaten (prozessiertes Ecovio®).

Erkenntnisse aus der Öffentlichkeitsarbeit

Im Durchschnitt nahmen etwa 13 % der Bürger*innen, die Umfragebögen erhielten, an der Umfrage teil und sendeten sie zurück.

Aus den Umfragen der Sommerkampagne wurde folgendes klar: Die Frage, ob die Bürger*innen den Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffbeuteln für sinnvoll halten, ergab bei Zusammenfassung der Ergebnisse für Markgröningen und Gerlingen (Mater-Bi® (Hemdchenbeutel), Mater-Bi® (Standard) 50 % + Ecovio® (Standard) 50 %), dass 66 % den Einsatz für sinnvoll erachten, 32 % für nicht sinnvoll. Als Gründe für den Einsatz eines BAW-Beutels gaben die Befragten an, dass es mit diesem sauber und hygienischer sei den Bioabfall zu sammeln, der Beutel wasserdicht ist, gut für die Umwelt, einfache Handhabung ermöglicht

und Gerüche vermindert. Gegen die BAW-Beutel wurde anführt, dass Zeitungspapier zum Sammeln ausreichend sei. Zusätzlich wurden grundsätzliche Zweifel an der Abbaubarkeit der BAW-Beutel geäußert.

Von den Befragten in Steinheim (Papierbeutel) fanden 76 % den Einsatz von Papierbeuteln sinnvoll, 22 % dagegen nicht. Vor allem wurde hier positiv die Sauberkeit und dadurch verbesserte Hygiene in der Sammlung angegeben, zudem, dass der Papierbeutel als umweltfreundlich gilt und dieser einfach zu handhaben wäre. Als Contra wurde aufgeführt, dass Zeitungspapier ausreichend sei und dass die Beutel durchweichen und dadurch die Sauberkeit vermindert werde.

Aus den Umfragen der Winterkampagne zeigte sich: Den Einsatz von biologisch abbaubaren Beuteln halten in der Region GOA (Ecovio® (Standard)) 95 % der Befragten für sinnvoll, bei Gerlingen/Markgröningen (Mater-Bi® (Hemdchenbeutel); Mater-Bi® (Standard)) 67 %, der Einsatz von Papierbeuteln wurde bei Steinheim zu 75 % als sinnvoll erachtet. Stimmen, die dagegen waren, gaben zum Ausdruck, dass Zeitungspapier oder ähnliches ausreichend sei, es gab aber auch Zweifel an der tatsächlichen Abbaubarkeit der BAW-Beutel.

Auf die Frage, ob die Bürger*innen die Beutel weiterverwenden wollen würden, stimmten bei der GOA 82 %, bei Gerlingen/Markgröningen 88 % und bei Steinheim 89 % für ja. Die Gründe für die Stimmen dagegen waren, dass man selbst kompostiere oder der Preis stimmen solle.

Zur Frage, ob sich das Sammelverhalten nach der Versuchsphase verändert habe, gaben bei Gerlingen/Markgröningen 76 % an, dass keine Veränderung stattgefunden habe, bei Steinheim waren es 69 %. Insgesamt zeichnete sich in den Umfragen ab, dass die Bürger*innen, trotz geringer Zweifel und Unzufriedenheit, dem Einsatz von BAW-Beutel positiv gegenüberstehen, auch wenn dieser nicht unbedingt das Sammelverhalten beeinflusst.

1. Kurzdarstellung des Projektes

Organische Haushaltsabfälle („Bioabfälle“) lassen sich sinnvoll stofflich-energetisch verwerten. Die hierzu notwendige separate Sammlung ist bereits in weitem Umfang in Deutschland eingeführt. Leider finden sich trotz Mülltrennungspflicht fälschlicherweise größere Mengen an Kunststoffen in den für die energetisch-stofflichen Verwertung bestimmten Bioabfällen. Dabei handelt es sich bei diesen Fremdstoffen vorwiegend um Kunststoffbeutel und Verpackungsmaterialien. Ein möglicher Grund, weshalb sich ein hoher Anteil an Kunststoffbeuteln im Bioabfall befindet, ist, dass diese das Bedürfnis einiger Bürger*innen befriedigen, eine bequeme und saubere Möglichkeit zu haben, den Bioabfall zu sammeln und zu entsorgen. Allerdings müssen konventionelle Kunststoffe in den Anlagen aufwendig entfernt und entsorgt werden. Dabei geht immer auch ein Teil des wertvollen organischen Materials verloren. Gleichzeitig ist zu befürchten, dass bei strengeren regulatorischen Maßnahmen bezüglich des Fremdstoffanteils in der Biotonne, ein noch größerer Teil des Bioabfalls in der Restmülltonne entsorgt wird und nicht mehr für die Verwertung zur Verfügung steht, was nicht im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wäre.

Um diesem Problem entgegenzuwirken werden Sammelbeutel aus bioabbaubaren Werkstoffen (BAW) als Alternative zu konventionellen Kunststoffbeuteln zur hygienisch-sauberen Bioabfallsammlung in Haushalten propagiert. Ein potenzieller Vorteil von Sammelmedien aus BAW ist, dass sie im Prinzip zusammen mit dem Bioabfall in den Bioabfallverwertungsanlagen verarbeitet werden könnten. Derzeit arbeiten die meisten Bioabfallverwertungsanlagen allerdings unter der Prämisse, dass keine Beutel/Folien in die Anlage gelangen sollen, da BAW-Kunststoffe und konventionelle Kunststoffe im Bioabfall ohne chemische Analyse schwer unterscheidbar sind. Solange weiterhin in relevantem Maße Sammelmedien aus konventionellen Kunststoffen (z.B. PE, PP) den Bioabfall belasten, ist eine parallele Nutzung von BAW-Sammelmedien nicht sinnvoll, da etwaig vorhandene BAW-Sammelmedien mit den konventionellen Materialien aussortiert werden. Sinnvoll ist der Einsatz der BAWs zudem nur dann, wenn diese sich noch in den Anlagen, d.h. unter kontrollierten Bedingungen, abbauen, ohne dass es dabei zur Bildung von größeren Mengen an Mikro- und Nanokunststoffpartikeln im finalen Endprodukt (Komposte und Gärreste) kommt. Derzeit gibt es für das Verhalten von BAW-Sammelbeuteln in realen Bioabfallverwertungsanlagen keine verlässliche Datenlage. Daher muss, bevor BAW-Beutel in größerem Umfang eingesetzt werden, das Abbauverhalten detailliert untersucht, potenziell entstehender Mikrokunststoff im fertigen Kompost und flüssigen Gärrest analysiert und die Umweltrelevanz möglicherweise in die Umwelt gelangender BAW-Fragmente abgeschätzt werden.

2. Ziele des BabbA Projektes

Das Forschungsprojekt BabbA verfolgte drei Hauptziele:

1. Die Untersuchung des Fragmentierungs- und Abbauverhaltens von BAW- und Papier-Sammelmedien in realen großtechnischen Bioabfallverwertungsanlagen.
2. Die Abschätzung des Abbauverhaltens von unbehandelten und kompostierten BAW-Materialien und Papierbeuteln im Boden mittels standardisierten Labortests und die Bewertung ihrer Auswirkung auf Bodenfunktionen.
3. Die Erhebung und Analyse der Einstellungen, Erwartungen und Erfahrungen der Bevölkerung in Bezug auf BAW- und Papier-Sammelmedien für Bioabfall sowie die Ermittlung der Bereitschaft der Bürger*innen diese zu nutzen.

3. Vorgehensweise

Die Ziele des BabbA Projektes wurden in fünf Teilprojekten bearbeitet.

Die Analyse von Kunststofffragmenten in Komposten erfasste bislang nur Partikel > 1 mm. Partikel < 1 mm sind aufgrund ihrer erhöhten Aufnahmewahrscheinlichkeit für Organismen jedoch mindestens genauso umweltrelevant.

Teilprojekt 1 (TÖK I) hatte zum Ziel, die Analytik von BAW-Fragmenten < 1 mm (Mikrokunststoff, MKS) zu vereinfachen, sie soweit als möglich zu automatisieren und hin zu möglichst kleinen Größen (10 µm) voranzutreiben.

Teilprojekt 2 (IBS) untersuchte das Abbauverhalten und die Fragmentierung von BAW-Materialien und Papierbeuteln im Boden mittels standardisierten Labortests. Erstmals wurden dabei biologisch vorbehandelte (kompostierte) BAW-Fragmente aus den technischen Anlagen in den Untersuchungen berücksichtigt und das Abbauverhalten mit unbehandelten BAW-Fragmenten verglichen.

Teilprojekt 3 (BEM) integrierte einen Partner aus der Praxis in das Projekt. Die BEM verknüpfte die Kompetenz von Abfallentsorgungsunternehmen und Anlagenbetreibern mit den Forschungseinrichtungen, organisierte und leitete die Anlieferungen des Bioabfalls aus den Sammelgebieten zu den Bioabfallverwertungsanlagen und führte während der Versuche die Chargenanalysen des Bioabfalls durch.

Teilprojekt 4 (BPT) fokussierte auf die Abbauvorgänge von BAW-Materialien in den Anlagen und lieferte das Material für die Umweltrelevanz-Untersuchungen in Teilprojekt 2.

Teilprojekt 5 (ICT) war für die Auswahl, den Versand und die Charakterisierung der BAW-Materialien und Papierbeuteln verantwortlich. Zusätzlich übernahm das ICT in Teilprojekt 5 die Projektkoordination und unterstützte die Arbeiten während der Versuche (z.B. Chargenanalyse, Verteilung der Sammelmedien an die Bevölkerung).

TÖK I, ICT, BEM und **BPT** waren darüber hinaus im Bereich Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation (Webseite (www.projekt-babba.de), Infomaterial, Umfrage) aktiv, wodurch das Bewusstsein in der Bevölkerung in Bezug auf Bioabfall nachhaltig geschärft werden sollte.

Durch die Synergie der Partner und der geplanten Forschungsarbeiten sollten innerhalb des Vorhabens eine Datenbasis erarbeitet und Erkenntnisse gewonnen werden, die erstmals verlässliche Prognosen hinsichtlich möglicher Folgen eines breiten Einsatzes von biologisch abbaubaren Beuteln in der kommunalen Bioabfallsammlung erlauben.

3.1 Auswahl der Prüf- und Referenzmaterialien (BAW-Beutel und wachsbeschichtete Papiertüten)

Es wurden für die Versuchskampagnen drei kommerziell verfügbare Typen von BAW-Sammelbeuteln, sowie ein Typ eines Sammelbeutels aus Papier eingesetzt (Tabelle 1). Die Sammelbeutel waren mit dem BabbA-Logo versehen, um die Wiedererkennung in den

Chargenanalysen besser zu gewährleisten. Die Henkelbeutel entsprechen den derzeit handelsüblichen BAW-Beuteln bezüglich Füllvolumen, Dicke, und Materialzusammensetzung. Primäres Ziel ist die Vergleichbarkeit mit den derzeit kommerziell verfügbaren BAW- und Papierbeuteln in Deutschland.

Die BAW-Beutel bzw. die wachsbeschichteten Papierbeutel wurden jeweils für die Versuchskampagnen (Sommer/Winter) separat bestellt, um eventuelle Beeinträchtigungen durch eine Lagerungsdauer von mehreren Monaten auszuschließen.

Tabelle 1: Übersicht verwendete BabbA-BAW-Beutel und BabbA-Papierbeutel

Beutel-Typ	Unternehmen	Füll Vol. [L]	Material	Dicke [µm]	Wasserdampfbarriere	Zertifizierung
Mater-Bi® (Biosackerl) mit Henkel	NATURA-BIOMAT GmbH	10	Mater-Bi®	Ca.13	ja	DIN EN 13432 + OK Compost Home
ecovio® Trage-beutel	DEISS GmbH	15	ecovio® - Bio-	Ca. 20	ja	DIN EN 13432
Mater-Bi® (Standard) mit Henkel	NATURA-BIOMAT GmbH	10	Mater-Bi®	Ca. 18	ja	DIN EN 13432 + OK Compost Home
Blockbodenbeutel	Rodenbacher Papieragentur GmbH	9	Hydro RC ungebleicht besonders nassfest	Ca. 20		

3.2 Planung der Versuchskampagnen

In Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern wurden zwei Modellregionen, die Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg (AVL: AVL-Steinheim, AVL-Markgröningen und AVL-Gerlingen) und die Gesellschaft im Ostalbkreis für Abfallbewirtschaftung (GOA) für die Teilnahme am Projekt ausgewählt und gewonnen.

Um die an der Versuchskampagnen teilnehmenden Haushalte der jeweiligen Projektregionen zu beliefern, wurden die oben aufgeführten BAW-Sammelbeutel zusammen mit einer schriftlichen Umfrage, Projektflyer als Infomaterial und persönlichem Anschreiben vom Konsortium verpackt. Eine Übersicht dazu findet sich in Tabelle 2. Die Sommerkampagne wurde im Juni/Juli 2021 (nachfolgend nur Sommersversuch genannt), die Herbst-/Winterkampagne im September/Oktober/November 2021 (nachfolgend nur Wintersversuch genannt) durchgeführt.

Sommerversuch

Die Postwurfsendungen in den Modellregionen Markgröningen und Steinheim wurden zusammen mit der samstäglichen Werbepostsendung eingeschweißt versandt. Es wurden alle Haushalte beliefert, die keine Ablehnung von Werbung an den Briefkästen gekennzeichnet hatten. Anhand der gefundenen BAW-Beutel in den Chargenanalysen und der vergleichsweise geringen Rücklaufquote des Fragebogens aus Markgröningen (eventuell auch in Steinheim, da weniger Umfrage-Rückläufer) muss davon ausgegangen werden, dass nicht alle vorgesehenen Haushalte die BAW-Beutel in der Werbepostsendung wahrgenommen hatten, oder alle BabbA-Briefe nicht wie vereinbart durch den Dienstleister verteilt wurden. Um dieses Problem zu vermeiden, wurde im Winterversuch die Verteilung der BabbA-Postwurfsendungen vom Konsortium direkt übernommen. Die Briefe für die Modellregion Gerlingen wurde mit Unterstützung der AVL ausgetragen. Hier kam es zu besseren Rücklaufquoten bei den Fragebögen und keinen Unstimmigkeiten in den Chargenanalysen.

Winterversuch

Die Postwurfsendungen wurden in den AVL-Modellregionen AVL-Steinheim, AVL-Markgröningen und AVL-Gerlingen vom Projektkonsortium analog zum Sommerversuch verpackt und eigenständig an die Haushalte verteilt. Seitens der Modellregion GOA wurden die Adressdaten an das Konsortium (nach gesetzlichen Vorgaben) weitergegeben, und die Projektbeutel mit Informationsmaterial postalisch an die Haushalte versendet.

Tabelle 2: Übersicht zu den am Projekt beteiligten Sammelgebieten, der Anzahl an teilnehmenden Haushalten und die verteilten Sammelmedien

	Sammelgebiete	Haushalte	Sammelmedium	Anzahl Beutel/Haushalt
Sommer (Jun/Jul)	AVL - Steinheim	5.133	Papierbeutel	6
	AVL - Markgröningen	6.643	Mater-Bi® (Hemdchenbeutel)	12
	AVL - Gerlingen	3.850 3.850	Mater-Bi® (Standard) 50 % + Ecovio® (Standard) 50 %	12 12
Winter (Sep/Okt/Nov)	AVL - Steinheim	5.133	Papierbeutel	6
	AVL - Markgröningen	6.643	Mater-Bi® (Hemdchenbeutel)	12
	AVL - Gerlingen	7.700	Mater-Bi® (Standard)	12
	GOA	13.000	Ecovio® (Standard)	6

3.2.1 Ausgewählte Modellregionen, Sammelgebiete und Beutelverteilung

Es wurden zwei Modellregionen, die Abfallverwertungsgesellschaft des Landkreises Ludwigsburg (AVL) für den Sommer- und Winterversuch und die Gesellschaft im Ostalbkreis für Abfallbewirtschaftung (GOA) für den Winterversuch ausgewählt.

In einigen Sammelgebieten der Modellregion AVL kontrollieren sogenannte Bioscouts seit 2020 regelmäßig die korrekte Befüllung der Biotonnen. Da die Verwendung von biologisch abbaubaren Sammelbeuteln laut Abfallsatzung in Modellregion AVL untersagt ist, werden diese von den Scouts als Fehlwurf und damit als inkorrekte Nutzung der Tonne gewertet. Aus diesem Grund wurden für das Projekt drei Sammelgebiete (Steinheim, Markgröningen, Gerlingen) ausgewählt, in welchen bisher noch keine Kontrollen durchgeführt wurden und eine Sammelmenge von bis zu 20 Tonnen pro Anlieferung erreicht werden kann. Die Sammlungen für die AVL fanden im Sommersversuch für den Nullzustand im Juni und für die Versuchschargen im Juli 2021 statt. Für den Winterversuch fanden die Sammlungen für den Nullzustand im September und Oktober und für die Versuchschargen im November 2021 statt.

In der Modellregion GOA wurden die Sammelgebiete durch die Abfallverwertungsgesellschaft so gewählt, dass eine ausreichende Sammelmenge von bis zu 20 Tonnen pro Anlieferung zur Chargenanalyse erreicht werden konnte. Bei der GOA werden keine Kontrollen bezüglich der Inhalte der Bioabfallsammelsäcke durchgeführt. Die Sammlungen für den Winterversuch fanden für den Nullzustand im September und für die Versuchschargen im November 2021 statt. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Modellregionen für den Sommer- und den Winterversuch. Sie enthält Informationen zu Sammelsystemen, Sammelrhythmus sowie den eingesetzten Fahrzeugen.

Tabelle 3: Übersicht über die Modellregionen und deren Sammellogistik

Modellregion	Sammelsystem	Sammelfahrzeug	Sammelrhythmus (2021)
AVL - Steinheim	Holsystem Biotonne	Pressplattenfahrzeug	17. April – 15. Oktober wöchentlich Ab 15. Oktober 2-wöchentlich Umstellung während Winterversuch, in der Nullcharge noch wöchentlich, im Versuch dann 2-wöchentlich
AVL – Markgröningen	Holsystem Biotonne	Pressplattenfahrzeug	19. April – 18. Oktober wöchentlich Ab 18. Oktober 2-wöchentlich Umstellung während Winterversuch, in der Nullcharge noch wöchentlich, im Versuch dann 2-wöchentlich
AVL - Gerlingen	Holsystem Biotonne	Pressplattenfahrzeug	15. April – 13. Oktober wöchentlich Ab 13. Oktober 2-wöchentlich Umstellung während Winterversuch, in der Nullcharge noch wöchentlich, im Versuch dann 2-wöchentlich
GOA	Sacksammlung (PE-Säcke)	Pritschenfahrzeug	Durchgehend wöchentlich

Bei der AVL werden die Bioabfälle im Biotonnen-Sammelsystem mit Sammelfahrzeugen eingesammelt und anschließend an einem von zwei Umschlagplätzen angeliefert. Für dieses Projekt wurden hierfür ausschließlich Pressplattenfahrzeuge verwendet. An den Umschlagplätzen wurden die im Rahmen der Versuche gesammelten Bioabfälle separat in Containern gelagert, um eine Vermischung mit anderem Bioabfall auszuschließen. Anschließend wurden diese per Containerzug zu den jeweiligen Anlagen transportiert. Die Abholung der Biotonne (Sammelrhythmus) findet im Sommer einmal pro Woche statt. Im Winter findet die Umstellung auf eine zweiwöchentliche Abholung statt (siehe Tabelle 3). Die Bürger*innen zahlen nur die Leerung der Tonne, aber nicht, wie vielerorts üblich, die Bioabfallmenge. Das bedeutet zum einen, dass den Bürger*innen keine Kosten entstehen, sollte keine Biotonne zur Abholung bereitgestellt werden und zum anderen, dass die Bürger*innen in der Regel nur volle Biotonnen zur Abholung vor die Türe stellen.

Bei der GOA werden Bioabfälle mit einer Sacksammlung im Holsystem gesammelt. Die Bürger*innen sammeln ihren Bioabfall dementsprechend in den zur Verfügung gestellten PE-Sammelbeuteln und platzieren diese an den Abholungstagen am Straßenrand. Dort werden diese von den Müllwerkern erfasst und eingesammelt. Es ist ausschließlich die Sammlung in PE-Beuteln (Verkauf durch die GOA) gestattet, da die Bürger*innen die Abfallgebühren ausschließlich über den Erwerb dieser Abfallsammelbeutel zahlen. Für das Projekt wurden die ausgewählten Sammelmengen ebenfalls an einem Umschlagplatz getrennt gesammelt und anschließend per LKW zur Anlage transportiert. Hier war es nicht notwendig, dass die Zwischenlagerung in einem Container stattfand, da der Umschlagplatz ausschließlich von der

GOA genutzt wird und so eine Vermischung mit anderen Materialien ausgeschlossen werden konnte.

Es konnte nicht gewährleistet werden, dass sowohl in der Null- als auch in der Versuchscharge bzw. Sommer- und Winterversuch jeweils die gleichen Haushalte erfasst wurden. Grund hierfür ist zum einen, dass laut AVL die Biotonne durchschnittlich nur alle 3 Wochen bereitgestellt wird und in allen Modellregionen pro Sammlung mehr Mengen erfasst werden können, als tatsächlich im Projekt verwendet wurden (zwischen 10 – 24 Tonnen).

3.2.2 Beschreibung der Versuchskampagnen

Um mögliche jahreszeitliche Schwankungen der Abfallzusammensetzung abzubilden, wurde eine Versuchskampagne im Sommer (Juni/Juli) und eine im Herbst/Winter (Sep/Okt/Nov) durchgeführt. Die späteren Wintermonate konnte aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit nicht abgedeckt werden. In dem Sommersversuch waren nur die drei Sammelgebiete der AVL beteiligt. Für den Winterversuch wurde zusätzlich noch die Modellregion der GOA hinzugenommen.

Ca. 2-3 Wochen vor der Verteilung der BabbA-Sammelbeutel an die Bürger*innen in den Modellregionen wurden Chargenanalysen vom entsprechenden Bioabfall aus den Regionen durchgeführt, um den „Normal- bzw. Ist-Zustand“ der Kunststoff- und Fremdstoffbelastung einschätzen zu können. Diese Chargenanalysen werden im Folgenden als „Nullchargen“ bezeichnet. Die Chargenanalysen, die nach Verteilung der BabbA-Sammelbeutel durchgeführt wurden, werden dementsprechend „Versuchschargen“ genannt.

Die Verteilung der Projekt-Beutel erfolgte sowohl im Sommer- als auch im Winterversuch ca. zwei Wochen vor den Chargenanalysen der jeweiligen Versuchskampagne. Die Haushalte wurden je Kampagne aufgefordert, die Projekt-Beutel über einen bestimmten Zeitraum (6 Wochen) zu verwenden und anhand des Umfragebogens zu bewerten.

3.2.3 Beschreibung der untersuchten Bioabfallverwertungsanlagen

Anlage 1

Die Anlage 1 ist eine **reine Kompostierungsanlage** mit einer belüfteten Intensiv- und Nachrotte von bis zu jeweils 21 Tagen und einer Kompostreife ohne aktive Belüftung von bis zu 4 weiteren Wochen. Der Kompost wird nach einer Absiebung von Material > 15 mm ausschließlich in der Landwirtschaft vermarktet. Bei den Absiebvorgängen während des

Rotteprozesses entstehen Siebüberläufe mit Korngrößen von 80-x mm, 40-80 mm und 15-40 mm, die entweder intern als Strukturmaterial oder extern thermisch verwertet werden.

Anlage 2

Die Anlage 2 ist eine **diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage** (Boxenfermentieranlage) mit anschließender Kompostierung. Die Vergärung dauert zwischen 28 und 38 Tagen. Die anschließende belüftete Intensivrotte dauert ca. 2 Wochen und die ebenfalls belüftete Nachrotte bis zu 4 Wochen. Der Kompost wird nach einer Absiebung von Material > 15 mm ausschließlich in der Landwirtschaft vermarktet. Der flüssige Gärrest wird entweder im Kreislauf geführt oder extern verwertet. Bei den Absiebvorgängen während des Rotteprozesses entstehen Siebüberläufe mit Korngrößen von 50-x mm und 15-50 mm, die entweder intern als Strukturmaterial oder extern thermisch verwertet werden.

Anlage 3

Die Anlage 3 ist eine **kontinuierliche, thermophile Trockenfermentationsanlage** (Pfropfenstromfermentieranlage) mit anschließender Kompostierung. Im Unterschied zu den beiden vorherig genannten Anlagen wird der gesamte Bioabfall erst über einen Schredder (Langsamläufer) vorzerkleinert und nachfolgend auf 60 mm abgesiebt. Die Vergärung dauert ca. 14 Tage. Eine Schneckenpresse trennt den flüssigen vom festen Gärrest. Der feste Gärrest wird ca. 1 Woche einer Aerobisierung unterzogen und im Anschluss findet die bis zu 21 Tage dauernde, belüftete Intensivrotte statt, gefolgt von einer weiteren mehrwöchigen belüfteten Kompostreife. Der Kompost wird nach einer Absiebung von Material > 10 mm entweder in der Landwirtschaft vermarktet oder zur weiteren Bearbeitung an einen Substrathersteller abgegeben. Der flüssige Gärrest wird ausschließlich landwirtschaftlich verwertet. Der Siebüberlauf 60-x mm aus der Vorabsiebung wird thermisch verwertet und die beiden anderen Siebüberläufe 30-60 mm und 10-30 mm, die während des Rotteprozesses entstehen, werden entweder intern als Strukturmaterial verwendet oder extern thermisch verwertet.

3.3 Chargenanalysen

Zur Ermittlung des Verdrängungseffekts gegenüber konventionellen Kunststofftüten wurden aus den Bioabfallsammlungen der einzelnen Modellregionen, während der Sommer- und Winterversuche, anhand von Praxistests, Daten bezüglich der eingesetzten Sammelbeutel erhoben.

In Abstimmung mit dem UM wurde entschieden, dass der Bioabfall aus Steinheim (Papierbeutel) nur auf der reinen Kompostieranlage untersucht wird, während der Bioabfall aus den anderen drei Modellregionen (BAW-Beutel) in allen 3 Anlagentypen untersucht werden sollte.

Im Winterversuch wurde der Bioabfall aus den Sammelgebieten AVL-Markgröningen und AVL-Gerlingen nur auf jeweils zwei Anlagentypen untersucht (siehe Tabelle 4), aufgrund der Umstellung auf die 2-wöchentliche Bioabfallabholung. Um ausreichende Probemengen für die untersuchten Anlagen zur Verfügung zu haben, wurden entsprechend nur die reine Kompostierungsanlage (Anlage 1) und die diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage (Anlage 2) mit Bioabfall aus AVL-Markgröningen beliefert und die reine Kompostierungsanlage (Anlage 1) und die kontinuierliche, thermophile Trockenfermentationsanlage (Anlage 3) mit Bioabfall aus AVL-Gerlingen. Zusätzlich wurden alle drei Anlagen mit dem Bioabfall aus der Modellregion GOA untersucht.

Bei Modellregion GOA wurde nur einmal eine Nullcharge, bei Anlage 1, untersucht, da durch das System der Sack-Sammlung davon ausgegangen wurde, dass sich keine wesentlich andere Zusammensetzung des Bioabfalls, bezogen auf die GOA-Sammelbeutel, ergibt. Tabelle 4 stellt eine Übersicht der durchgeführten Analysen dar.

Tabelle 4: Übersicht über die durchgeführten Chargenanalysen

			Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
AVL - Steinheim	Sommer	Nullcharge	✓		
		Versuchscharge	✓		
	Winter	Nullcharge	✓		
		Versuchscharge	✓		
AVL - Markgröningen	Sommer	Nullcharge	✓	✓	✓
		Versuchscharge	✓	✓	✓
	Winter	Nullcharge	✓	✓	
		Versuchscharge	✓	✓	
AVL - Gerlingen	Sommer	Nullcharge	✓	✓	✓
		Versuchscharge	✓	✓	✓
	Winter	Nullcharge	✓		✓
		Versuchscharge	✓		✓
GOA	Sommer	Nullcharge			
		Versuchscharge			
	Winter	Nullcharge	✓		
		Versuchscharge	✓	✓	✓

Methodik zur Durchführung der Chargenanalyse

Zur Ermittlung eines potenziellen Verdrängungseffektes von PE-Beuteln durch den Einsatz der vom Projekt verteilten BAW- und Papierbeutel, wurde die Chargenanalysemethode nach Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2018)

gewählt und durchgeführt. Für dieses Projekt wurden hierbei folgende Anpassungen der Analysenvorschrift vorgenommen:

- Die Auswertung basiert auf der Verwiegung und der Anzahl der aussortierten Stoffe (bzw. der im Labor getrockneten Beutel) und nicht auf anteilig berechneten Gewichten, wie in der Methodenvorschrift vorgegeben.
- Lebensmittel in Kunststoff- oder Metallverpackungen wurden nicht nach Vorschrift entleert, sondern komplett als Fremdstoff gewertet, da sich diese Verpackungen während des Prozesses der Bioabfallbehandlung in der Regel auch nicht öffnen und unbehandelt im Siebüberlauf landen. Die Verpackungen aus Glas hingegen wurden geöffnet und restentleert, da diese auch in der Regel im Prozess, durch diverse mechanische Belastungen, zerstört werden und den Inhalt zur Vergärung/Kompostierung freigeben.
- Bei der Sortierung bedeutete die Definition eines Sammelbeutels: Der Beutel sollte einer konventionellen Kunststofftüte entsprechen, dementsprechend wurden z.B. Gefrierbeutel oder ähnliche Tüten nicht als Sammelbeutel gewertet, es sei denn sie enthielten offensichtlich ausschließlich Bioabfall – ansonsten wurden sie als Fremdstoff gewertet.
- Die Sammelbeutel wurden wie folgend kategorisiert, gezählt und verwogen (nach Abstreifen der Anhaftungen):
 - 1) Kunststoffbeutel:
 - a) Kategorie 1 – dickwandige Tragetaschen > A4
 - b) Kategorie 2 – dünnwandige Tragetaschen > A4
 - c) Kategorie 3 – kleinformatige Beutel < A4 und Hemdchenbeutel
 - d) Modellregion GOA – PE-Sammelbeutel
 - 2) BAW-Sammelbeutel:
 - a) Kategorie 4.1 – vom Projekt in den Modellregionen verteilt
 - b) Kategorie 4.2 – privat von Bürger*innen erworben
 - 3) Papier-Sammelbeutel
 - a) Kategorie 5.1 – vom Projekt in der Modellregion verteilt
 - b) Kategorie 5.2 – privat von Bürger*innen erworben

Die in den Chargenanalysen zu untersuchenden Materialien wurden aus den verschiedenen Modellregionen und Sammelgebieten an der jeweiligen Anlage unter Beachtung der Getrennthaltung angeliefert. Um eine aussagekräftige Probe bzw. zwei Stichprobeneinheiten je Analyse zu erhalten, wurde auf eine Methode aus der Vorschrift zur Chargenanalyse zurückgegriffen: Mithilfe von Probenhalbierung der angelieferten Mengen (je Sammelgebiet ca. 10 - 24 t) und erneutem Aufschütten des Haufwerks, wurde das Material bis zu einer

Restprobe von mindesten 250 kg reduziert. Wie im Probenahmeprotokoll der BGK gefordert, erfolgte vor der Sortierung eine Abschätzung der Feuchtigkeit und des Grüngutanteils an der Stichprobe. Anschließend wurden geschlossene Beutel aus der Probe aussortiert, die weitere Behandlung ist im unteren Abschnitt dargestellt. Das gesamte restliche Proben-Material wurde händisch auf einem Sortiertisch mit einer 20 mm Sieblochung sortiert. Eine Stichprobe des Materials < 20 mm wurde entnommen und im Labor der Universität Bayreuth auf Kunststoffe größer und kleiner 1 mm weiter analysiert, siehe Abschnitt 3.4.

Folgende Sortierfraktionen wurden jeweils im losen Bioabfall und in geschlossenen Beuteln gewählt:

- Bioabfall
- Fremdstoffe
 - Sonstige Kunststoffe
 - Glas
 - Metall
 - Schadstoffe (z.B. Medikamente, Batterien)
 - Verpackte Lebensmittel – ungeöffnet
 - Kunststoffverpackung
 - Metallverpackung
 - Sonstige Fremdstoffe
- Folienbeutel (Kategorisierung siehe oben)
- Papierbeutel

Alle aussortierten Fraktionen wurden, soweit wie möglich, anhaftungsfrei fotografisch dokumentiert und verwogen. Als Ergebnis der Chargenanalysen wurden Daten zu den Sammelbeuteln, eine Aussage bezüglich eines möglichen Verdrängungseffekts von PE- durch BAW-Beutel, bzw. Papierbeutel sowie zu den Gesamtfremdstoffgehalten für jede Modellregion erlangt. Eine ausführliche Beschreibung der Chargenanalysen befindet sich im Anhang, inklusive eines Beispiels der Durchführung anhand einer Modellregion (einschließlich Fotodokumentation und Ergebnisprotokoll).

3.4 Kunststoffanalysen

3.4.1 Vorgehen zur Kunststoffanalyse größer 1 mm im Bioabfall und Kompost

Aufbereitung der Kunststoffbeutel aus der Chargenanalyse

Um die Masse der angelieferten Beutel ohne Anhaftungen zu bestimmen und auf die Trockenmasse des angelieferten Bioabfalls beziehen zu können, wurden diese in Wasser mit Spülmittel gewaschen und anschließend auf Wäscheständern bei Raumtemperatur getrocknet

und verwogen. Um das Trockengewicht des Bioabfalls zu bestimmen, wurden fünfmal ca. 100 ml der zu untersuchenden Probe entnommen, gewogen, anschließend für 24 h bei 105 °C getrocknet und abermals gewogen. Aus dem dadurch erhaltenen Gewichtsunterschied wurde das Trockengewicht und der prozentuale Feuchtigkeitsanteil bestimmt.

Probenahme

Zur Untersuchung des Bioabfalls und Kompostes wurden vor Ort Sammelproben in Anlehnung an das Methodenbuch der Gütegemeinschaft Kompost (Kehres & Bundesgütegemeinschaft Kompost, 2006) genommen. Hierfür erfolgte bereits im Jahr 2019 eine Einweisung der Projektmitarbeitenden durch einen zertifizierten Probenehmer.

Feste Gärreste und Proben aus der Intensivrotte wurden stichprobenartig genommen. Hierzu wurde während der Um- und Auslagerung der Gärreste jeweils 6 Liter Probe von 10 Radlader Schaufeln genommen und anschließend nach dem Methodenbuch der Gütegemeinschaft Kompost auf einer ca. 20 Liter großen Probe reduziert.

Um eine Kontamination der Proben für Kunststoffpartikeln kleiner 1 mm zu vermeiden, wurde bei der Probenahme darauf geachtet, dass kunststofffreies Werkzeug verwendet, und Baumwollkleidung, bzw. Sicherheitsanzüge (antistatisch, Material: Tyvek®) getragen wurde.

Die entnommenen Stichproben wurden ohne Kühlung in geschlossenen Glasgefäßen zur Universität Bayreuth überführt und im Labor, nach dem im Methodenbuch der Gütegemeinschaft beschriebenen Verfahren homogenisiert und bei 4 °C gelagert.

Analyse der Fragmente > 5 mm und 1-5 mm

Für die Analyse der Kompost- und Gärrestproben wurden ca. 3 L der Probe entnommen, gewogen, gleichmäßig auf 6 Glasgefäße (Vol. 3 L) verteilt und anschließend in jeweils 2,5 L Wasser suspendiert. Die suspendierten Proben wurden anschließend über 5 mm und 1 mm Siebe nass gesiebt und potenzielle Kunststoffpartikel (Fraktion > 5 mm und 1-5 mm) manuell aussortiert. Die Wahl der unteren Siebgröße lag zugrunde, dass seit dem 01.01.2021 die Fremdstoffgrenze für Kunststoffe bei organischen Düngern auf 1 mm herabgesetzt wurde (§3, 4b, DüMV und §3, 4c, DüMV) und Kunststoffe im Größenbereich 1-5 mm bereits als Mikrokunststoffe gelten.

Die aus den Siebrückständen aussortierten Kunststoffpartikel wurden anschließend unter einem Auflichtmikroskop fotografiert (Nikon SMZ 754T; Software: NIS Elements D) und vermessen (die kürzere Seite der gefundenen Partikel wurde immer als „Breite“ und die längere Seite als „Länge“ definiert.) Danach wurden die Partikel mittels ATR-FTIR-Spektroskopie (= abgeschwächte Totalreflexions-Fourier Transformations Infrarot-Spektroskopie) analysiert, um die Kunststoffart der Partikel eindeutig bestimmen zu können. Das verwendete Spektrometer war das Alpha II ATR-FTIR Spektrometer der Firma Bruker

(Software: Opus 7.5), das mit einem ATR-Kristall aus Diamant ausgestattet ist. Die resultierenden Spektren wurden mit Referenzspektren aus relevanten Datenbanken verglichen, um die Kunststoffarten eindeutig identifizieren zu können.

Des Weiteren wurde das Trockengewicht der Komposte und festen Gärreste bestimmt. Dazu wurden fünfmal ca. 100 ml der zu untersuchenden Probe entnommen, gewogen, anschließend für 24 h bei 105 °C getrocknet und abermals gewogen. Aus dem dadurch erhaltenen Gewichtsunterschied wurde das Trockengewicht und der prozentuale Feuchtigkeitsanteil bestimmt. Ebenfalls wurde eine Rückstellprobe bei -20 °C eingefroren.

3.4.2 Methodenentwicklung zur Analyse von kleinen Mikrokunststoffen (< 1 mm) im Kompost

Im Projekt BabbA wurde die Eignung einer Öl-Wasser-Phasentrennung (Scopetani et al., (2020)) zur Aufkonzentration und Aufreinigung von Bioabfall- und Kompostproben für die Mikrokunststoffanalytik geprüft und weiterentwickelt. In Vorversuchen mit Rapsöl zeigte sich, dass konventionelle Kunststoffsorten, aber auch Fragmente kompostierter BAW-Beutel, sich in der Öl-Phase anreichern, während der Großteil des organischen Materials und der mineralische Anteil in der Wasser-Phase verbleiben. Voraussetzung für eine gute Trennung ist allerdings, dass die Kunststoffe vorher von anhaftenden Verunreinigungen befreit werden. Hierzu wird die Probe vor der Phasentrennung mit einer Fenton-Oxidation behandelt (30-% Wasserstoffperoxid mit einem Eisen(II)-sulfat Katalysator).

Nach Anpassung der Methode, wurden nun Bioabfall und Kompostproben in Triplikaten von jeweils 10 g auf Mikrokunststoffe und vor allem PBAT- oder PLA-basierten BAW-Fragmenten im Größenbereich 10 – 500 µm untersucht. Insgesamt wurden 93 Aliquote von 31 Proben analysiert. Nach der Fenton-Oxidation wurden die Proben in 10 cm hohen PTFE-Röhrchen (Polytetrafluorethylen) mit einem Innendurchmesser von 3 cm zur Öl-Wasser-Phasentrennung überführt. PTFE wurde als Material gewählt, da es weder durch Wasser noch Öl gut benetzbar ist, und somit der Verlust von an der Röhrchenwandung anhaftenden Partikeln minimiert wird. Die Röhrchen wurden nachfolgend mit 140 ml gefiltertem Wasser aufgefüllt und 5 ml Öl hinzugefügt. Die PTFE-Röhrchen wurden verschlossen, gut geschüttelt und etwa zwei Stunden stehen gelassen, um eine vollständige Phasentrennung zu erlauben. Nach der Phasentrennung wurden die Röhrchen eingefroren. Dies ermöglicht im Anschluss eine schnelle Abtrennung der Öl-Phase von der nun festen Wasser-Phase. Anschließend wurden die aufgereinigten Proben auf Aluminiumoxid-Probenträger gefiltert, welche mittels Focal Plane Array Detektor (FPA)-basierter µ-FTIR Spektroskopie (Bruker Hyperion 3000) analysiert wurden (Abbildung 1). Die Auswertung der Spektren erfolgte mit dem, von der TöK1 in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien entwickelten, Programm "Bayreuth

Particle Finder“ (Abbildung 2), das jetzt von dem Startup Purity GmbH als „Microplastics Finder“ weiterentwickelt und vertrieben wird.

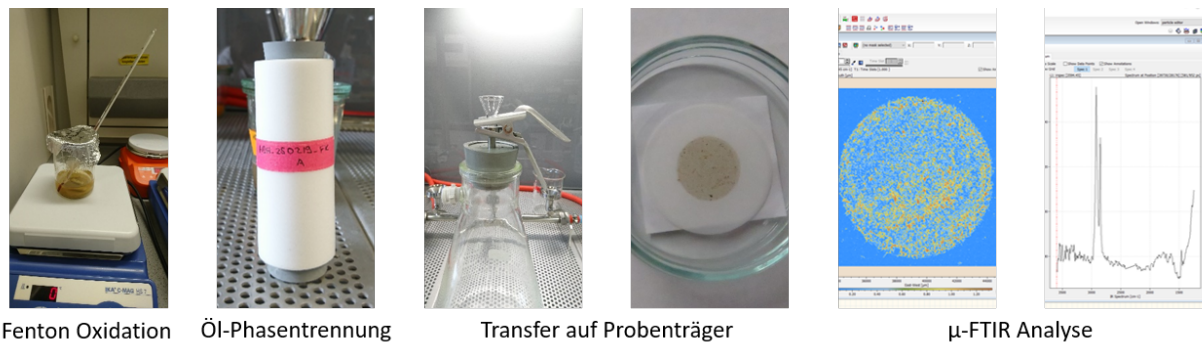


Abbildung 1: Arbeitsablauf der Aufreinigung und Analyse der kleinen Mikrokunststoffpartikel aus Kompostproben

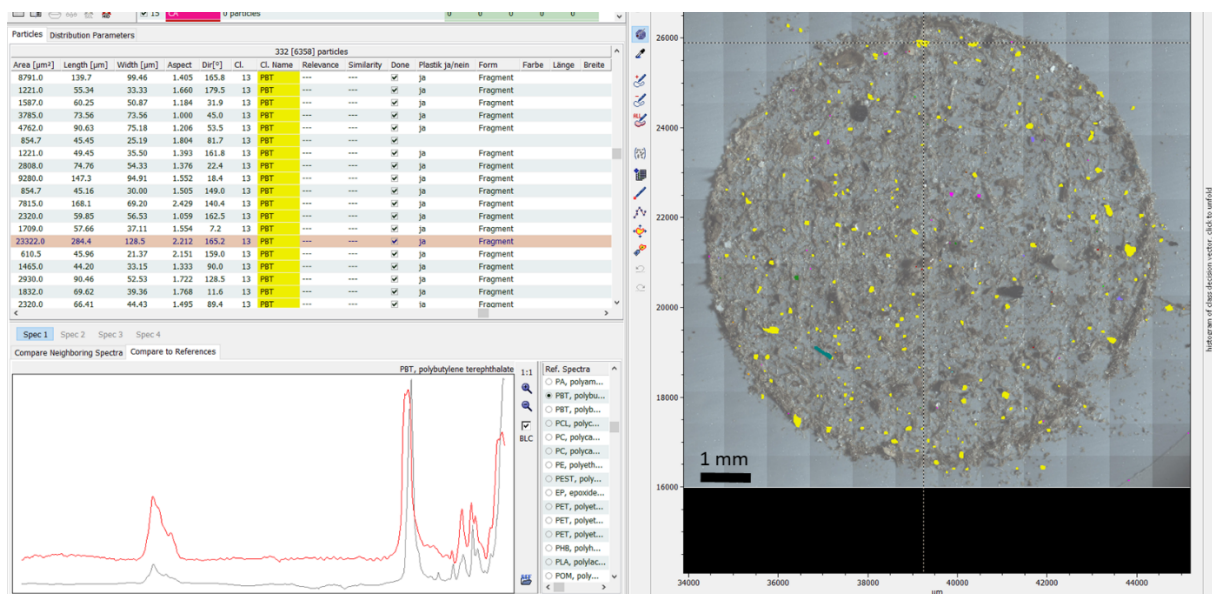


Abbildung 2: Focal Plane Array Detektor (FPA)-basierte µ-FTIR Analyse einer Kompostteilprobe mit automatisierter Mikrokunststoffpartikelidentifikation

3.4.3 Raman Analyse von Mikrokunststoffen kleiner als 10 µm im Kompost

Raman Spektroskopie ist eine laserbasierte spektroskopische Methode, mit der man neben der µ-FTIR Spektroskopie detaillierte Informationen über die chemische Struktur eines Materials erlangen kann. Im Gegensatz zur µ-FTIR Spektroskopie, die eine Partikelidentifikation bis zu 10 µm erlaubt, hat Raman Spektroskopie eine Auflösung von etwa 500 nm – erlaubt also die Identifikation von sehr kleinen Mikrokunststoffpartikeln. Allerdings ist ein großer Nachteil der Anwendung der Raman Spektroskopie gerade bei Umweltproben die Überlagerung des Raman-Signals, durch den von der Umweltmatrix ausgehenden Fluoreszenzhintergrund. Auch der Kompost emittiert bei Anregung Fluoreszenz, welches das

Raman Signal übertönt. Daher muss die störende Matrix möglichst komplett entfernt werden. Während der Versuche zeigte sich, dass auch kompostierte BAW-Folien (PBAT) einen starken Fluoreszenzhintergrund aufweisen, der vermutlich durch die Anhaftung eines Biofilms bedingt ist. Durch Erhöhung der Laserintensität von 5 mW auf 20 mW und Erhöhung der Akkumulationszahl auf 170 gelang es ein PBAT-Signal zu detektieren (Abbildung 3).

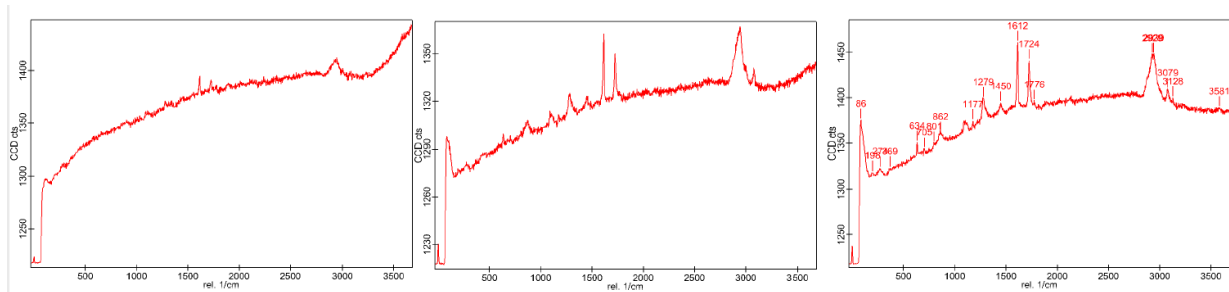


Abbildung 3: Verbesserung des Raman Signals von kompostiertem PBAT durch Erhöhung der Laserintensität (von rechts nach links 5 mW, 15 mW und 20 mW)

Nach einer Aufreinigung der Kompostprobe (5 g) mittels Fenton-Oxidation und Auswaschen der störenden kolloidalen Matrix durch einen 5 µm Filter, war eine ramanspektroskopische Analyse eines Teilbereichs der Probe möglich. Allerdings wurden in der exemplarischen Probe, deren Vermessung etwa 6 Stunden benötigte, nur zwei MKS <10 µm identifiziert: Polystyrol (3,2 µm x 3,0 µm) und Polyamid (9,5 µm x 3,5 µm) (Abbildung 4).

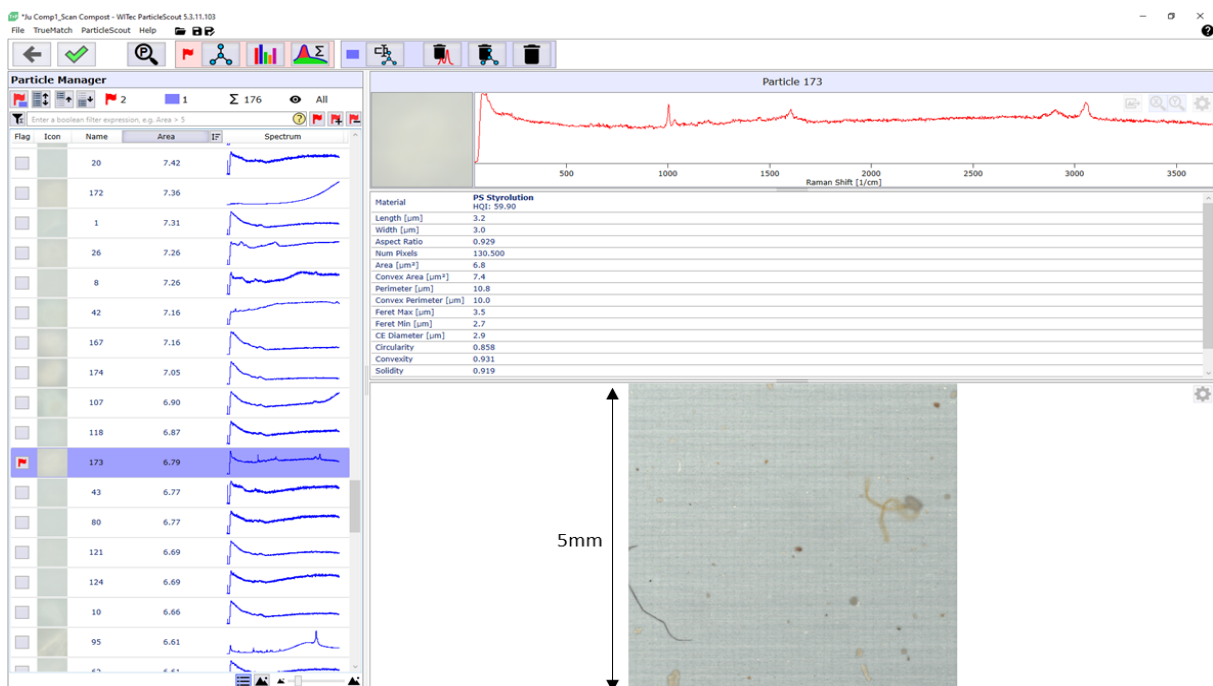


Abbildung 4: Ergebnisse zur Raman Analyse einer Kompostprobe im Größenbereich 5-10 µm

Unter den aktuellen Bedingungen scheint eine systematische Raman Analyse von komplexen Kompostproben wenig sinnvoll, da die nach der Aufreinigung verbleibende Kompostmatrix selbst eine relativ starke Fluoreszenz aufweist, die die Raman Signale stört. Um diese störende Matrix aus feinem Material zu entfernen, musste eine Filtration durch einen 5 µm Filter erfolgen, was den Mehrwert der Raman Analyse, die theoretisch die Analyse von Partikeln bis 500 nm ermöglichen sollte, zunichtemacht, da Partikel kleiner 5 µm bei der Filtration verloren gehen. Bei der Raman Spektroskopie gibt es derzeit zwei Möglichkeiten der Probenmessung, das Mapping und eine partikelbasierte Analyse. Beim Mapping wird die Probe in festgelegten Abständen abgerastert und gemessen. Hierbei ergibt sich die laterale Auflösung durch den Abstand der Rasterpunkte und die Messungen größerer Probenflächen mit hoher Auflösung dauern sehr lange. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Messzeit ist die partikelbasierte Ramananalyse. Die Partikelfindung und die darauf basierende Festlegung der Messkoordinaten, basiert auf Kontrastunterschieden im optischen Bild, wodurch sich gerade bei wenig Kontrast zwischen Filterhintergrund und Partikel, z.B. hellen Partikeln auf einem hellen Hintergrund, nicht gut realisieren lassen. Die im Projekt durchgeführten Experimente zur Probenaufreinigung und Analyse mittels Ramanspektroskopie haben gezeigt, dass hier noch viel weitere Entwicklungsarbeit geleistet werden muss, um diese Art komplexer Proben zu analysieren.

3.5 Laborexperimente zur Untersuchung des Abbauverhaltens der BAW-Projektbeutel

Um aussagekräftige Kompostierprozesse im Labormaßstab durchführen zu können, wurden bei der Konzipierung der Laboranlagen/Prozesse die Anforderungen in der DIN EN ISO 14045, bzw. der DIN EN ISO 16929 weitestgehend berücksichtigt. Der zu kompostierende Bioabfall wurde direkt aus einer lokalen Bioabfallverwertungsanlage beschafft. Dabei wurde darauf geachtet, dass holzige Bestandteile im Bioabfall enthalten sind (> 10 % Strukturmaterial), um eine gute Kompostierung sicherzustellen. Die Kompostierung wurde über 6 Wochen durchgeführt. Des Weiteren wurden während der Kompostierung Temperatur, pH-Wert und Sauerstoffgehalt gemessen. Diese Werte wurden alle gemäß der Norm DIN EN 14045 eingehalten.

3.6 Bodenversuche

Kompostierte BAW-Beutel aus dem Sommer- und Winterversuch wurden in den Anlagen 1 und 2 aus dem Siebüberlauf nach vollständig abgeschlossener Kompostierung beprobt. Mittels ATR-FTIR Spektroskopie konnte die Art der in den Anlagen beprobten BAW-Beutel eindeutig identifiziert werden. Tabelle 5 gibt eine Übersicht der kompostierten BAW-Materialien, die in den standardisierten Labortests verwendet wurden.

Tabelle 5: Kompostierte BAW-Materialien

Sommercharge 2021		
BAW-Beutel	Anlage	Modellregion
ecovio®	Anlage 1	AVL - Gerlingen
Wintercharge 2021		
BAW-Beutel	Anlage	Modellregion
ecovio®	Anlage 1	GOA
Mater-Bi® (Standard)		AVL - Gerlingen
ecovio®	Anlage 2	GOA
Mater-Bi® (Standard)		AVL - Gerlingen

Mit den kompostierten BAW-Materialien aus dem Sommer- und Winterversuch wurde je ein Abbauersuch durchgeführt (DIN EN ISO 17556, 2019). Die Abbaubarkeit der BAW-Beutel im Boden mittels standardisierten Labortests wurde durch Messung des freigesetzten Kohlendioxids im Vergleich zu einem kunststofffreien Kontrollboden mittels Titration bestimmt (vgl. Schöpfer et al. 2022). Neben den kompostierten BAW-Beuteln (Tabelle 5) wurden als Referenzmaterialien unbehandelte BAW-Beutel, wachsbeschichtete Papiersammeltüten, Polyhydroxybutyrat-Pulver (PHB) als positive Kontrolle und Low-Density-Polyethylen-Folien (LDPE) als negative Kontrolle im Boden inkubiert (Tabelle 6).

Vor Verwendung der BAW-Beutel, wurden diese 7 Tage lang bei 30 °C in einem Trockenschrank getrocknet. Der zur Berechnung des Mineralisierungsgrades benötigte Massenanteil von Kohlenstoff (C) der Prüfmaterialien (vgl. Schöpfer et al. 2022) wurde mittels C-Analyzer gemessen (Tabelle 7).

Tabelle 6: Unbehandelte Referenzmaterialien

Referenzmaterialien	Herkunft
BAW-Beutel ecovio®	BabbA
BAW-Beutel Mater-Bi® (Standard)	
Papierbeutel (wachsbeschichtet)	
Folie Low-Density-Polyethylen (LDPE)	MiKoBo
Granulat Polyhydroxybutyrat (PHB)	

Tabelle 7: Massenanteil von Kohlenstoff (%) der Prüfmaterialien

Material	Vorbehandlung	Massenanteil Kohlenstoff (%) ¹
		Mittelwert ± Standardabweichung
ecovio®	Unbehandelt	49,5 ± 0,1
	Wintercharge Anlage 1	48,4 ± 0,4
	Sommercharge Anlage 1	48,1 ± 0,1
	Sommercharge Anlage 2	35,1 ± 1,0
Mater-Bi®	Unbehandelt	57,4 ± 0,0
	Sommercharge Anlage 1	48,6 ± 0,1
	Sommercharge Anlage 2	40,5 ± 0,7
Papier	Unbehandelt	40,1 ± 1,1
LDPE	Unbehandelt	84,9 ± 0,7
PHB	Unbehandelt	55,2 ± 0,1

¹ Mittelwert aus 3 Replikaten, bei PHB aus 5 Replikaten

Für die Versuche wurde auf 2 mm gesiebter Oberboden (0 - 20 cm) von der Ackerfläche des Feldversuchs des BWPlus-Projekts MiKoBo (Versuchsstation Heidfeldhof, Universität Hohenheim) verwendet (siehe auch Schöpfer, Möller, et al., 2022). Der Boden ist ein Luvisol mit schluffig-lehmiger Textur, einem pH-Wert von 6,4 und einem C/N-Verhältnis von 9. In Mikrokosmen wurden jeweils 1 bzw. 0,5 g der Prüfmaterialien in Form von 5 mm × 5 mm großen Folienstücken (Abbildung 5) vermischt und mit 100 bzw. 50 g Boden für die Versuche der Sommer- bzw. Wintercharge eingefüllt (Abbildung 6).



Abbildung 5: Folienstücke (5 mm × 5 mm) kompostierter BAW-Beutel aus ecovio® nach biologischer Vorbehandlung in den Anlagen 1 (links) und 2 (Mitte) und unbehandelter BAW-Beutel aus ecovio® (rechts)

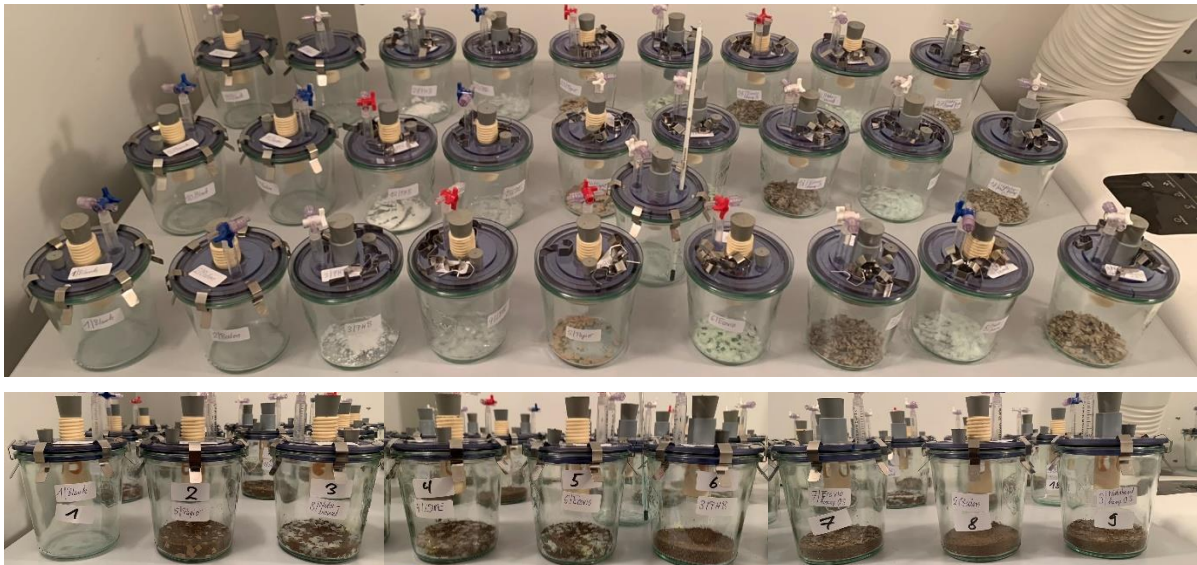


Abbildung 6: Abbaueversuch der Wintercharge 2022 (ohne Materialien aus Anlage 2), vor (oben) und nach (unten) dem Untermischen der Prüfmaterialien in den Boden (Versuchsstart)

Die Versuche wurden bei optimaler Bodenfeuchte und Temperatur durchgeführt (pF 2,5; Temperatur 20 °C). Jede Behandlung (einschließlich der Kontrolle ohne Materialzugabe) wurde dreifach repliziert. Aufgrund der im Verlauf des Versuches festgestellten Undichtigkeit einiger Mikrokosmen und der in wenigen Einzelfällen fehlerhaft durchgeführten Titration, konnten bei der Auswertung des Abbaueversuches der Sommercharge zum Teil nur zwei Replikate (PHB, Papier und LDPE) berücksichtigt werden. Bei der Beprobung der BAW-Materialien in Anlage 2 kam es Covid-bedingt zu Verzögerungen und es war unklar, ob überhaupt Material gewonnen würde. Daher wurde der Versuch der Sommercharge zunächst ohne Material aus Anlage 2 angesetzt. Die BAW-Materialien aus Anlage 2 wurden nachfolgend mit einem zeitlichen Versatz von 13 Tagen zusammen mit einem neu angesetzten kunststofffreien Kontrollboden inkubiert. Von den in Anlage 2 behandelten BAW-Beuteln aus Mater-Bi® (Standard) konnte nur sehr wenig kompostiertes Material für die Abbaueversuche im Boden gewonnen werden (Abbildung 7), so dass der Versuch für dieses Material nur mit zwei Replikaten durchgeführt wurde.



Abbildung 7: Kompostierte BAW-Beutel Mater-Bi® (Standard) der Wintercharge 2022 mit biologischer Vorbehandlung in der Anlage 2

Zur Bewertung der Auswirkungen der BAW-Beutel auf wichtige mikrobielle Bodenfunktionen, wurde der Kohlenstoffumsatz im Boden mittels potenzieller Aktivität von Bodenenzymen quantifiziert (DIN ISO/TS 22939, 2010; Schöpfer, Schnepf, et al., 2022). Zur Auswertung der Enzymdaten wurden lineare Modelle verwendet (Details in Schöpfer et al., 2022). Aufgrund von Varianzheteroskadisizität der Residuen, wurde eine Varianzstruktur pro Behandlungsgruppe gefittet. Die Kontraste zur Kontrolle, sowie zwischen kompostiertem und unbehandeltem ecovio® Material wurden ausgewertet.

3.7 Öffentlichkeitsarbeit

Eine der wesentlichen Ursachen für den großen Kunststoffanteil im Bioabfall ist das Sammelverhalten der Bürger*innen. Daher war es außerdem ein Ziel von BabbA, das Bewusstsein der Bürger*innen in Hinsicht auf Bioabfall, Fremdstoffe und die Nutzung von BAW-Sammelmedien zu schärfen. Hierzu wurden den Bürger*innen, die in den Versuchsgebieten wohnen, zusätzlich zu den Umfragebögen (in denen sie ihre eigenen Erfahrungen und Bewertungen mitteilen) auch Flyer und Infobriefe zur Verfügung gestellt. Diese sollten zum einen informieren, aber vor allem die Akzeptanz der Bürger*innen für den Praxisversuch, an dem sie durch Nutzung der bereitgestellten BAW-Beutel teilnehmen sollten, erhöhen. Die allgemeinen Informationen, sowie Informationen zum Projekt BabbA und dessen

Fortschritte und Ergebnisse wurden zusätzlich allgemein zugänglich auf der Projekthomepage (www.projekt-babba.de) veröffentlicht (Abbildung 8).



Abbildung 8: Titelseite der Homepage des Babba-Projektes

3.7.1 Erstellung von Informationsblättern (Flyer) zur Information der Bevölkerung über die Praxistests

Für das Projekt wurden in Zusammenarbeit mit einem Büro für Wissenschaftskommunikation (Unterauftrag an Daniela Leitner – Design trifft Wissenschaft) ein Logo und ein Flyer erstellt, welcher neben den ebenfalls erstellten Umfragebögen an alle Haushalte im Sommer- und Winterversuch verteilt wurde (Abbildung 9 und im Anhang). Zusätzlich wurde eine Hotline eingerichtet, über die sich die Bürger*innen über das Projekt informieren konnten.

Logo



Flyer

The flyer is divided into several sections. At the top left, 'Biofall als Wertstoff' explains the importance of separating biodegradable waste. The top right features the 'FORSCHUNGSPROJEKT' logo and the 'Babba' logo with the tagline 'Biologisch abbaubarer Biofall in der Bioabfallverwertung'. Below this, it states 'Biofall – kein Abfall, sondern ein Wertstoff voller Energie und Pflanzennährstoffe'. The middle section, 'Einfache und bayerische Sammlung mit und ohne Biofall?', provides instructions for collection. The bottom section, 'Abbau oder nicht?', discusses the biodegradability of different materials. Logos for Fraunhofer IPT, Universität Bayreuth, Universität Bamberg, and BEM are included.

The infobrief is titled 'Was macht Babba?' and is divided into three main parts: 'Praxisversuch in drei Modellregionen', 'Biofälle - Verwertung in regionalen Anlagen', and 'Das Ziel - sauberer Kompost für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft'. It includes a central diagram with 10 numbered steps showing the waste management process from collection to composting. The text explains the goals of the project, such as reducing landfill waste and producing high-quality compost. It also mentions the 'Biofall-Sammlung' and the 'Biofall-Verwertung' process.

Infobrief & Umfragebogen

The survey form is titled 'Babba' and 'Biologisch abbaubarer Biofall in der Bioabfallverwertung'. It is addressed to 'Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Bioabfallverwerter'. The form contains five main sections of questions:

- BIOFALLSAMMLUNG:** Questions about household biowaste collection, including whether it is collected, the collection method (curbside, separate bin, or mixed with other waste), and the collection frequency.
- Verwertung:** Questions about the disposal of biowaste, including whether it is composted, the type of compost (open, closed, or mixed with other waste), and the use of compost.
- Wie entsorgen Sie biologische Abfälle?** A table with columns for 'Ofters', 'Gelegentlich', 'Seltens', and 'Falls nicht an'. Rows include 'Obst- und Gemüseabfälle', 'Gekochte Speisen', 'Alte, übrig gebliebene oder veraltete Lebensmittel', and 'Gartenabfälle, Grünabfall, Rasenschnitt'.
- Forschungsprojekt zu biologisch abbaubarem Biofall-Baustein - Ihre Mülltüte ist gefragt!** Questions about the use of biodegradable biofall building blocks, including whether they are used, the type of building block (paper, plastic, or mixed), and the frequency of use.

 The form concludes with contact information for the project coordinators, Hans-Joachim Stoppok and Hans-Joachim Stoppok, and the website www.projekt-babba.de.

Abbildung 9: Darstellung des Babba-Logos, der verteilten Flyer und Infobrief

Über das Logo (Flyer, Infobriefe, Umfragekampagne, Projekthomepage, BAW- und Papier-Sammelmedien) wurde ein „Corporate Design“-Effekt mit hohem Wiedererkennungswert erzeugt.

Das Projekt wurde im Rahmen der online UM-Veranstaltung „Statuskolloquium Umweltforschung“ am 06.07.2021 in Form einer Präsentation und Postern präsentiert.

3.7.2 Erstellung Projekthomepage

Für das Projekt wurde eine Homepage (www.projekt-babba.de) erstellt, die in Zusammenarbeit gepflegt und letztendlich mit den Ergebnissen gefüllt wird (Unterauftrag an Daniela Leitner – Design trifft Wissenschaft).

3.7.3 Umfragekampagne

Der Fragebogen für die Umfragekampagne wurde durch den Projektpartner BPT in sehr enger Zusammenarbeit mit AVL, GOA (nur Winterversuch), BEM und UM erstellt. Seitens der BPT wurde hierzu eine Zusammenarbeit mit Vivien Mierig (Bachelorandin am Lehrstuhl Methoden der empirischen Sozialforschung, Dr. phil. Andreas Kögel; LS-Inhaberin Prof. Schindler) begonnen. Dabei sollten vor allem die Meinung der an den Versuchen teilnehmenden Bürger*innen zu BAW-Beuteln, sowie ihre Erfahrungen hinsichtlich Handling und Alltagstauglichkeit der verteilten Beutel, erfragt werden. Auch das Sammel- und Trennverhalten der Bürger*innen wurde erfragt.

4. Ergebnisse

4.1 Stoffstromanalysen der Anlagen

Im Rahmen der Stoffstromanalysen des BabbA Projektes wurden in den verschiedenen Anlagen jeweils Stichproben des angelieferten Bioabfalls der unterschiedlichen Modellregionen, des Rotteguts nach der Intensivrotte, des Fertigkomposts und teilweise des Siebüberlaufs entnommen und auf alle Sammelbeutel und Kunststofffragmente > 1 mm untersucht.

4.1.1 Chargenanalysen: Führt die Verteilung von BAW-Sammelbeuteln zu einer Verdrängung von konventionellen Kunststoff-Sammelbeuteln im angelieferten Bioabfall?

Um einen besseren Überblick über die Qualität und den Fremdstoffgehalt des angelieferten Bioabfalls zu bekommen, wurden zu Beginn der Versuche Chargenanalysen durchgeführt. Durch die Chargenanalysen sollte zudem die Frage geklärt werden, ob durch die Verteilung von BabbA-Sammelbeuteln eine Veränderung des Sammelverhaltens der Bürger*innen zu beobachten ist (z.B. Verdrängung von PE-Sammelbeuteln, allgemein geringerer Fremdstoffgehalt).

Anteile der Sammelbeutel im Bioabfall

Ein grundlegendes Ziel von BabbA war die Untersuchung, ob durch die Verteilung von projekteigenen BabbA-Sammelbeuteln (BAW oder Papier) in den Modellregionen ein Verdrängungseffekt bei konventionellen Kunststoffbeuteln (vornehmlich PE) als Sammelmedien für Bioabfall zu beobachten ist. Hierzu wurden in den Modellregionen BabbA-Sammelbeutel an die Haushalte verteilt und vor und nach der Verteilung der Sammelbeutel Chargenanalysen des Bioabfalls nach den Richtlinien der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. in den entsprechenden Anlagen durchgeführt. Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen jeweils eine Übersicht der Modellregionen, die dort verteilten Sammelbeuteln und den beprobten Anlagen der Sommer- und Winterkampagne.

Tabelle 8: Sommerkampagne: Übersichtstabelle zu den Versuchsgebieten, dem Material der verteilten Beutel und den Anlagen, an die das entsprechende Bioabfall aus den Modellregionen angeliefert und untersucht wurde

Sommerkampagne	Beutelmateriale	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
AVL – Gerlingen	50%/50% ecovio® Standardbeutel / Mater-Bi® Standardbeutel	✓	✓	✓
AVL – Markgröningen	Mater-Bi® Hemdchenbeutel	✓	✓	✓
AVL – Steinheim	Papierbeutel	✓		

Tabelle 9: Winterkampagne: Übersichtstabelle zu den Versuchsgebieten, dem Material der verteilten Beutel und den Anlagen, an die das entsprechende Bioabfall aus den Modellregionen angeliefert und untersucht wurde.

Winterkampagne	Beutelmateriale	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
AVL – Gerlingen	Mater-Bi® Standardbeutel	✓		✓
AVL – Markgröningen	Mater-Bi® Hemdchenbeutel	✓	✓	
AVL – Steinheim	Papierbeutel	✓		
GOA – Ostalbkreis	ecovio® Standardbeutel	✓	✓	✓

Um den tatsächlichen Einsatz der verteilten BabbA-Sammelbeutel zu untersuchen, sowie den Input von kommerziell erhältlichen BAW-Beuteln und konventionellen Kunststoffbeuteln zu ermitteln, wurde der angelieferte Bioabfall in Chargenanalysen detailliert sortiert und untersucht. Für die Auswertung wurde die Masse der in den Chargenanalysen erfassten Beutel jeweils auf eine Tonne Bioabfall (Feuchtmasse) hochgerechnet. Zusätzlich wurden alle in der Chargenanalyse erfassten Beutel im Labor gewaschen, getrocknet und erneut gewogen, um Verfälschungen durch biogene Anhaftungen auszuschließen. Diese Daten wurden auf eine Tonne Bioabfall (Trockenmasse) hochgerechnet. Um einen Vergleich der Methoden (Masseberechnung mit Anhaftungen auf Feuchtmasse normiert, ohne Anhaftungen auf

Trockenmasse normiert) darzustellen, werden im Folgenden die Ergebnisse beider Methoden gegenübergestellt.

Im Sommersversuch wurde nach Verteilung der BAW-BabbA-Sammelbeutel in allen Modellregionen der AVL ein rückläufiger Trend des Anteils an konventionellen Kunststoffsammlbeuteln festgestellt (bezogen auf die Trockenmasse): Durchschnittlich ging der Anteil von Kunststoffbeuteln im Bioabfall aus Gerlingen von 6,1 kg/t ($\pm 3,0$ kg/t) in den Nullchargen auf 1,3 kg/t ($\pm 0,3$ kg/t) in den Versuchschargen zurück. Im Markgröningen waren es 11,1 kg/t ($\pm 4,0$ kg/t) in den Nullchargen und 4,3 kg/t ($\pm 2,8$ kg/t) in den Versuchschargen und in Steinheim waren es der Analyse aus Anlage 1, 4,8 kg/t in der Nullcharge und 2,7 kg/t in der Versuchscharge (Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12). Diese Beobachtung konnte allerdings in der Winterkampagne nicht repliziert werden. Hier war die Kunststoffbelastung bezogen auf die Trockenmasse des Bioabfalls generell etwas geringer als im Sommer, es gab aber im Rahmen der Standardabweichung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Nullchargen und den Versuchschargen (Gerlingen Null: 1,8 kg/t \pm 0,7 kg/t, Gerlingen Versuch: 1,7 kg/t \pm 0,3 kg/t; Markgröningen Null: 3,3 kg/t \pm 2,8 kg/t; Markgröningen Versuch: 2,2 kg/t \pm 1,0 kg/t; Steinheim Null: 3,1 kg/t, Steinheim Versuch: 2,2 kg/t) (Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15).

Die Quantifizierung der Nutzung der BabbA Papiersammelbeutel in den Versuchschargenanalysen war nicht möglich, da das Papier bereits bei der Anlieferung in den Anlagen extrem viel Feuchtigkeit aufgenommen hatte und die Beutel nicht mehr eindeutig identifiziert werden konnten. Dies ist der Grund weshalb zum Gehalt an Papierbeuteln keine detaillierten Daten aufgenommen werden konnten.

Es gab in Steinheim eine deutliche Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Analysen mit Anhaftungen und ohne Anhaftungen der gleichen Chargenanalysen. Die Analysen mit Anhaftungen bezogen auf die Feuchtmasse zeigten eine Zunahme des Kunststoffanteils zwischen der Nullcharge und der Versuchscharge. Dieselben Chargenanalysen zeigten jedoch, wenn die Anhaftungen abgewaschen wurden und der Kunststoffanteil auf die Trockenmasse des Bioabfalls bezogen wurde, eine relative Abnahme des Kunststoffanteils von der Nullcharge zur Versuchscharge. Diese Beobachtung zeigt deutlich, dass biogene Anhaftungen, sowie Unterschiede im Feuchtegehalt des Bioabfalls als Bezugsmasse die quantitative Erfassung des Kunststoffbeutelgehalts verfälschen kann, und daher die Angabe der Bezugsgröße unerlässlich ist.

Im Winterversuch wurde neben den Modellregionen aus dem Sommersversuch zusätzlich die Modellregion der GOA in das Projekt mit einbezogen (Abbildung 16). Die Besonderheit dieser Modellregion ist, dass der Bioabfall bereits vor dem Projekt BabbA von den Bürger*innen in dickwandigen PE-Beuteln, welche bei der GOA gekauft werden konnten, gesammelt wurden.

In dieser Modellregion wurden vor dem Versuch so gut wie keine kommerziell erhältlichen BAW-Beutel zur Sammlung verwendet. In dieser Region sollte kein Verdrängungseffekt untersucht, sondern primär die Abbaubarkeit untersucht werden.

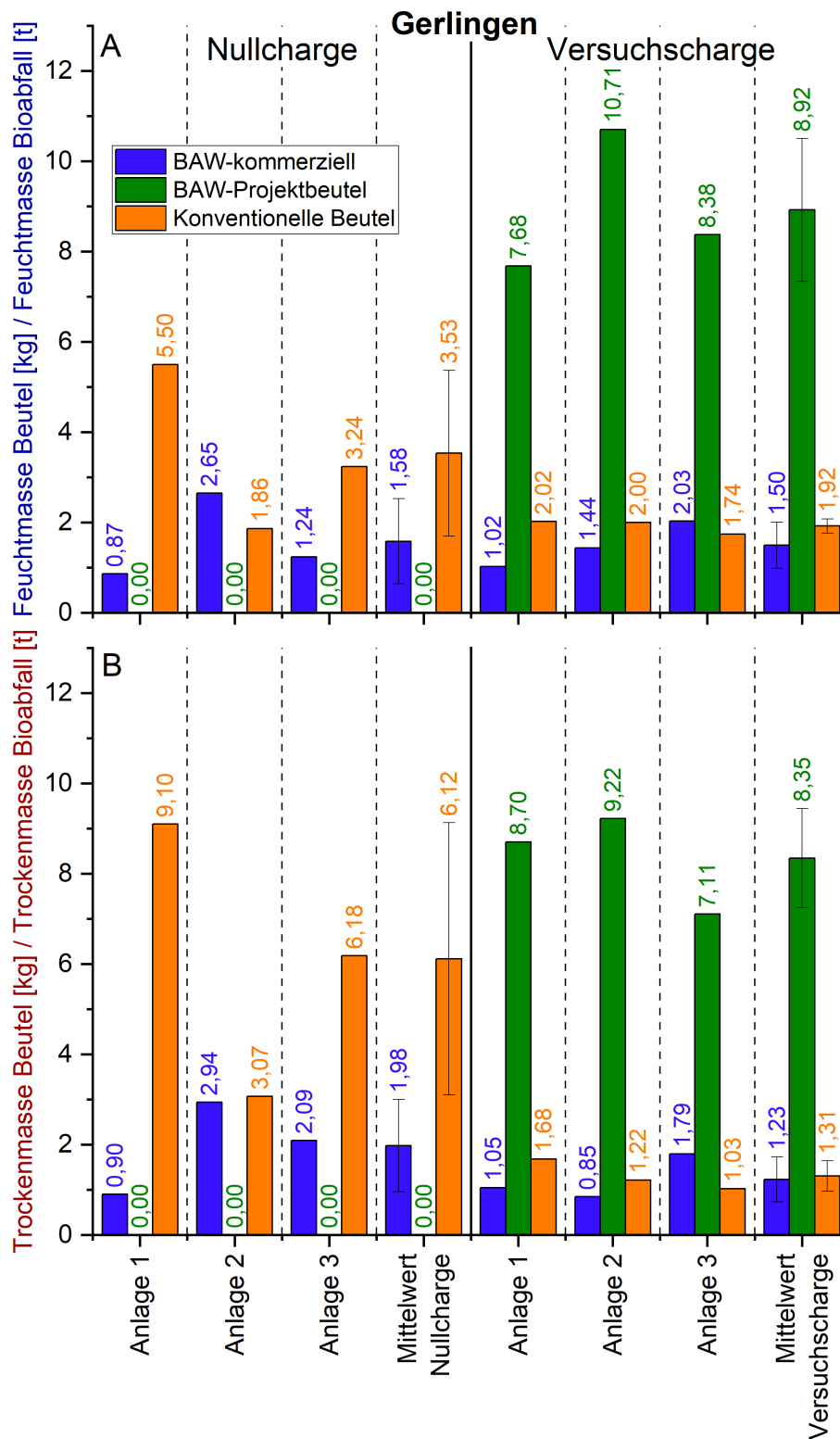


Abbildung 10: Gerlingen, Sommer - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

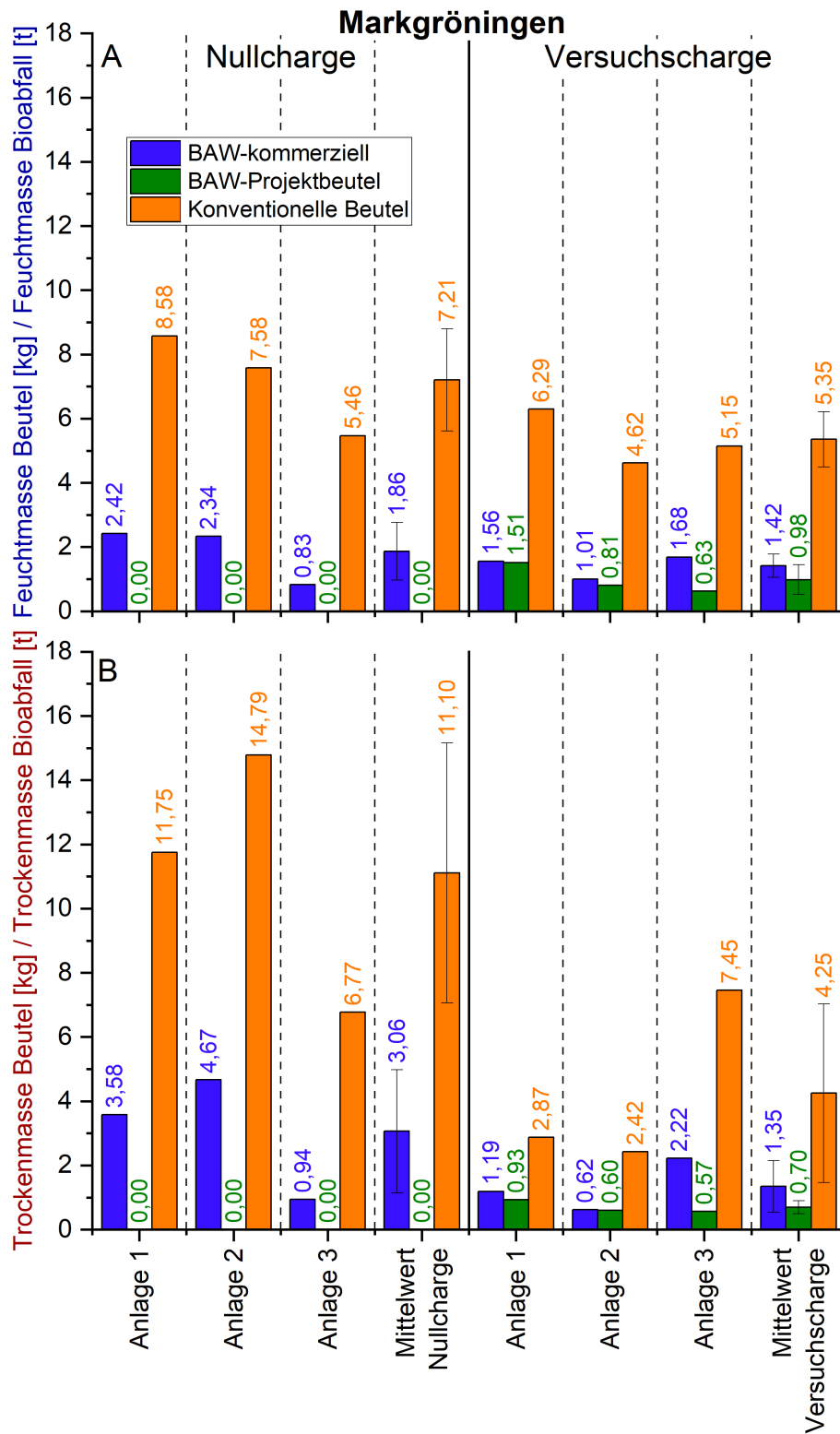


Abbildung 11: Markgrönungen, Sommer - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

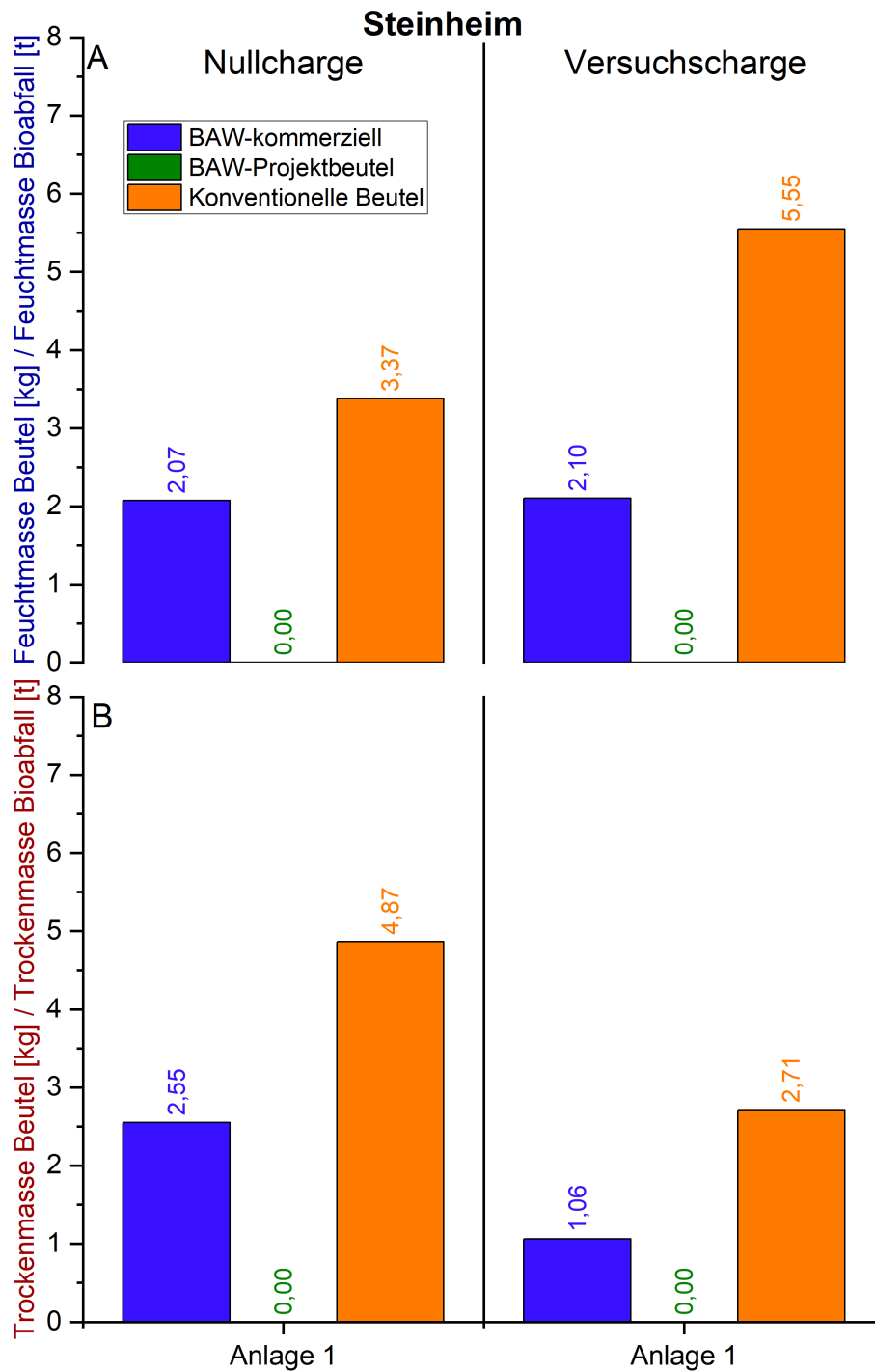


Abbildung 12: Steinheim, Sommer - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

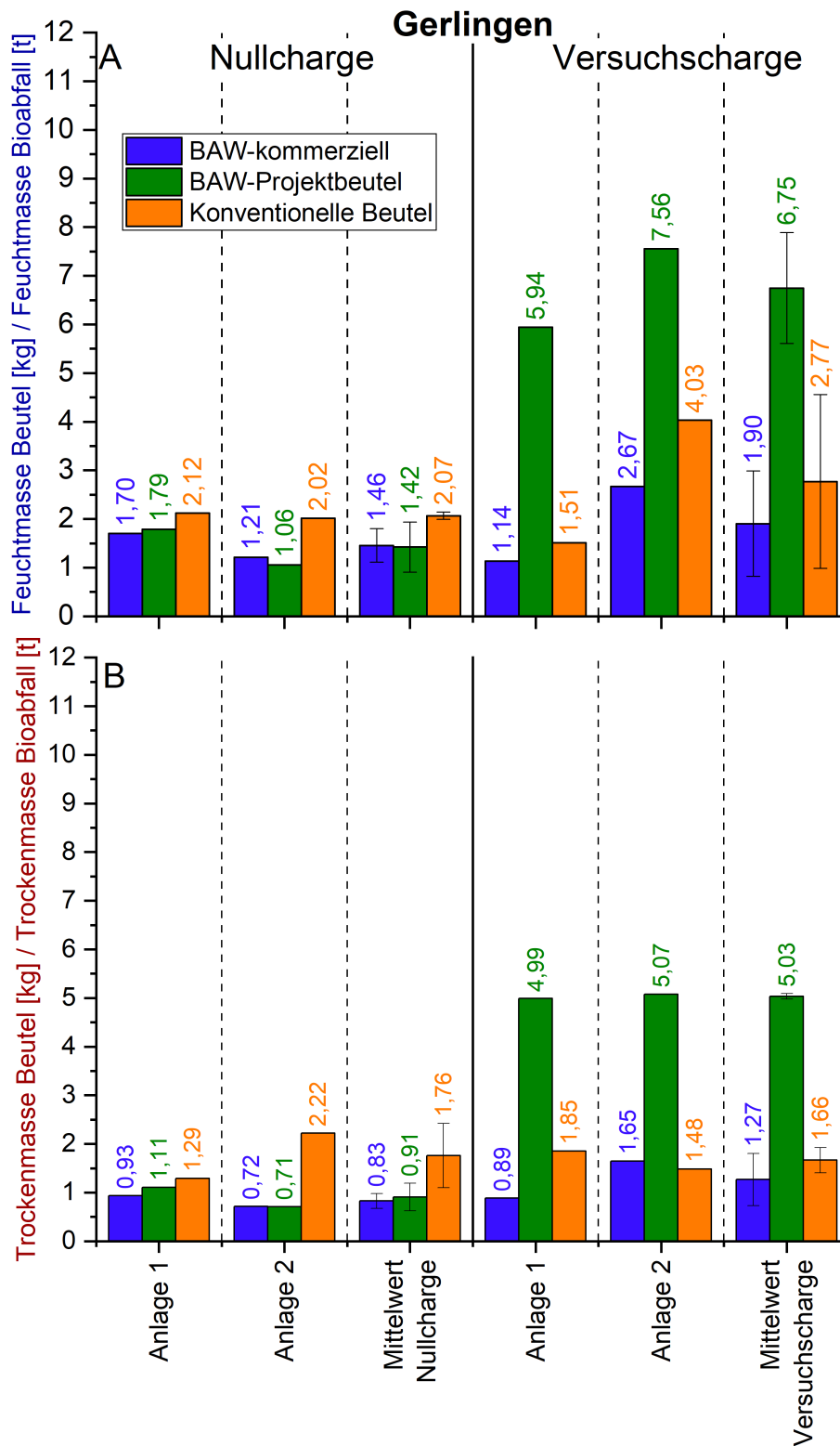


Abbildung 13: Gerlingen, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

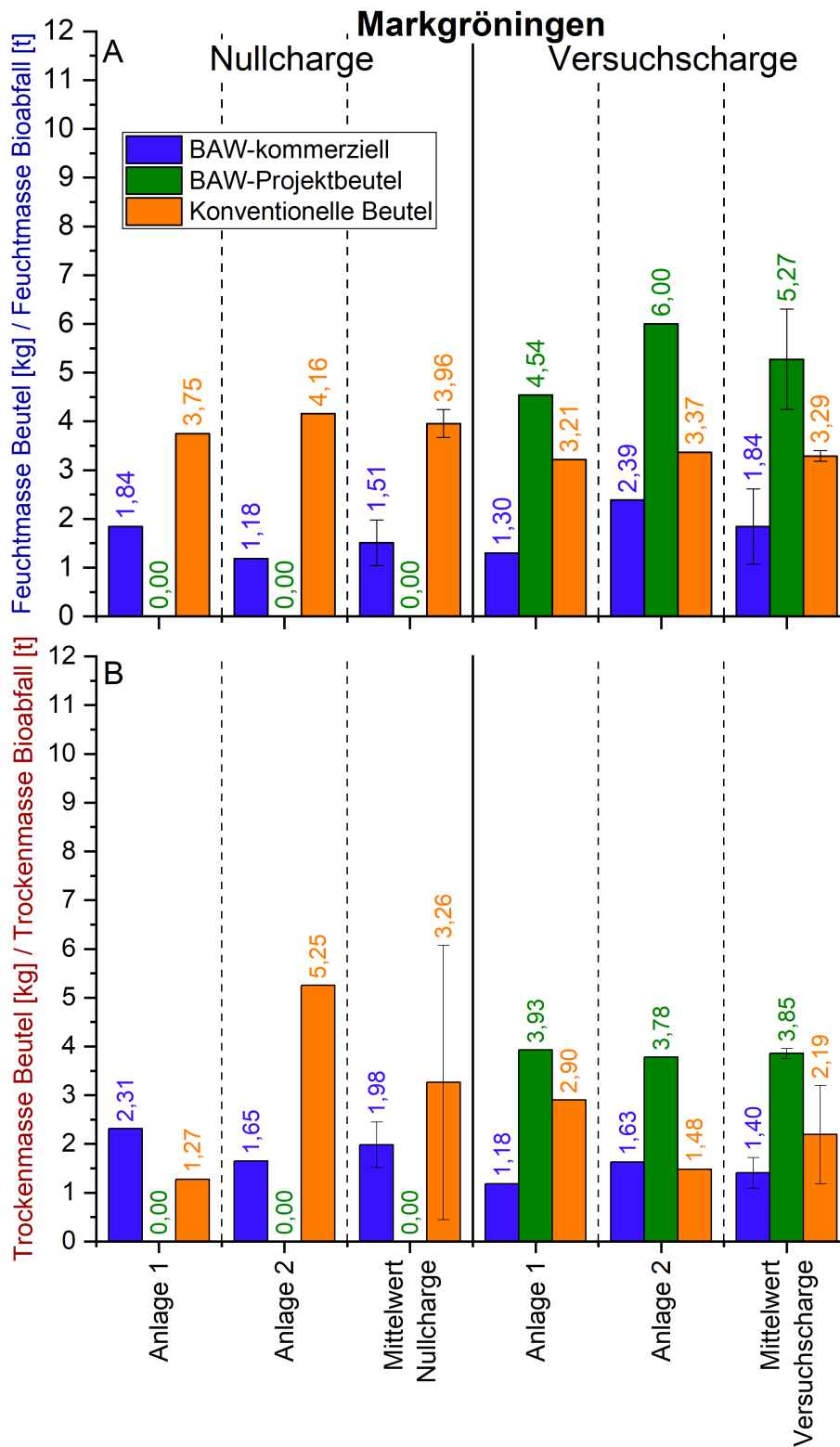


Abbildung 14: Markgrünungen, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

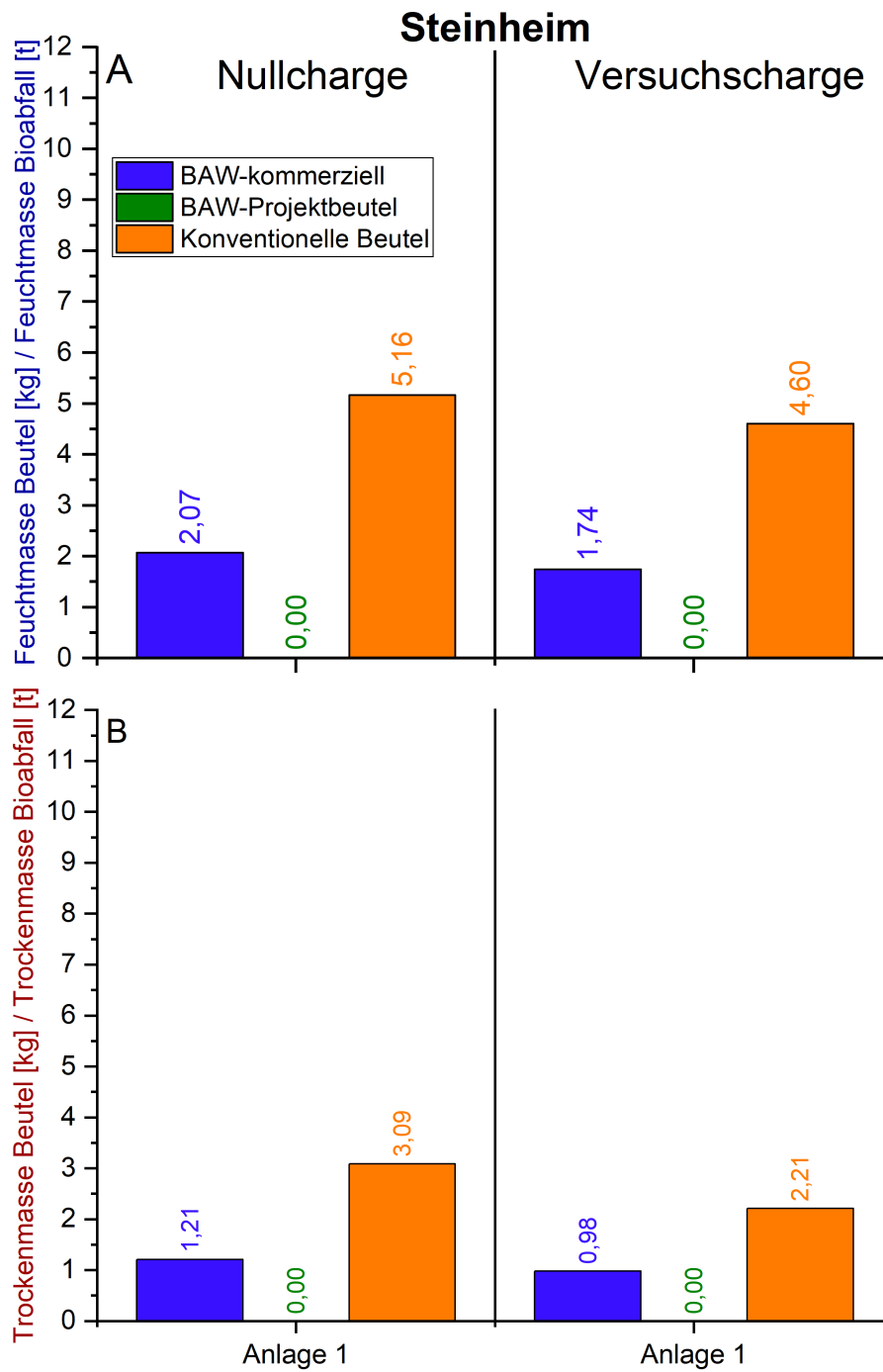


Abbildung 15: Steinheim, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

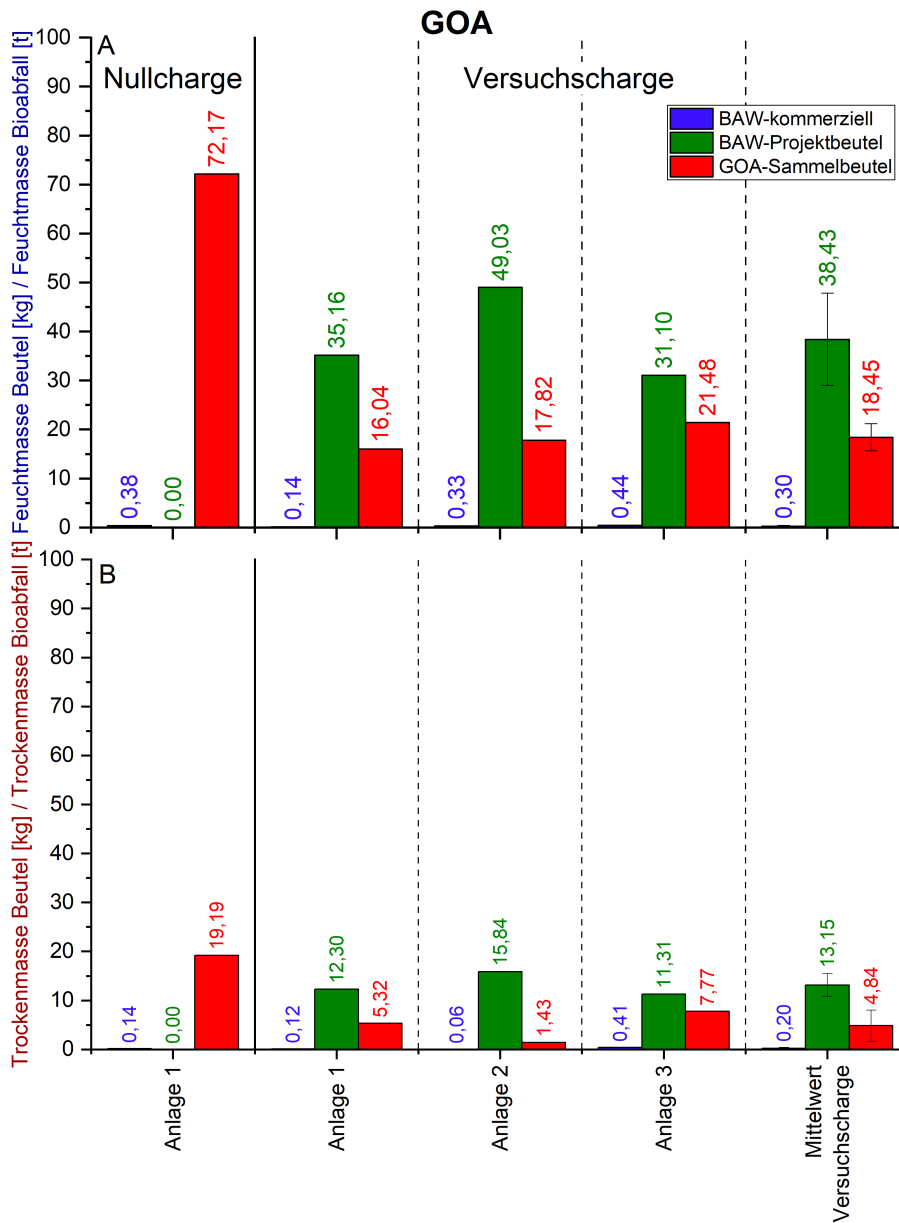


Abbildung 16: GOA, Winter - Vergleich der Menge an angelieferten Sammelbeuteln pro Tonne Bioabfall (feucht) in der Null- und Versuchscharge (A) sowie die gewaschenen und getrockneten Beutel pro Tonne Bioabfall (trocken) der Null- und Versuchscharge (B)

Gesamtfremdstoffgehalte im Bioabfall

Im Folgenden sind die Auswertungen zum Gesamtfremdstoffgehalt im Bioabfall in den Modellregionen, die in den Chargenanalysen ermittelt wurden, genauer dargestellt. Zum Fremdstoffgehalt zählen hierbei alle in Kapitel 3.3 Chargenanalysen genannten Fremdstoff-Fractionen, sowie alle Folienbeutel, außer die im Projekt eingesetzten BAW-Beutel. Hier wurde der Fremdstoffanteil auf die Frischmasse bezogen.

Im Sommersversuch betrug bei der Modellregion AVL der Mittelwert des Fremdstoffgehalts in den Nullchargen 2,40 % ($\pm 1,15$ %) und in den Versuchschargen 2,49 % ($\pm 0,93$ %). In dem Winterversuch betrug der Fremdstoffgehalt im Mittel 2,39 % ($\pm 0,68$ %) in den Nullchargen und 2,05 % ($\pm 0,68$ %) in den Versuchschargen. Diese Werte lassen keinen Rückschluss auf eine Verringerung des Fremdstoffgehalts durch den Einsatz von BAW-Beuteln zu. Um repräsentivere Ergebnisse mit geringeren Standardabweichungen zu erzielen, müssten Versuche dieser Art regelmäßig über mehrere Jahre stattfinden. Dies war im zeitlichen Rahmen des BabbA-Projektes nicht möglich.

Bei der Modellregion GOA betrug der Fremdstoffgehalt (ohne GOA-Sammelbeutel) im Winter in der Nullcharge 6,73 % (nur 1 Nullcharge) und in der Versuchscharge 5,22 % ($\pm 1,46$ %). Trotz der Zurverfügungstellung von kostenlosem BAW-Beutel konnte auch hier keine signifikante Reduzierung der Fremdstoffanteile verzeichnet werden.

4.1.2 Ergebnisse zu den Stoffstromanalysen in den Anlagen: Kunststoffgehalte im Sommersversuch

Untersucht wurden die Anlagen auf die eingesetzten Beutel – drei bioabbaubar zertifizierte Beutel und ein Papierbeutel. Das Abbau-/Fragmentierungsverhalten der Papierbeutel in den Anlagen konnte nicht untersucht werden, da das aufgeweichte Papier bereits im angelieferten Bioabfall kaum auffindbar war. Es wurden weder im Fertigkompost noch in den Siebüberläufen Hinweise auf die in BabbA eingesetzten Papierbeutel (oder andere Papierbeutel) gefunden, was auf einen Abbau hindeutet. Anzumerken ist, dass bei den Papierbeuteln oft Wachse eingesetzt werden, um diese wasserbeständiger zu machen.

In den Stoffstromanalysen wurden Proben des angelieferten Bioabfalls unterschiedlicher Prozessstufen des Rotteguts, sowie des Fertigkomposts, auf Kunststofffragmente bis zu einer minimalen Größe von 10 μm untersucht. Dabei wurden die Ergebnisse der Null- und Versuchschargen, sowie die unterschiedlichen Sammelgebiete (unterschiedliche Beuteltypen), die unterschiedlichen Anlagentypen und der Sommer- und Winterversuch miteinander verglichen. Die quantitativen Ergebnisse variieren stark untereinander, was sich auch in den hohen korrelierten Standardabweichungen von erhobenen Mittelwerten zeigt. Die qualitativen Ergebnisse sind jedoch eindeutiger: Es wurde deutlich gezeigt, dass dort, wo BAW-Beutel im Bioabfall vorhanden waren, meist auch eine große Menge an PBAT (Polybutylenadipat-terephthalat) Partikel kleiner als 1 mm im Fertigkompost zu verzeichnen war. Der PBAT-Partikel-Anteil an der Gesamtkunststoffpartikelmenge < 1 mm variiert, betrug in den Versuchschargen aber meist deutlich über 80%. Die „restlichen Kunststoffe“ sind nicht abbaubare Kunststoffe. Neben PLA und PBAT (Hauptbestandteil) wurden keine BAWs mittels FTIR-Analyse gefunden. Es gibt zudem deutliche Unterschiede im Fragmentierungsverhalten

der BAW-Beutel zwischen den Anlagentypen (Bei der Vergärung im Boxenfermenter im Sommersversuch setzt die Fragmentierung zu Partikeln < 1 mm deutlich früher ein als bei der reinen Kompostierung) wie auch jahreszeitliche Unterschiede innerhalb der Anlagen. Die detaillierten Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

4.1.2.1 Anlage 1 reine Kompostierung – Sommersversuch AVL-Gerlingen

In Abbildung 17 und Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse in der reinen Kompostierung der Anlage 1 des Sommersversuchs mit dem Bioabfall der Modellregion AVL-Gerlingen dargestellt. Da in dieser Studie die Fragmentierung von BAW-Beuteln von besonderem Interesse war, wurde bei der Analyse zwischen ganzen BAW-Beuteln und BAW-Fragmenten unterschieden.

Kunststoff-Partikel > 1 mm

Abbildung 17 rechts zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für Kunststofffragmente größer 1 mm zur Nullcharge des angelieferten Bioabfalls der AVL-Gerlingen und eine Mischprobe des Fertigkomposts, welcher aus Abfällen der drei AVL-Modellregionen hergestellt wurde. Weitere Zwischenschritte im Kompostierungsprozess wurden aus zeitlichen Gründen in der Nullcharge nicht beprobt. Hier wurde keine bis geringe Belastung mit größeren BAW-Fragmenten, und eine moderate Belastung der Bioabfalls mit konventionellen Kunststoffen (etwa 9 kg/t tm), entdeckt. Im Fertigkompost wurden jedoch nur eine sehr geringe Menge an konventionellen Kunststoffen entdeckt (0,34 kg/t), die unterhalb des geforderten Grenzwertes (0,1 Gew-%) der Düngemittelverordnung liegt.

Abbildung 17 links zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für Kunststofffragmente größer 1 mm im Verlauf des Sommersversuchs. Hier ist im Vergleich zur Nullcharge eine Erhöhung des Anteils der angelieferten BAW-Beutel deutlich erkennbar (von etwa 1 kg/t auf 10 kg/t). Diese ist maßgeblich auf die Verteilung der insgesamt 92.400 BabbA-BAW-Beutel in Gerlingen zurückzuführen. Hingegen ist der Anteil an konventionellen Kunststoffensammelbeuteln deutlich zurückgegangen zu sein (von rund 9 kg/t auf 2 kg/t). Im Vergleich zum angelieferten Bioabfall erhöhte sich nach der Intensivrotte der Masseanteil aller Kunststoffe. Dies ist auf den Abbau der Bezugsmasse des Bioabfalles zurückzuführen. Der extrem hohe Anteil an Kunststoffen größer 15 mm im Siebüberlauf liegt darin begründet, dass der Großteil der Biomasse bereits zu Kompost < 15 mm abgebaut wurde und spezifisch Kunststoffe und andere Fremdstoffe abgesiebt werden. Nach der Intensivrotte wurden hauptsächlich Polypropylen (PP) Partikel und BAW-Fragmente (keine ganzen Beutel) gefunden, was auf eine Fragmentierung der BAW-Beutel hindeutet. Nach der Nachrotte wurden weder im Siebüberlauf noch im Fertigkompost BAW-Fragmente > 1 mm gefunden. Im Fertigkompost konnten auch keine anderen Kunststoffpartikel gefunden werden.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

In Abbildung 18 ist die Stoffstromanalyse der Partikel kleiner 1 mm dargestellt. Bei der Analyse der Partikel kleiner 1 mm wurde ein Mittelwert aus drei technischen Replikaten erstellt. Die Standardabweichung (schwarzer senkrechter Strich) ist im Diagramm entsprechend dargestellt. Die teilweise hohe Standardabweichung liegt darin begründet, dass pro Replikat immer nur 10 g Probe untersucht wurden und die Kunststoffpartikel anscheinend in der Ausgangsprobe trotz sorgfältiger Durchmischung nicht homogen verteilt waren. Erkennbar ist allerdings, dass die BAW-Partikelanzahl im Bereich < 1 mm mit fortschreitender Prozessierung im Durchschnitt zunimmt, während die Anzahl der konventionellen Kunststoffpartikel sich im Rahmen der Standardabweichung nicht signifikant ändert. Auffällig ist hier ebenfalls, dass im Fertigkompost der Nullcharge deutlich weniger PBAT-Partikel als im Fertigkompost der Versuchscharge gefunden wurde. PBAT (Polybutylenadipat-terephthalat) ist die Hauptkunststoffkomponente der untersuchten BAW-Beutel. Hier ist zu folgern, dass der höhere Input an BAW-Beuteln in der Versuchscharge zu einer Erhöhung der Anzahl der PBAT-Partikel im Fertigkompost führte. Die Anzahl an konventionellen Mikroplastikpartikeln ist gegenüber den PBAT-Partikeln verschwindend gering (716 konventionelle Kunststoffpartikel zu 41.337 BAW-Partikel; entspricht nur 1,7 %). Da diese Kunststoffe nicht auf das Zerfallen ausgelegt sind, entsteht daraus weniger Mikroplastik, und der Großteil der konventionellen Kunststoffe wird in der Feinsiebung der Anlage entfernt, wohingegen die kleinen Fragmente von BAW-Beuteln die Siebe passieren können und mehrheitlich in Fertigkompost gelangen.

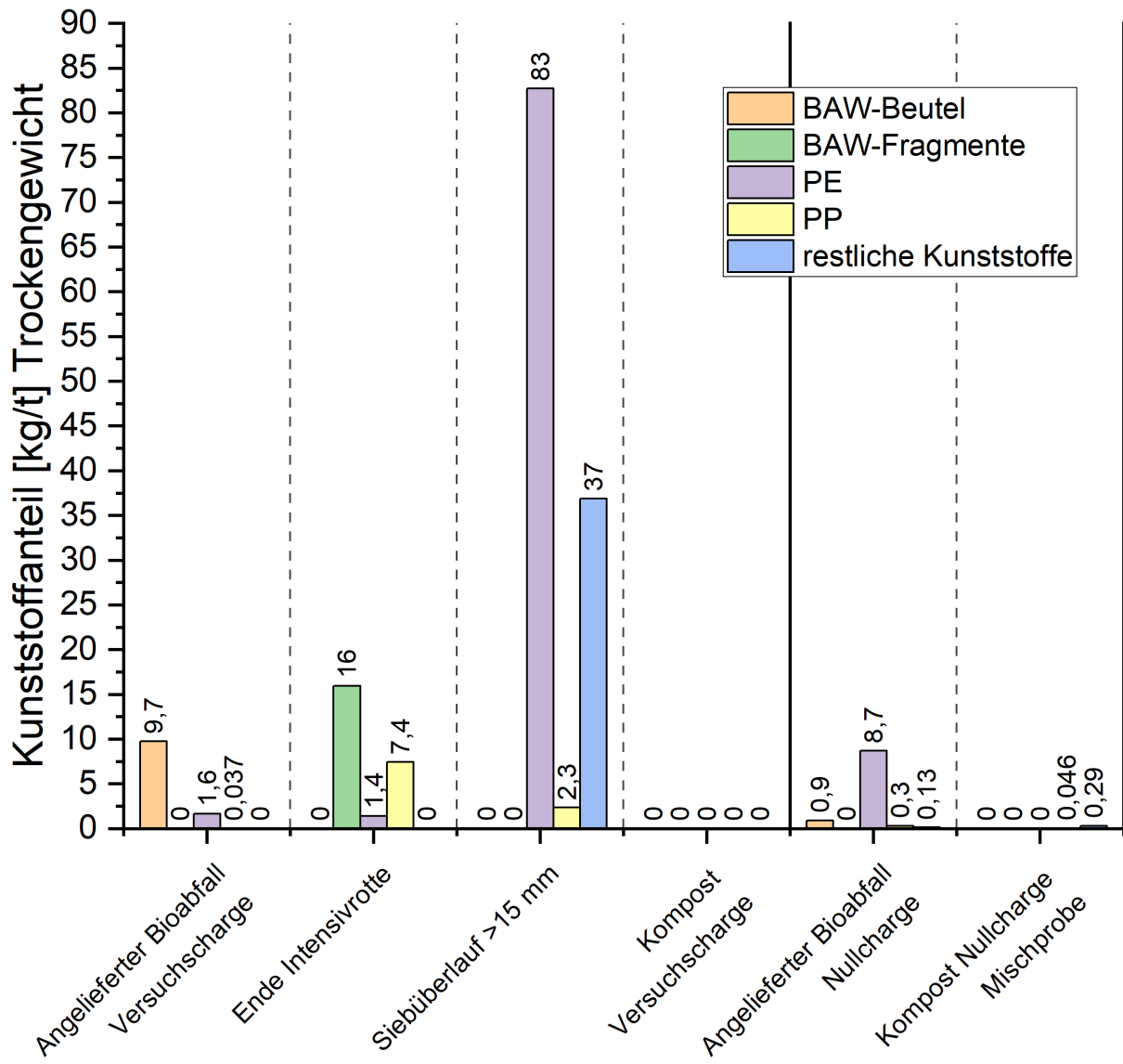


Abbildung 17: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in der Modellregion Gerlingen an der Anlage 1

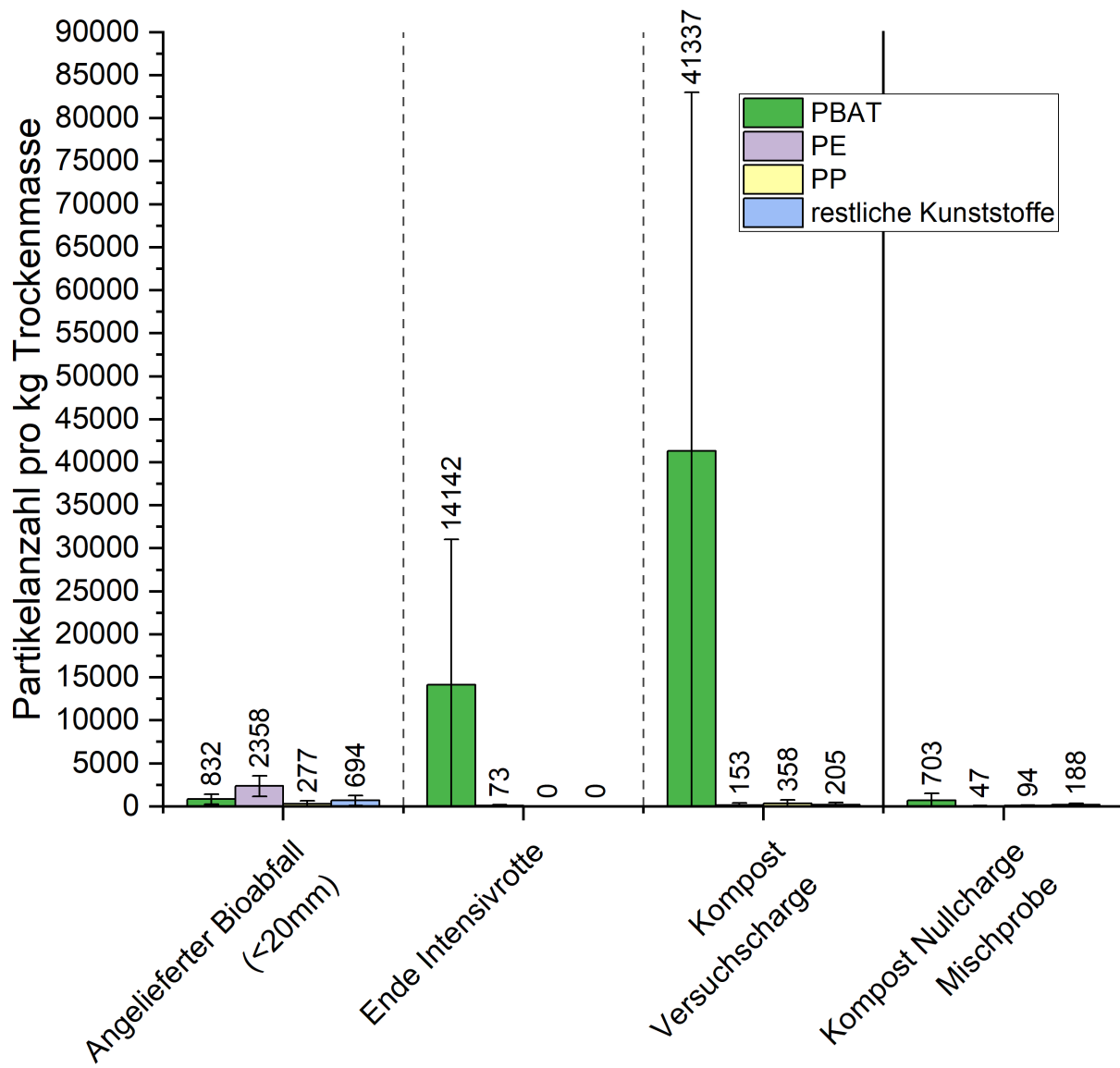


Abbildung 18: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Gerlingen an der Anlage 1

AVL-Markgröningen

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 1 im Sommersversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Markgröningen.

Nach auffällig geringen Mengen an BabbA-BAW-Beuteln, die in den Versuchschargen der Bioabfälle aus Markgröningen gefunden wurden, wurde bei den Bürgern in Markgröningen auf Nachfrage klar, dass anscheinend die Verteilung der Beutel und Informationsmaterialien im Sommer nicht ordnungsgemäß funktioniert hat. Um eine Teilnahme der Bürger zu ermöglichen, wurde im Winterversuch die Verteilung in Markgröningen direkt von den Projektmitarbeitern übernommen.

Kunststoff-Partikel > 1 mm

Abbildung 19 rechts zeigt die Analyse der Fraktion größer 1 mm in der Nullcharge. Da in der Nullcharge an der Anlage 1 eine Mischprobe des Fertigkomposts, aller drei Modellregionen, untersucht wurde, werden die Ergebnisse der Mischprobe als Referenz für alle drei Modellregionen verwendet.

In Abbildung 19 links ist die Analyse der größeren Kunststofffragmente (> 1 mm) in der Versuchscharge dargestellt. Obwohl der erfasste Input an BAW-Beuteln deutlich geringer ist als in der Modellregion Gerlingen - und auch geringer als in der Nullcharge - liegt der Anteil der BAW-Fragmente nach der Intensivrotte hier deutlich höher. Die Zunahme des Anteils der BAW-Fragmente am Ende der Intensivrotte liegt wieder an der Bezugsgröße und der Umsetzung der Biomasse im Bioabfall. Auffällig ist jedoch, dass im Siebüberlauf und im Fertigkompost nach der Nachrotte fast keine, bzw. keine BAW-Fragmente gefunden wurden. Wie in der Modellregion Gerlingen wurden die BAW-Fragmente also entweder abgebaut oder sie fragmentierten zu Partikeln kleiner als 1 mm. Neben einem hohen Anteil an BAW-Fragmenten findet sich nach der Intensivrotte ebenfalls ein hoher Anteil an konventionellen Kunststoffen wieder. Konventionelle Kunststoffe gelangen nicht nur durch Sammelbeutel, sondern auch durch andere Kunststoff-Fremdstoffe in den Bioabfall. Im Siebüberlauf ist der Anteil der konventionellen Kunststoffe erwartungsgemäß am höchsten. Da im Fertigkompost keine Plastikpartikel konventioneller Kunststoffe gefunden wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die konventionellen Kunststoffe in der Siebung gut abgetrennt werden konnten.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für Kunststoffpartikel kleiner 1 mm. Auch hier wurden drei technische Replikate untersucht, deren Mittelwert mit Standardabweichung im Diagramm (schwarzer Balken) dargestellt ist. Obwohl der Input der BAW-Beutel in der Versuchscharge geringer ist als in der Nullcharge, sind im Fertigkompost der Versuchscharge deutlich mehr PBAT-Partikel enthalten. Hierbei ist anzumerken, dass der Fertigkompost der Nullcharge eine Mischprobe war, bei der der Input an BAW-Beuteln nicht bestimmt werden konnte. Ähnlich wie in der Modellregion Gerlingen wurden nach der Intensivrotte fast keine PBAT-Partikel kleiner als 1 mm entdeckt. Aus Abbildung 19 wird jedoch deutlich, dass viele BAW-Fragmente zu diesem Zeitpunkt noch größer als 1 mm sind. Im Fertigkompost dagegen, wo keine BAW-Fragmente größer als 1 mm gefunden wurden, sind deutlich mehr PBAT-Partikel kleiner als 1 mm enthalten. Hier zeigt sich, dass der Fragmentierungsprozess zu Partikeln kleiner als 1 mm maßgeblich in der Nachrotte stattgefunden hat.

Anmerkung: Der Input der angelieferten BAW-Beutel ist in der Versuchscharge in der Modellregion Markgröningen mit 2,1 kg/t (Abbildung 11) deutlich niedriger als in der

Modellregion Gerlingen, wo etwa 9,8 kg/t angeliefert wurden (Abbildung 10), und auch niedriger als in der Nullcharge mit 3,6 kg/t (Abbildung 11). Dies spiegelte sich im Rücklauf der Umfragebögen wider und, wie bei individuellen Nachfragen bei den Bürger*innen im Winterversuch in Markgröningen klar wurde, scheint es, wie bereits erwähnt, ein Problem bei der Verteilung der BAW-Beutel und Informationsmaterialien im Sommersversuch gegeben zu haben. Der geringere BAW-Beutel-Input spiegelt sich grob in der Auffindung von PBAT-Partikeln im Fertigkompost wider. Merkwürdig ist hier allerdings auch, dass die PBAT-Fraktion knapp 80% des Kunststoffanteils < 1 mm im Fertigkompost ausmacht.

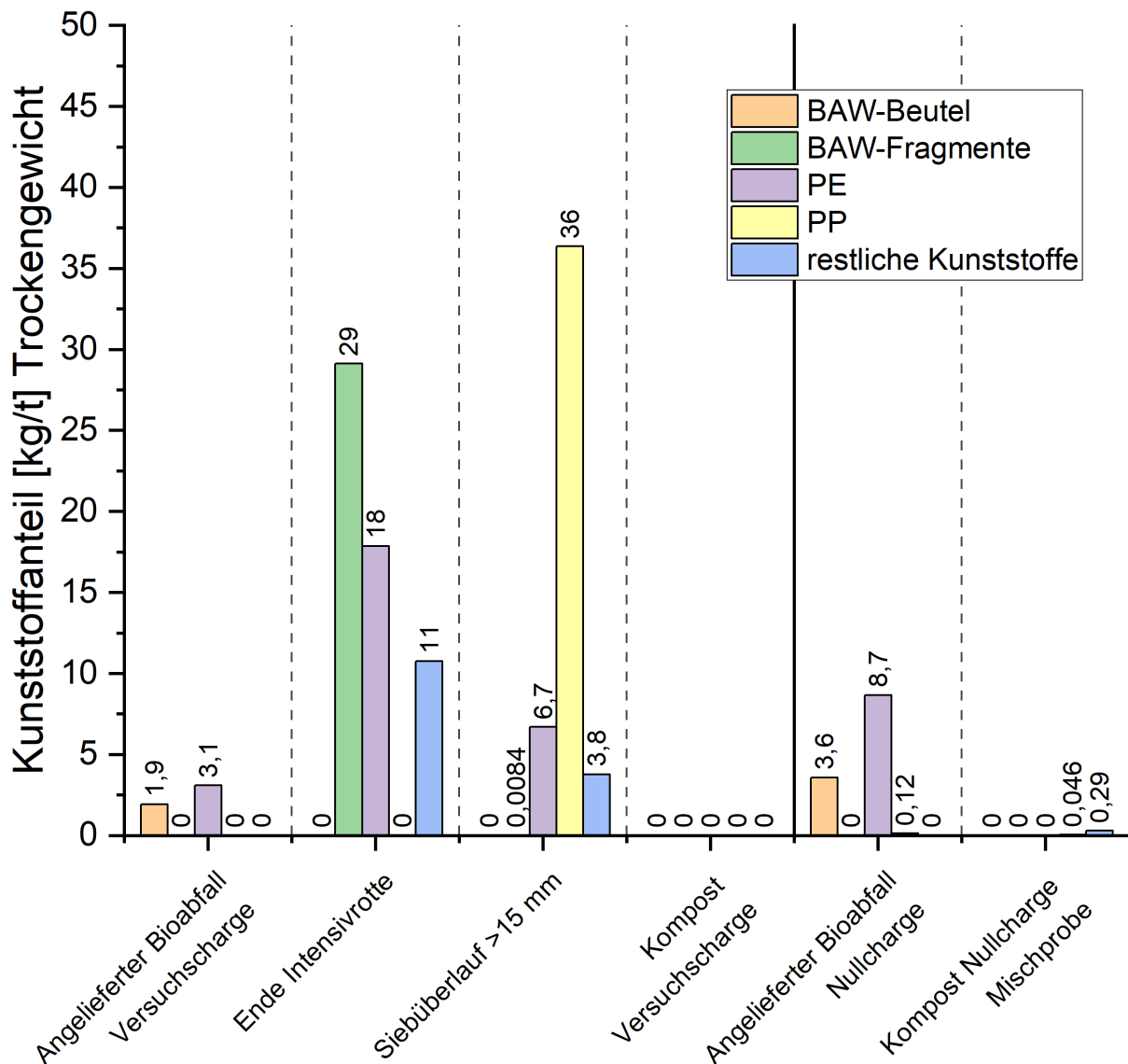


Abbildung 19: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in der Anlage 1 mit Bioabfall aus der Modellregion Markgröningen

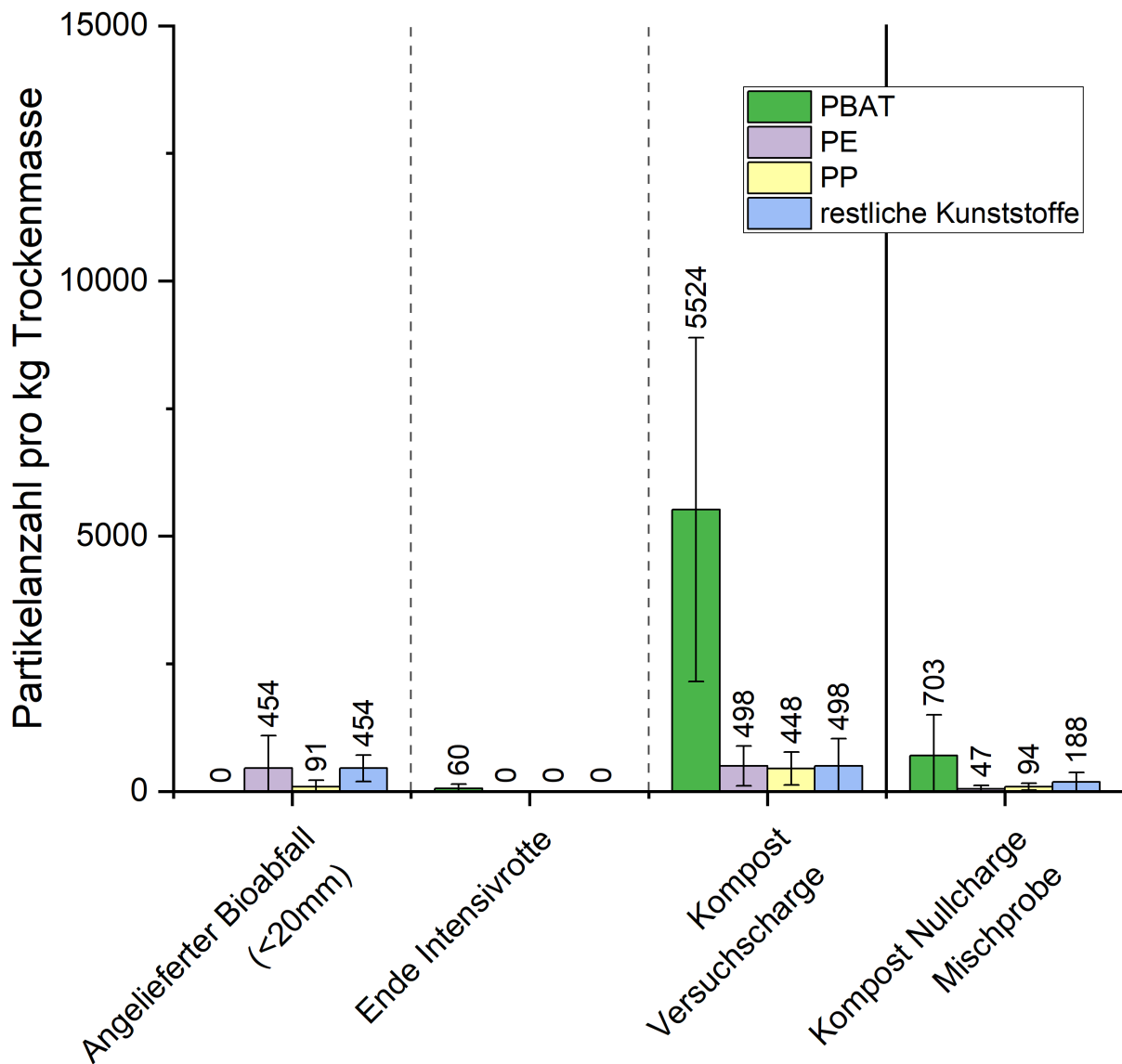


Abbildung 20: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Markgröningen an der Anlage 1

AVL-Steinheim

In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 1 (reine Kompostierung) des Sommersversuchs mit dem Bioabfall der Modellregion AVL-Steinheim abgebildet.

Kunststoff-Partikel > 1 mm

Abbildung 21 rechts zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststofffragmente größer als 1 mm in der Nullcharge. Der untersuchte Fertigkompost ist hier wieder die Mischprobe aus der Anlage 1, welche auch für die vorher beschriebenen Modellregionen genutzt wurde.

Abbildung 21 links zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Versuchscharge. Da in der Modellregion AVL-Steinheim Papierbeutel verteilt wurden, ist die Menge der angelieferten BAW-Beutel eher gering. Die Menge an angelieferten Papierbeutel ist nicht dargestellt, da die Papierbeutel durch das Erweichen und Zerreißen bei der Chargenanalyse nicht erfassbar waren. Der höhere Anteil der konventionellen Kunststoffe nach der Intensivrotte bzw. im Siebüberlauf liegt (wieder) an der Verringerung der Biomasse durch den Abbauprozess in der Bezugsgröße Bioabfall. Im Fertigkompost konnten kaum Kunststoffpartikel gefunden werden. Der Großteil der Kunststofffragmente konnte durch die Siebung entfernt werden.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Kunststoffpartikel kleiner 1 mm mit Standardabweichungen dargestellt. Der untersuchte Fertigkompost der Nullcharge ist eine Mischprobe und kann daher nicht mit dem Input aus der Modellregion Steinheim korreliert werden. Obwohl der Input der BAW-Beutel hier geringer ausfällt als in den anderen beiden Modellregionen, wurden vor allem nach der Intensivrotte sehr viele PBAT-Partikel entdeckt. Im Fertigkompost wurden, anders als in den anderen beiden Modellregionen, weniger PBAT-Partikel entdeckt. Eine Erklärung dafür liegt in der geringen Probenmenge und Replikation in Verbindung mit einer schwierig zu homogenisierenden Probe, woraus Ergebnisse mit einer relativ hohen Standardabweichung resultieren. Eine andere zusätzliche Erklärung für diese Beobachtung wäre, dass in der Modellregion Steinheim nicht klar ersichtlich ist, welche BAW-Kunststoffbeutel von den Bürgern eingesetzt wurden. Hier wurden Papier-Sammelbeutel an die Bürger ausgeteilt, in den anderen beiden Modellregionen wurden von den Bürgern hauptsächlich die ausgeteilten eingesetzt. Eventuell zeigen die von den Bürgern in der Modellregion Steinheim selbstständig eingesetzten „nicht BabbA“-BAW-Beutel ein anderes Abbau- oder Fragmentierungsverhalten als die BabbA-BAW-Kunststoffbeutel. Wie in den anderen beiden Modellregionen dominieren hier im Fertigkompost in der Fraktion < 1 mm jedoch wieder die PBAT-Partikel gegenüber den konventionellen Kunststoffen.

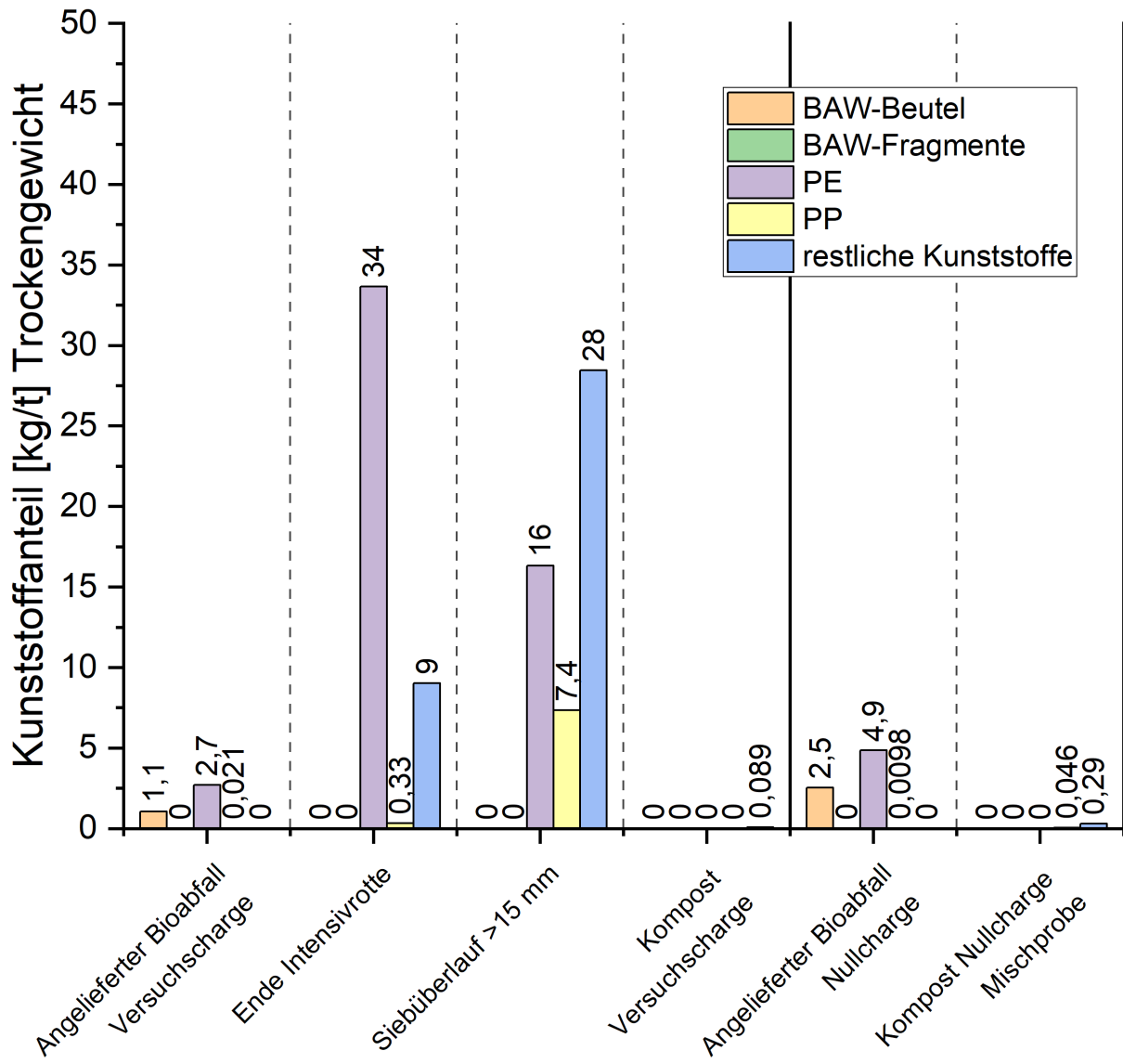


Abbildung 21: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in Anlage 1 mit Bioabfall aus Modellregion Steinheim

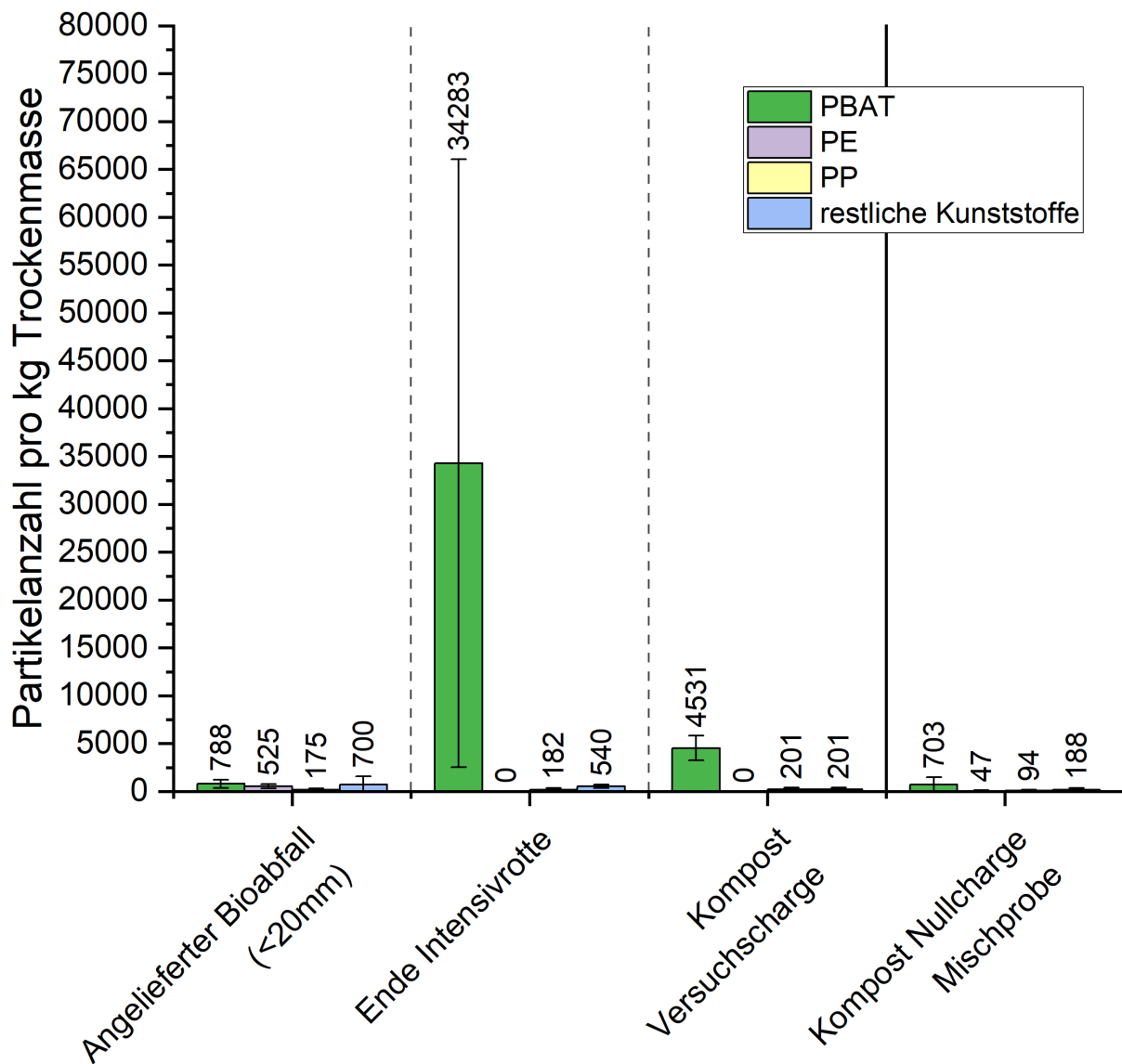


Abbildung 22: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in der Modellregion Steinheim an der Anlage 1

4.1.2.2 Anlage 2 Vergärung im mesophilen Boxenfermenter mit anschließender Kompostierung – Sommersversuch

AVL- Gerlingen

In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 2 (diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage mit anschließender Kompostierung) im Sommersversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Gerlingen dargestellt.

Kunststoff-Partikel > 1 mm

Abbildung 23 rechts zeigt die Ergebnisse der Analysen der Fragmente größer als 1 mm in der Nullcharge. Wie an der Anlage 1 wurde in der Nullcharge nur der angelieferte Bioabfall und

gleichzeitig der Fertigkompost untersucht. Allerdings wurde bei Anlage 2 keine Mischprobe der Nullcharge untersucht, sondern es konnten Proben von jedem Fertigkompost der Nullcharge entnommen werden. Im Fertigkompost waren geringe Mengen an konventionellen Kunststoffen und BAW-Fragmenten enthalten. Insgesamt lag die Menge der enthaltenen Kunststoffe jedoch deutlich unter dem erlaubten Grenzwert.

In Abbildung 23 links sind die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Versuchscharge dargestellt. Neben dem angelieferten Bioabfall wurden für die Stoffstromanalyse der Gärrest, das Rottegut nach der Intensivrotte, sowie der Fertigkompost untersucht. Im Gegensatz zur Anlage 1, die eine reine Kompostieranlage ist, ist die Anlage 2 eine diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage mit anschließender Kompostierung. Trotz eines BAW-Beutel-Inputs, der vergleichbar mit dem an der Anlage 1 in der Modellregion Gerlingen ist, wurden hier weder im Gärrest noch nach der Intensivrotte BAW-Fragmente größer als 1 mm gefunden. Im Fertigkompost wurde wie in der Nullcharge eine sehr geringe Menge an BAW-Fragmenten gefunden. Wie an der Anlage 1 nimmt der Anteil der konventionellen Kunststoffe im Gärrest und nach der Intensivrotte stark zu, da die Bezugsgröße, die Biomasse, während des Abbauprozesses abnimmt. Im Fertigkompost sind an dieser Anlage deutlich mehr konventionelle Kunststoffe als an der Anlage 1 enthalten. Trotzdem liegen die gefundenen Werte noch unter dem erlaubten Grenzwert von 0,1 % der Trockenmasse.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Kunststoffpartikel kleiner 1 mm. Anders als an der reinen Kompostieranlage (Anlage 1) nimmt die Anzahl an PBAT-Partikeln im Laufe des Kompostierungsprozesses nicht zu, sondern ab. Nach der Intensivrotte sind deutlich weniger PBAT-Partikel als im Gärrest vorhanden, und im Fertigkompost nach der Nachrotte sind wiederum weniger PBAT-Partikel enthalten als nach der Intensivrotte. Im Gärrest konnten keine BAW-Fragmente größer als 1 mm gefunden werden, jedoch ist die Anzahl der PBAT-Partikel, im Bereich kleiner 1 mm, hoch. Daher liegt die Vermutung nahe, dass bereits im Fermenter der Zerfallsprozess begonnen hat und die BAW-Beutel während der Vergärung bereits zu Partikeln kleiner 1 mm fragmentierten. Ein Grund für die beobachtete Abnahme der PBAT-Gehalte während des Kompostierungsprozesses könnte sein, dass die PBAT-Partikel zu Mikro- und Nanoplastik in einer Größe unterhalb der Nachweisgrenze der μ FTIR Spektroskopie fragmentierten (< 10 μ m) und somit nicht detektiert werden konnten. Trotz des deutlich niedrigeren BAW-Beutel-Inputs wurden im Fertigkompost der Nullcharge mehr PBAT-Partikel als in der Versuchscharge gefunden. Dies könnte einerseits daran liegen, dass der Siebüberlauf als Strukturmaterial wiederverwendet wird und sich darin noch BAWs befinden und/oder andererseits, dass die in der Versuchscharge hauptsächlich verwendeten

BabbA-BAW-Beutel sich während des Prozesses anders verhalten als die von den Bürgern gekauften BAW-Beutel. Wie an der Kompostieranlage ist die Anzahl an konventionellen Kunststoffpartikeln gegenüber den PBAT-Partikeln gering. Da diese Polymere nicht für den Zerfall ausgelegt sind, entsteht daraus weniger Mikroplastik, die Kunststofffragmente bleiben größer und können bei der Aufbereitung des Fertigkomposts größtenteils entfernt werden.

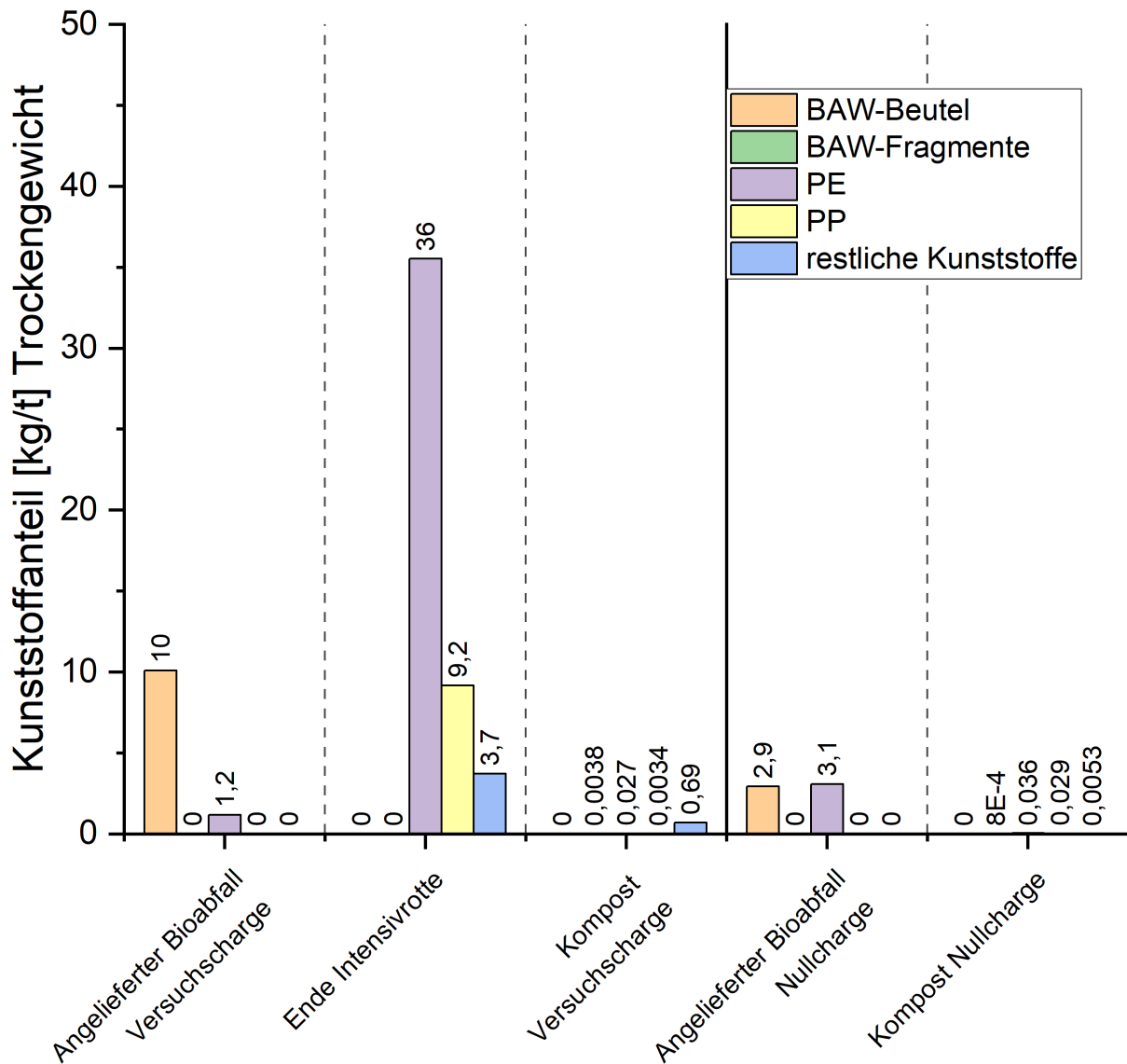


Abbildung 23: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 2 (mesophile Boxenfermentation mit anschließender Kompostierung) im Sommerversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Gerlingen

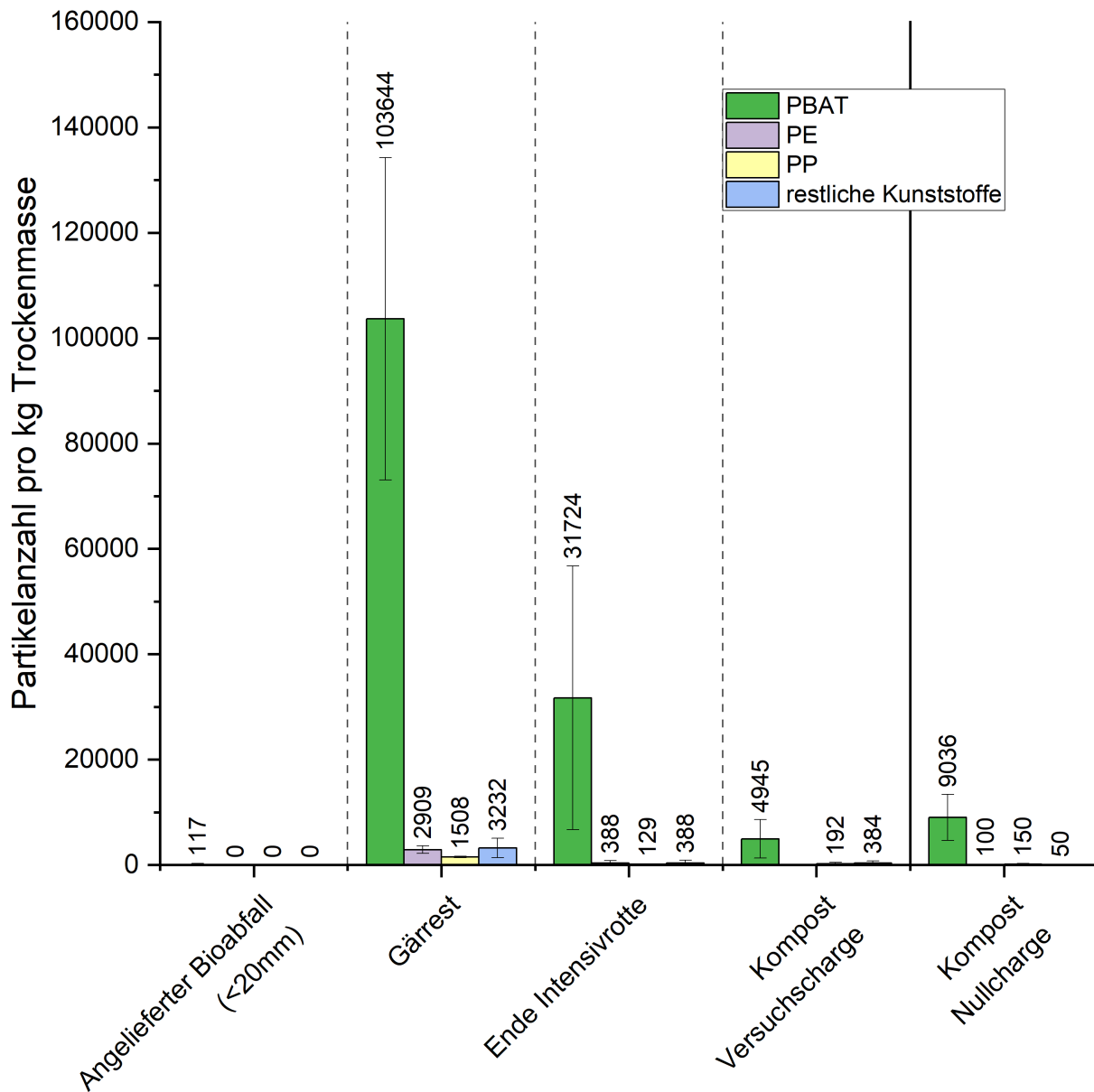


Abbildung 24: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in Anlage 2 mit dem Bioabfall der Modellregion Gerlingen

AVL- Markgröningen

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 2 (diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage mit anschließender Kompostierung) im Sommersversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Markgröningen.

Kunststoff-Partikel > 1 mm

In Abbildung 25 rechts ist die Analyse der Kunststofffragmente größer 1 mm in der Nullcharge dargestellt. Auch hier wurden für die Nullcharge nur der angelieferte Bioabfall und der Fertigkompost untersucht. Im Fertigkompost wurden einige Partikel konventioneller

Kunststoffe und eine geringe Menge an BAW-Fragmenten gefunden. Insgesamt liegt diese Menge jedoch deutlich unter dem in der Düngemittelverordnung festgelegten Grenzwert.

Abbildung 25 links zeigt die Analyse größer 1 mm in der Versuchscharge. Wie beim Bioabfall der Modellregion Gerlingen wurden der angelieferte Bioabfall, der Gärrest, das Rottegut am Ende der Intensivrotte, sowie der Fertigungskompost untersucht. Auch hier wurden keine bis sehr wenige BAW-Fragmente im Gärrest, am Ende der Intensivrotte und im Fertigungskompost entdeckt. Dies kann wieder entweder daran liegen, dass die BAW-Fragmente abgebaut wurden oder zu Partikeln kleiner als 1 mm fragmentierten. Im Gärrest wurden in der untersuchten Stichprobe keine konventionellen Kunststoffe entdeckt. Der hohe Anteil an Kunststoffen nach der Intensivrotte liegt wiederum wieder an der Verringerung der Bezugsgröße, also der Biomasse, durch den Abbauprozess. Die Menge der im Fertigungskompost gefundenen Kunststoffe liegt auch hier unter dem erlaubten Grenzwert.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für die Kunststoffpartikel kleiner 1 mm. Auch hier ist die Anzahl der PBAT-Partikel im Gärrest hoch. Obwohl der Input der BAW-Beutel in der Versuchscharge in der Modellregion Markgröningen deutlich unter dem in der Modellregion Gerlingen lag, ist die Zahl der PBAT-Partikel im Gärrest deutlich höher. Ein Grund kann das Strukturmaterial sein, welches für die Kompostierung verwendet wird, dieses stammt aus dem Siebüberlauf der Feinsiebung und ist somit noch mit Kunststoffen belastet. Die große Standardabweichung der technischen Replikate deutet auf eine inhomogene Verteilung der Mikrokunststoffe in der Probe hin und um geringere Standardabweichungen bei den Ergebnissen zu erzielen, müssten mehr Proben analysiert werden. Wie in der Modellregion Gerlingen ist die Anzahl der PBAT-Partikel am Ende der Intensivrotte deutlich niedriger als im Gärrest. Wie bereits vorher beschrieben kann dies am Abbau der PBAT-Partikel oder an der Fragmentierung der Partikel in sehr kleine Größen, die unterhalb der Nachweisgrenze der Analytik liegen. Wie in den anderen Stoffstromanalysen dominiert im Fertigungskompost die Menge an PBAT-Partikeln, mit einem Anteil von etwa 92 % aller Kunststoffpartikel < 1mm.

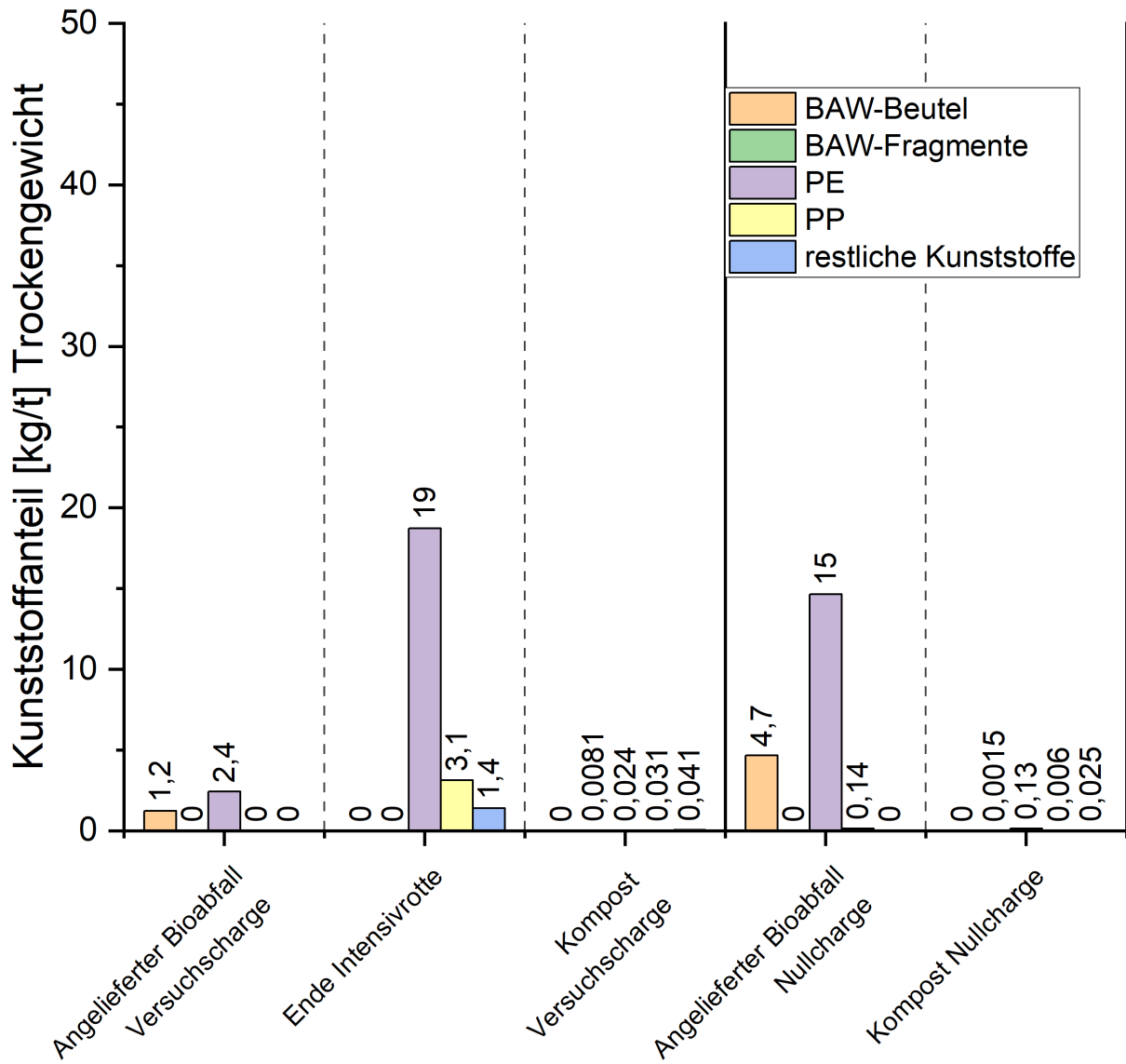


Abbildung 25: Stoffstromanalyse > 1 mm der Anlage 2 (mesophile Boxenfermentation mit anschließender Kompostierung) im Sommersversuch mit dem Bioabfall aus der Modellregion AVL-Markgröningen

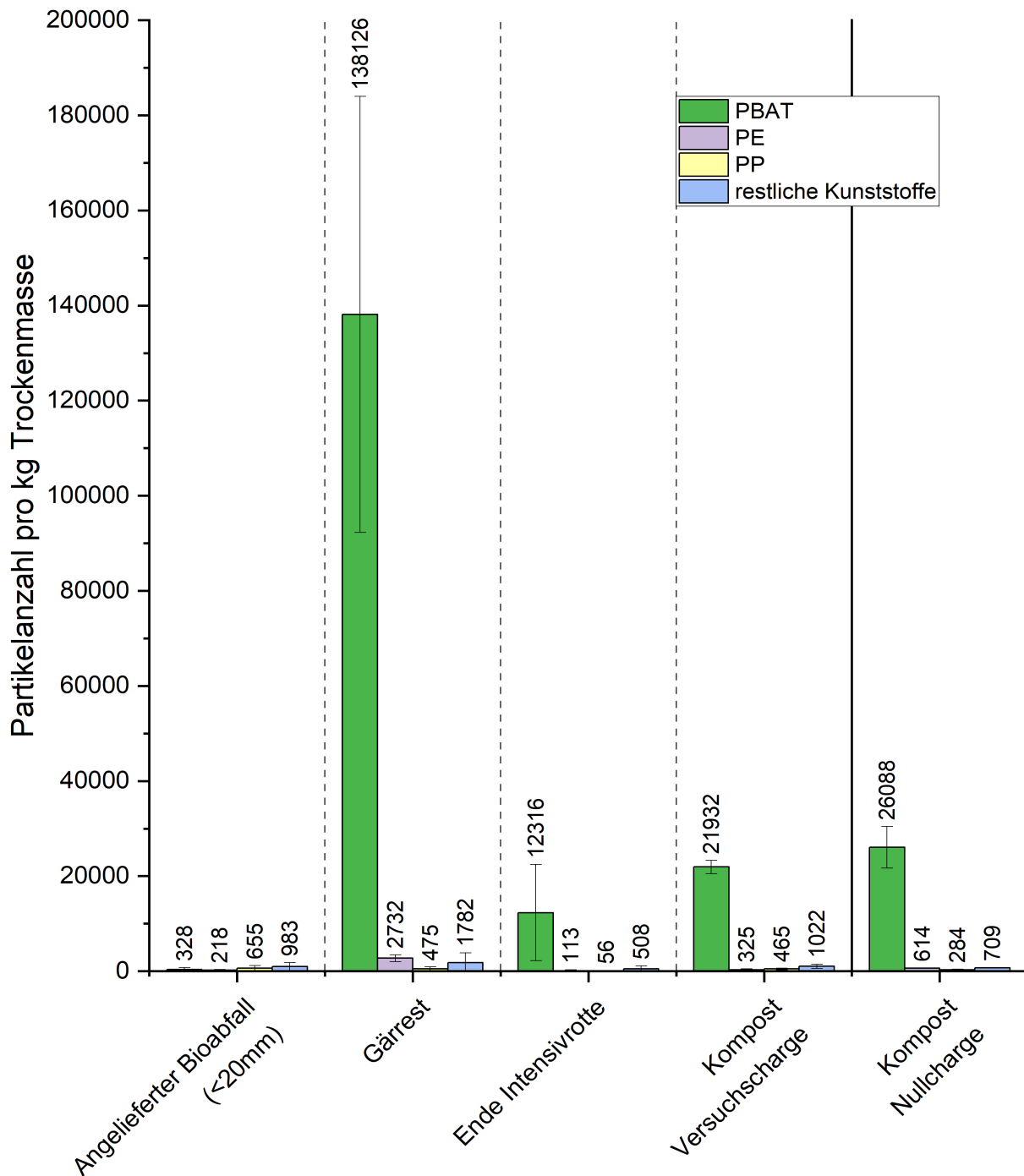


Abbildung 26: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommerversuch in der Modellregion Markgröningen an der Anlage 2

4.1.2.3 Anlage 3 Vergärung in thermophiler Trockenfermentationsanlage mit anschließender Kompostierung – Sommerversuch

AVL Gerlingen und Markgröningen

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Ergebnisse der Stoffstromanalyse des Sommerversuchs in Anlage 3 (kontinuierliche, thermophile Trockenfermentationsanlage mit

anschließender Kompostierung) mit den Bioabfällen aus Modellregionen AVL-Gerlingen und -Markgröningen.

Kunststoff-Partikel > 1 mm

In Abbildung 27 rechts ist die Analyse (> 1 mm) in der Nullcharge dargestellt. Die Menge an Kunststofffragmenten > 1 mm ist vergleichbar mit den Mengen, die im angelieferten Bioabfall der Nullchargen der anderen Anlagentypen gefunden wurden. Besonderheit der Anlage 3 ist, dass hier der Bioabfall mit einem Schredder (Langsamläufer) zerkleinert und anschließend der Bioabfall größer 60 mm mit einem Scheibensieb aussortiert wird. In Anlage 3 konnten aufgrund der Anlagentechnik nur Mischproben des Fertigkomposts untersucht werden, da die Inhalte der beiden parallel betriebenen Reaktoren (je 2000 m³) vor der Fest-/Flüssigtrennung zusammengeführt werden und es sich um ein dynamisches System handelt. Die Verweilzeiten entsprechen mindestens 3 Tage und sind in der Regel bei 21 Tage. Somit konnte der eingebrachte Bioabfall nicht genau verfolgt werden. Trotz eines zu den anderen untersuchten Anlagen vergleichbaren Inputs an BAW- und konventionellen Kunststoffbeuteln, ist die Menge an Fragmenten konventioneller Kunststoffe im Fertigkompost sehr hoch. Hier wird mit etwa 2 % Masseanteil der Grenzwert (0,1 Gew-%) der Düngemittelverordnung für folienartige Kunststofffragmente deutlich überschritten. Ob diese Beobachtung an der verwendeten Anlagentechnik liegt, konnte nicht final geklärt werden. Die Anlage hat nach einer internen Qualitätsüberprüfung den Kompost noch mal nachbehandelt, bevor er für die Vermarktung frei gegeben wurde.

In Abbildung 27 links sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für Kunststoffpartikel > 1 mm in der Versuchscharge dargestellt. Wie in der Nullcharge konnte auch hier nur eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht werden – aus oben erläuterten Gründen. Anders als in der Nullcharge überschreitet dieser den Grenzwert aus der Düngemittelverordnung jedoch nicht. Dies könnte daran liegen, dass durch die Benutzung der BabbA-BAW-Beutel weniger konventionelle Kunststoffe in die Anlage gelangen, was gerade am Beispiel Gerlingen deutlich wird. Insgesamt ist die Menge an Kunststoffpartikeln im Fertigkompost der Versuchscharge dennoch deutlich höher als an den anderen Anlagen. Dies liegt vermutlich an der Anlagentechnik. Hier wird im Anschluss an die Vergärung der flüssige Teil mittels einer Schneckenpresse vom festen getrennt, wobei durch die hohen mechanischen Kräfte Kunststofffolien potenziell zu kleineren Partikeln fragmentieren können.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

Abbildung 28 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Kunststoffpartikel kleiner 1 mm. Auffällig ist hier, dass im angelieferten Bioabfall aus der Modellregion Gerlingen eine hohe Belastung mit Kunststoffpartikeln gefunden wurde. Die Belastung aus dieser Modellregion zeigte sich in den anderen Versuchen deutlich geringer. Allerdings weisen die hier gefundenen

Werte eine hohe Standardabweichung auf. Wie an den anderen Anlagen ist die Anzahl der PBAT-Partikel im Fertigkompost der Versuchscharge deutlich höher als in der Nullcharge, da durch die BabbA-BAW-Beutel mehr BAW-Beutel in die Anlage eingebracht worden sind. Insgesamt ist die Zahl der gefundenen Partikel im Fertigkompost jedoch niedriger als an den anderen Anlagen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass ein großer Teil der BAW- und konventionellen Beutel im Siebüberlauf (bereits vor der biologischen Behandlung) landet, zum anderen tritt wahrscheinlich auch ein Verdünnungseffekt auf, da der eingebrachte Bioabfall (ca. 18 t) im 2.000 m³ Fermenter erheblich verdünnt wird. Eine weitere mögliche Erklärung wäre, dass ein großer Teil in den flüssigen Gärrest übergeht.

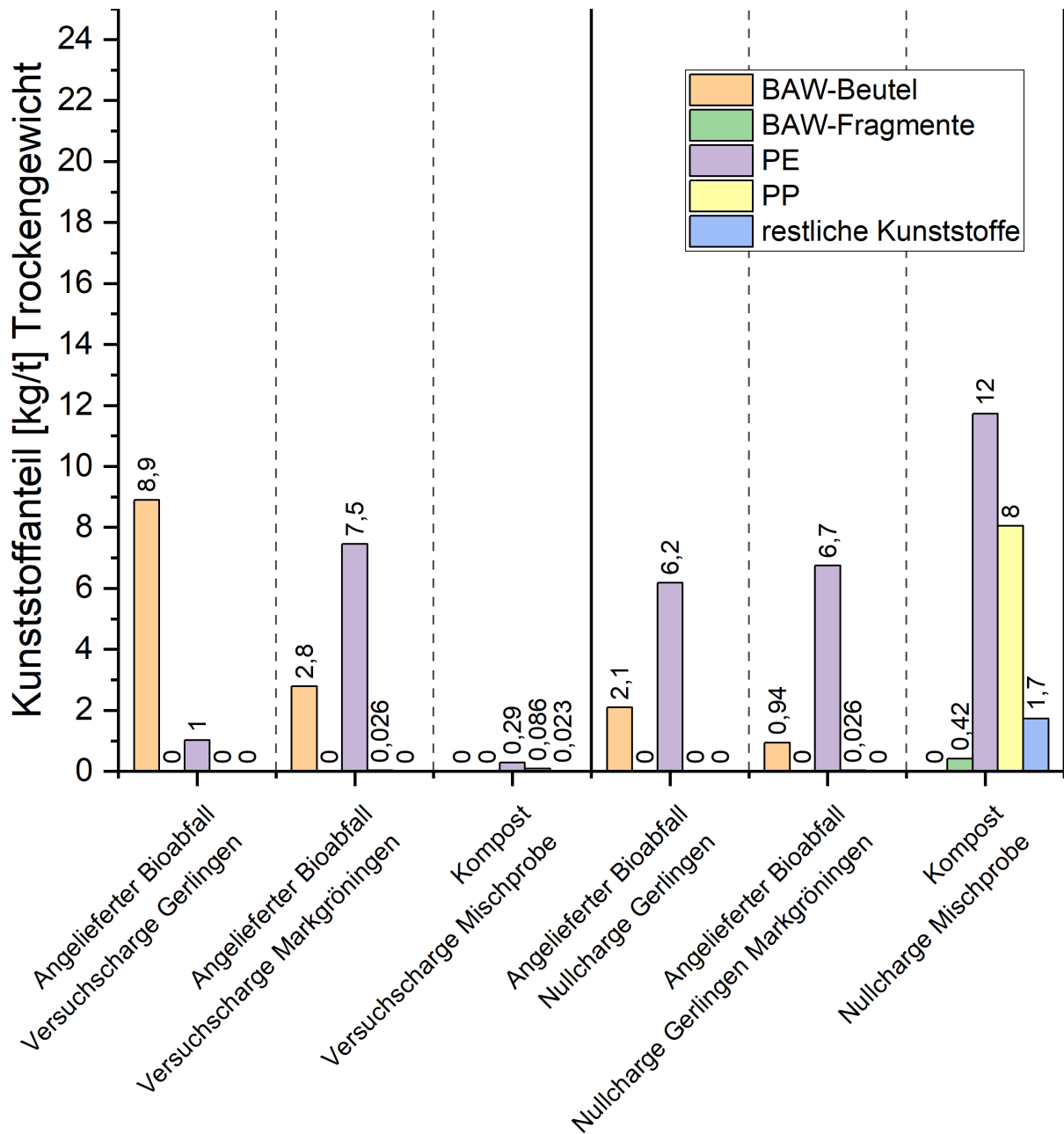


Abbildung 27: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm des Sommersversuchs in Anlage 3 (thermophile Trockenfermentation mit anschließender Kompostierung) mit den Bioabfällen aus Modellregionen AVL-Gerlingen und Markgröningen

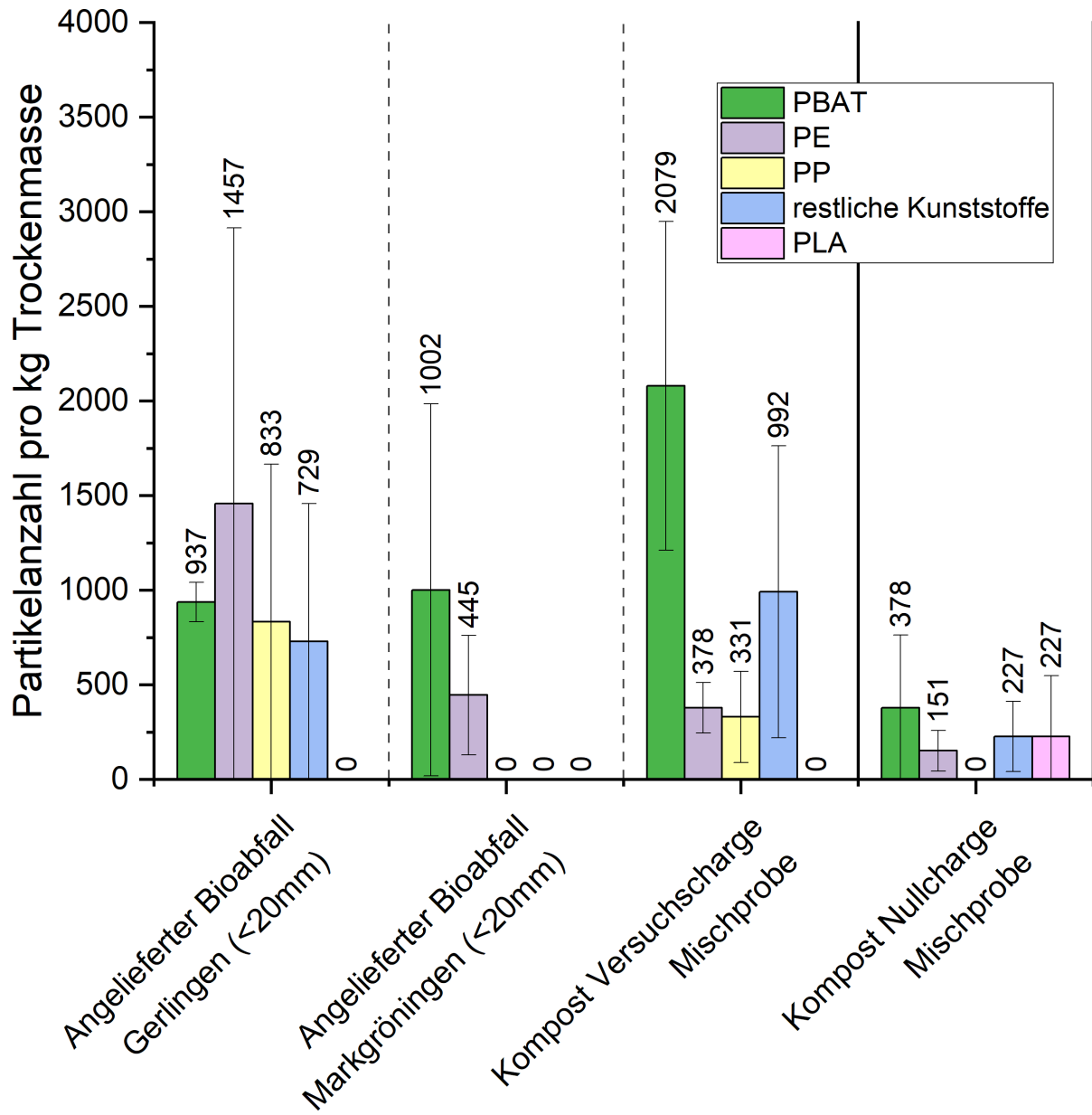


Abbildung 28: Stoffstromanalyse der Partikel < 1 mm im Sommersversuch in den Modellregionen Gerlingen und Markgröningen an der Anlage 3

4.1.3 Ergebnisse zu den Stoffstromanalysen in den Anlagen: Kunststoffgehalte im Winterversuch

Aufgrund der aufwendigen Probenaufbereitung und Analyse für Kunststoffpartikel kleiner als 1 mm und der kurzen verfügbaren Zeit wurde für die Winterversuch nur eine Stoffstromanalyse für Fragmente größer als 1 mm durchgeführt. Im Winterversuch konnte nur der Fertigkompost der Modellregionen Gerlingen und GOA in den Versuchschargen an der Anlage 1 und 2 auf Kunststoffpartikel kleiner 1 mm untersucht werden.

4.1.3.1 Anlage 1 reine Kompostierung – Winterversuch

AVL-Gerlingen

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalysen für Kunststoffpartikel größer als 1 mm im Winterversuch der Anlage 1 für Bioabfälle aus der Modellregion AVL-Gerlingen.

Abbildung 29 rechts zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Nullcharge. Neben dem angelieferten Bioabfall wurde eine Mischprobe des Fertigkomposts an der Anlage 1 untersucht. Hier konnte nur eine sehr geringe Belastung mit Kunststoffpartikeln im Fertigkompost nachgewiesen werden.

Abbildung 29 links zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel in der Versuchcharge. Hier wurden der angelieferte Bioabfall, der Siebüberlauf mit einer Größe von 15-40 mm, der zugehörige Siebtischdurchlauf < 20 mm des Siebüberlaufes, sowie der Fertigkompost untersucht. Im Siebüberlauf nach der Nachrotte wurden BAW-Fragmente entdeckt, der Großteil war dabei kleiner als 20 mm. Ein Teil der eingebrachten BAW-Beutel baute sich also weder ab noch fragmentierte er in Partikel kleiner 1 mm. Ein möglicher Grund dafür ist, dass sich ein Teil der Beutel während des Rotteprozesses am Rand der Miete befunden haben könnten, und somit nicht den optimalen Bedingungen innerhalb der Mieten ausgesetzt waren, die eine Fragmentierung und den Abbau fördern. Der hohe Anteil an konventionellen Kunststoffen im Siebüberlauf von 15-40 mm ist auf sonstige Fremdstoffe (keine Beutel) im angelieferten Bioabfall und die Verringerung der Bezugsmasse durch den Zerfall zurückzuführen. Anders, als im Sommerversuch, wo keine Kunststofffragmente im Fertigkompost gefunden wurden, wurde im Fertigkompost eine geringe Belastung mit Kunststoffpartikeln festgestellt, die allerdings unter dem festgelegten Grenzwert liegt.

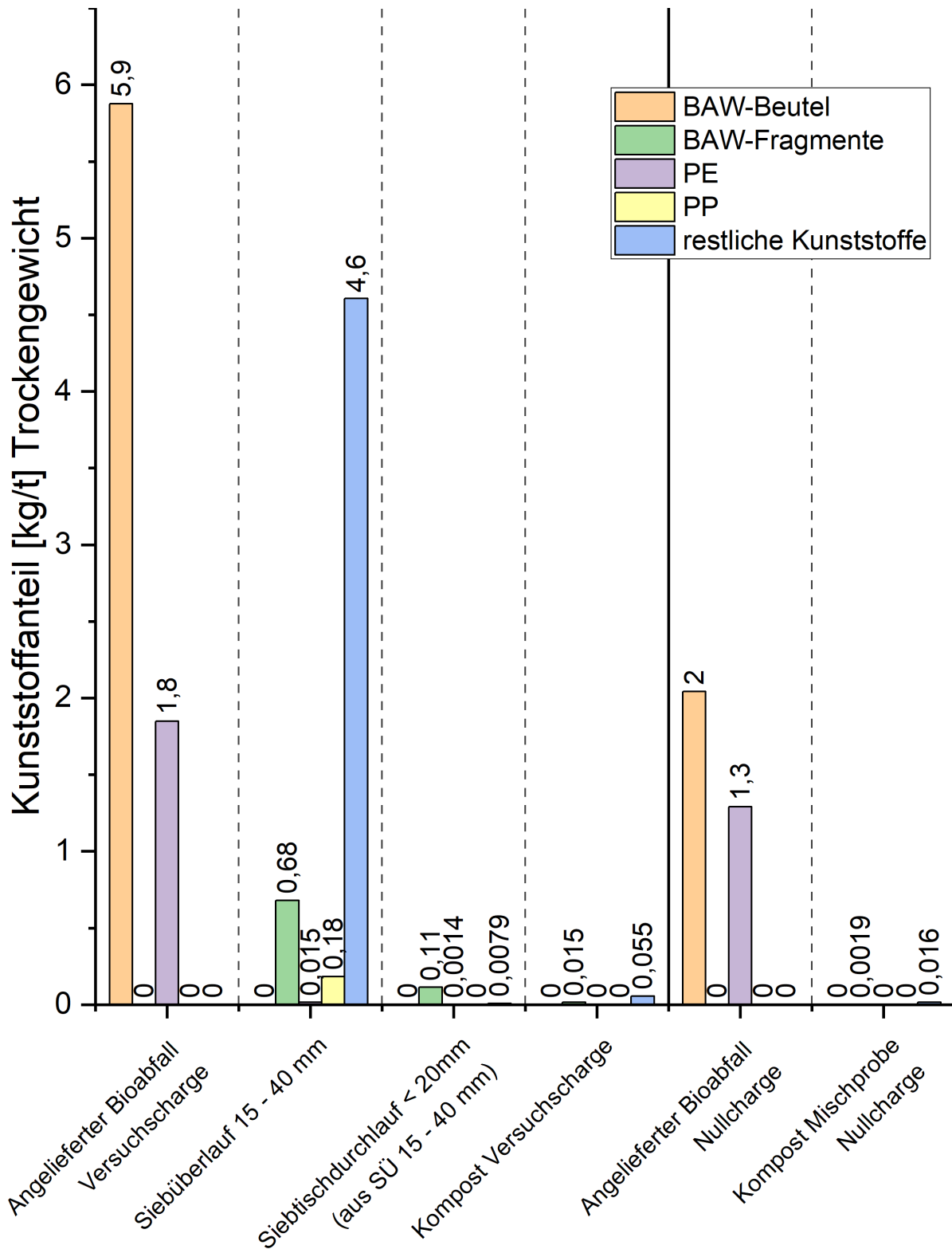


Abbildung 29: Stoffstromanalysen für Kunststoffpartikel > 1 mm im Winterversuch der Anlage 1 für Bioabfälle aus der Modellregion AVL-Gerlingen; SÜ (Siebüberlauf)

AVL-Markgröningen

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Markgröningen.

Abbildung 30 rechts zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Nullcharge. Wie im Sommersversuch wurden in der Nullcharge nur der angelieferte Bioabfall und eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht. Im Fertigkompost wurde nur eine sehr geringe Belastung mit Kunststoffpartikeln größer als 1 mm entdeckt, die deutlich unter dem in der Düngemittelverordnung festgelegten Grenzwert liegt.

In Abbildung 30 links sind die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel in der Versuchscharge dargestellt. Der Input an BAW-Beuteln in der Versuchscharge war deutlich höher als in der Nullcharge und auch höher als im Sommersversuch, wo eventuell Schwierigkeiten bei der Verteilung der Beutel der Grund für den geringeren BabbA-BAW-Beutel-Input sein könnte. Neben dem angelieferten Bioabfall und dem Fertigkompost wurde der Siebtischdurchlauf kleiner 20 mm, des Siebüberlaufes, sowie der Siebüberlauf von 15-40 mm nach der Nachrotte untersucht. Im Siebüberlauf konnten nur wenige Kunststoffpartikel gefunden werden. Das liegt vermutlich daran, dass hier nur Partikel mit einer Größe zwischen 1 und 40 mm betrachtet wurden und sich konventionelle Kunststoffe während der Kompostierung kaum abbauen oder zerfallen. Daher ist es wahrscheinlich, dass sich diese in der Fraktion größer 40 mm anreichern und daher hier nicht erfasst wurden. Im Fertigkompost konnte, wie in der Nullcharge, eine geringe Belastung mit Kunststoffpartikeln größer 1 mm nachgewiesen werden, welche jedoch unter dem Grenzwert von 0,1 % der Trockenmasse lag.

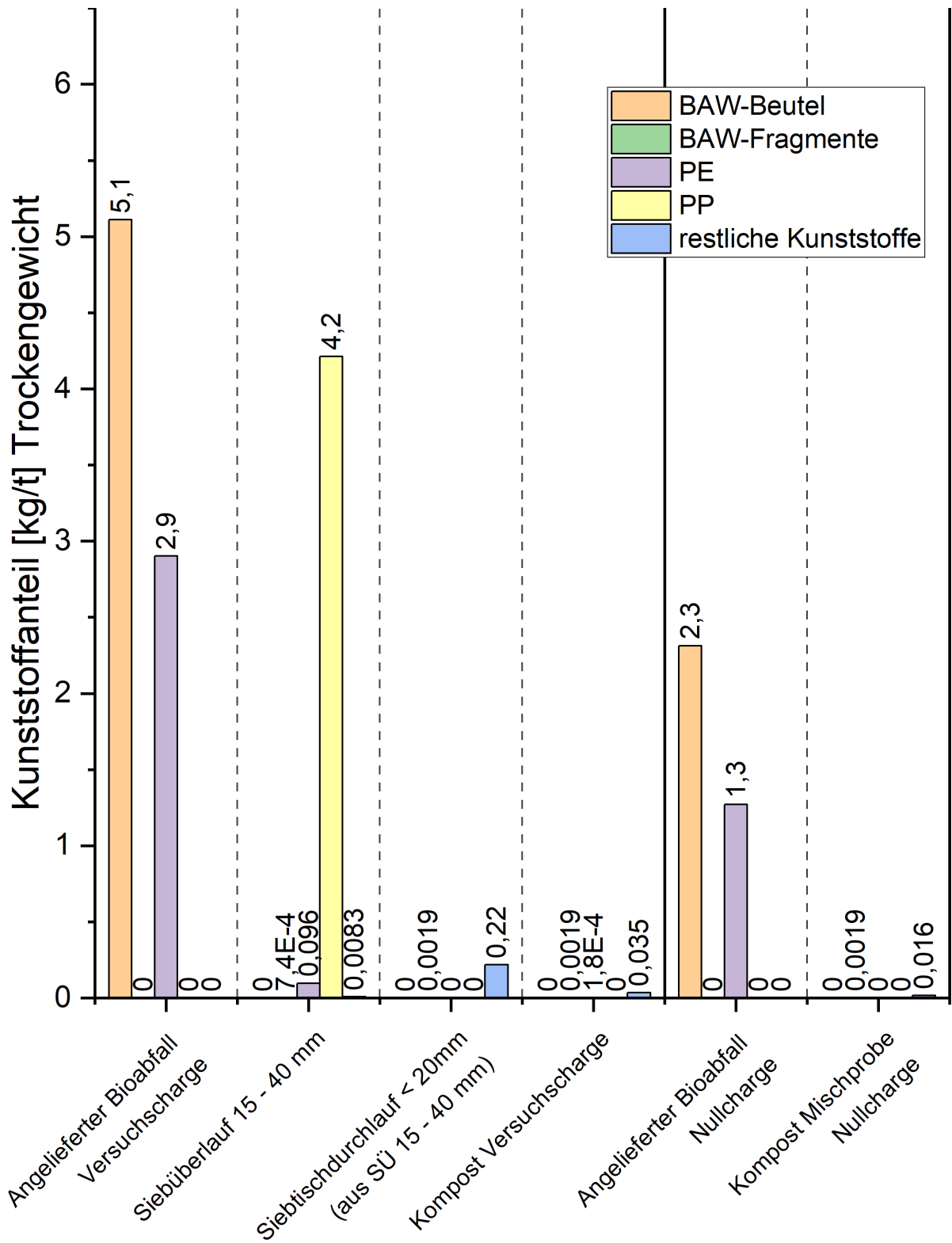


Abbildung 30: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Markgröningen; SÜ (Siebüberlauf)

AVL-Steinheim

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Steinheim.

Abbildung 31 rechts zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel in der Nullcharge. Hier wurde der angelieferte Bioabfall und eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht. Wie bereits beschrieben, wurde in der Nullcharge in der Mischprobe des Fertigkomposts an der Anlage 1 eine geringe Menge an Kunststoffpartikeln größer 1 mm entdeckt, die unter dem festgelegten Grenzwert lag.

Abbildung 31 links zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel in der Versuchscharge. Es wurden der angelieferte Bioabfall, der Siebüberlauf von 15-40 mm, der Siebtischdurchlauf kleiner 20 mm, des Siebüberlaufes, sowie der Fertigkompost untersucht. Trotz des geringen Inputs an BAW-Beuteln wurden auch hier im Siebüberlauf nach der Nachrotte BAW-Fragmente entdeckt. Wie in der Modellregion Gerlingen könnte ein Grund dafür sein, dass sich Beutel am Rand der Miete weniger gut abbauen und dass sie daher weniger fragmentierten. Die gefundene Belastung mit Kunststoffpartikeln im Fertigkompost ist sehr gering.

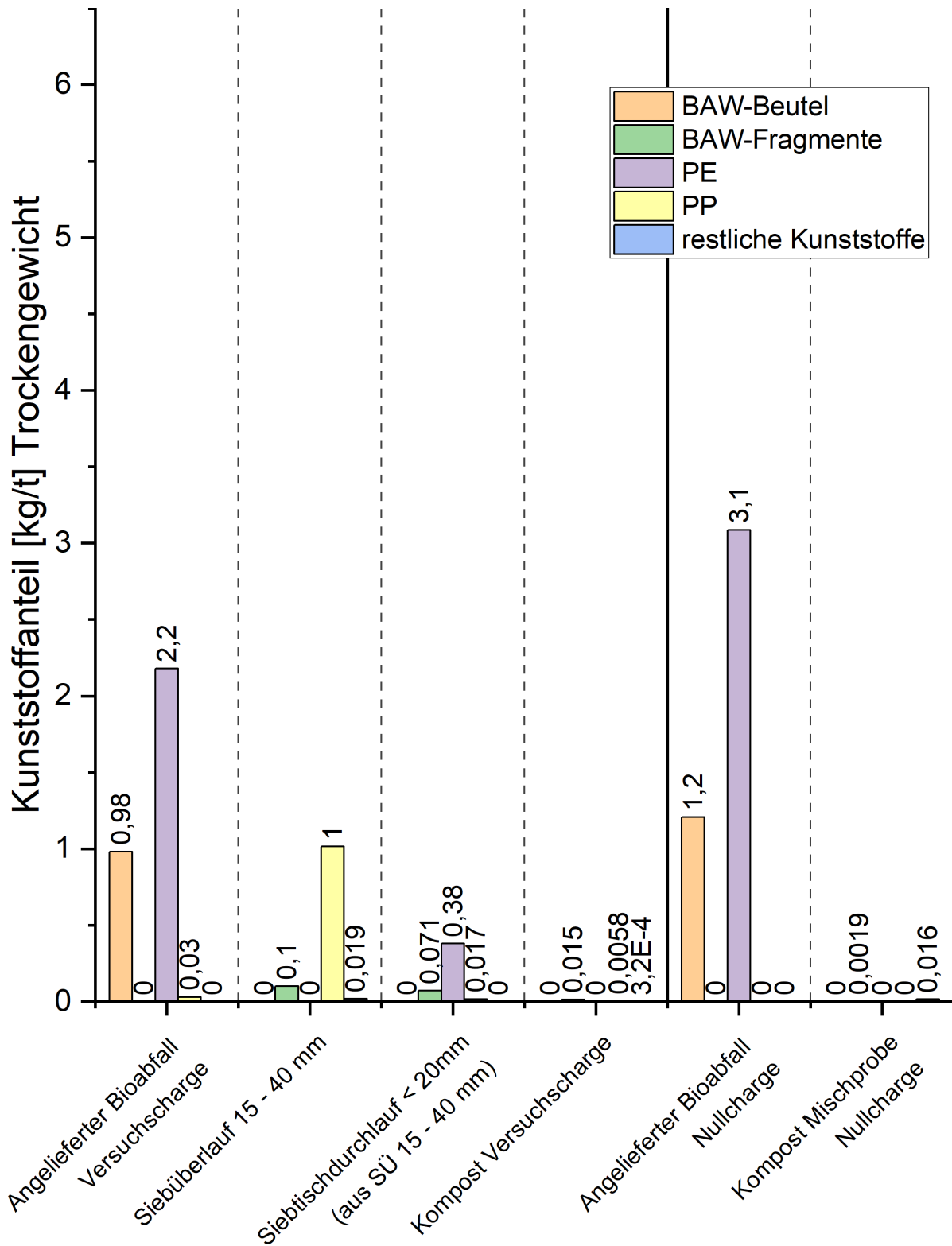


Abbildung 31: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Steinheim; SÜ (Siebüberlauf)

GOA-Ostalbkreis

Für den Winterversuch konnte das Projekt BabbA die Modellregion GOA-Ostalbkreis für die Versuchsdurchführung hinzugewinnen. Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion GOA.

Kunststoffpartikel > 1 mm

Abbildung 32 rechts zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel in der Nullcharge. Wie bereits erklärt, wird in der Modellregion GOA ein PE-Sacksammelsystem verwendet, was die große Menge an eingehenden PE-Beuteln erklärt. Der Fertigkompost in der Nullcharge wurde als Mischprobe an der Anlage 1 analysiert. Hier, wurde nur eine geringe Belastung mit Kunststoffpartikeln entdeckt, welche unter dem Grenzwert von 0,1 % der Trockenmasse lag.

Abbildung 32 links zeigt die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel > 1 mm für die Stoffstromanalyse in der Versuchscharge. Hier wurden der angelieferte Bioabfall, der Siebtischdurchlauf kleiner 20 mm, des Siebüberlaufes, der Siebüberlauf von 15-40 mm sowie der Fertigkompost untersucht. Durch die verteilten Beutel erhöhte sich der Input an BAW-Beuteln gegenüber der Nullcharge stark, während sich der Input an GOA-Sammelbeuteln aus PE deutlich verringerte. Im Siebüberlauf nach der Kompoststreife wurde nur eine geringe Menge an BAW-Fragmenten und konventionellen Kunststoffen entdeckt. Vermutlich wurde ein großer Teil der konventionellen Kunststoffbeutel entweder bereits während der Siebung nach der Intensivrotte oder der Nachrotte entfernt. Deshalb wurden nach der Kompoststreife nur wenige Kunststoffe im Siebüberlauf gefunden. Eine andere Möglichkeit ist, dass die Kunststofffragmente noch größer als 40 mm waren und daher in der Fraktion kleiner als 40 mm nicht erfasst wurden. Im Fertigkompost wurden BAW-Fragmente und konventionelle Kunststoffpartikel gefunden. Die Menge unterschreitet zwar immer noch den geforderten Grenzwert, jedoch ist die Belastung mit BAW-Fragmenten in der Modellregion GOA signifikant höher als in den anderen Modellregionen an der Anlage 1. Der im Versuch deutlich höhere Eintrag an BAW-Beuteln hat also hier auch eine Erhöhung der Menge an BAW-Fragmenten im Fertigkompost zur Folge.

Kunststoff-Partikel < 1 mm

Im Winterversuch konnten nur der Fertigkompost der Modellregionen Gerlingen und GOA in der Versuchscharge an der Anlage 1 auf Kunststoffpartikel kleiner 1 mm untersucht werden. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 33 dargestellt. Wie schon im Sommersversuch dominieren die PBAT-Partikel über die konventionellen Kunststoffe; es wurden kaum konventionelle Kunststoffpartikel entdeckt. Trotz der hohen Standardabweichung wird deutlich, dass in der Modellregion GOA mehr PBAT-Partikel als in der Modellregion Gerlingen gefunden wurden. Das liegt daran, dass in der Modellregion GOA mehr als doppelt so viele

BAW-Beutel angeliefert wurden, was an dem Sack-Sammelsystem der GOA liegt (anstatt einer Biotonne, werden PE-Säcke für die logistische Sammlung des Bioabfalls verwendet, in diesem Versuch wurden die PE-Beutel in den teilnehmenden Haushalten durch dickwandige BabbA-BAW-Beutel ersetzt). Wie bei den BAW-Fragmenten größer 1 mm bewirkt ein höherer Input an BAW-Beuteln scheinbar auch eine Erhöhung an PBAT-Partikeln kleiner 1 mm im Fertigkompost. Je mehr BAW-Beutel also in die Anlage eingebracht werden, desto mehr PBAT-Partikel werden im Fertigkompost gefunden.

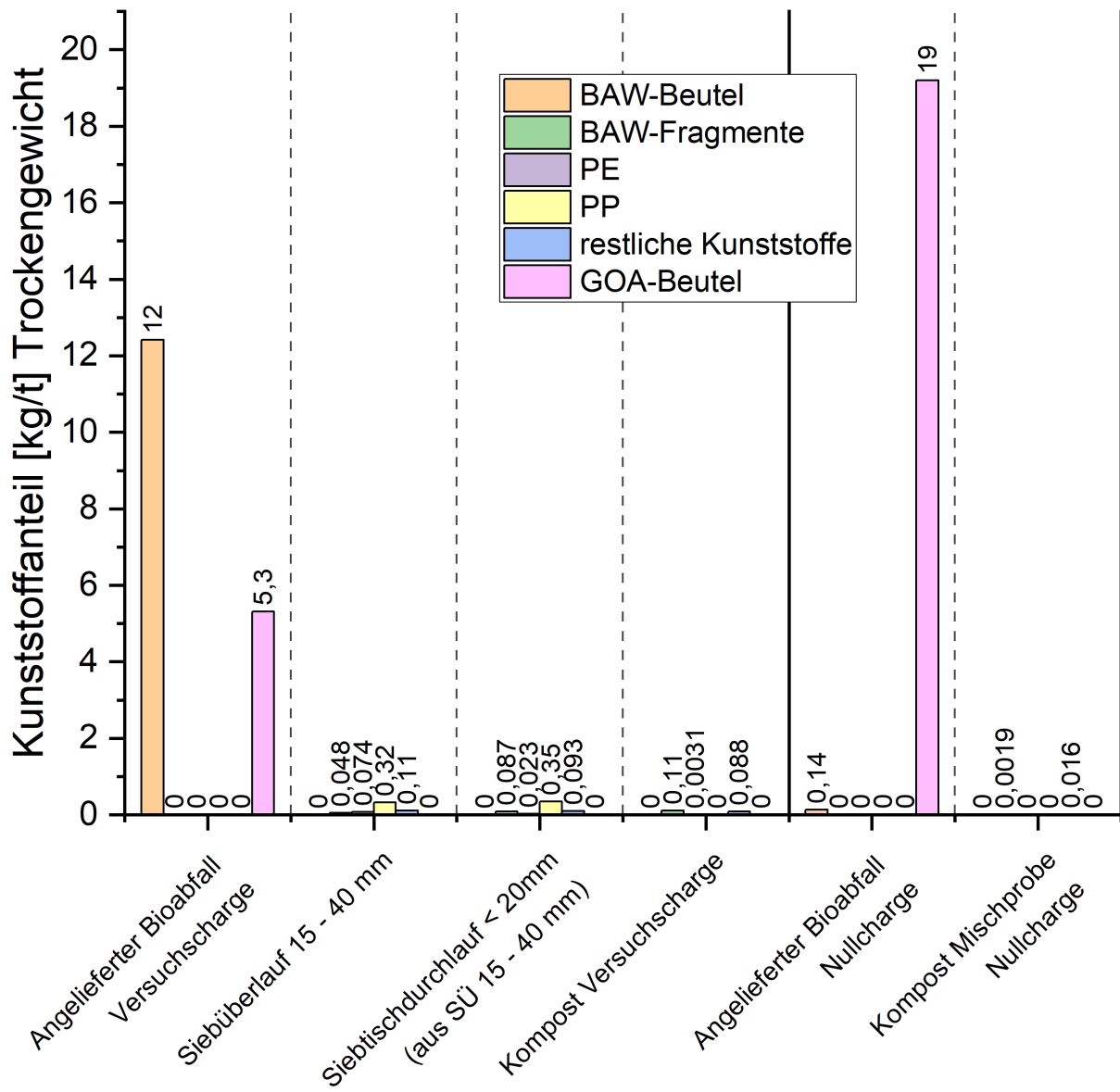


Abbildung 32: Stoffstromanalyse der Anlage 1 im Winterversuch mit Bioabfällen aus der Modellregion GOA; SÜ (Siebdurchlauf)

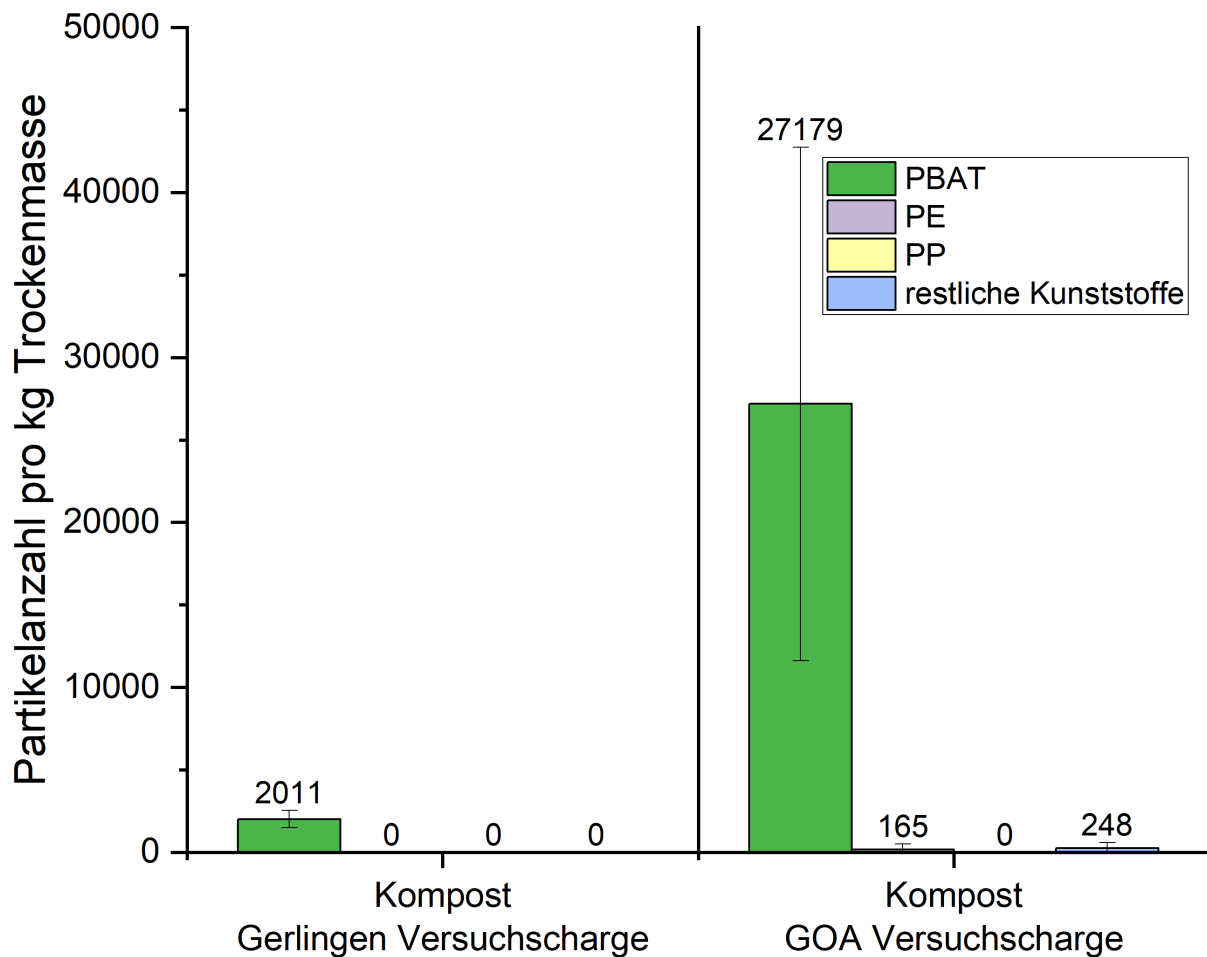


Abbildung 33: Kunststoffpartikel < 1 mm im Fertigkompost der Versuchscharge in den Modellregionen Gerlingen und GOA an der Anlage 1 im Winterversuch

4.1.3.2 Anlage 2 Vergärung im mesophilen Boxenfermenter mit anschließender Kompostierung – Winterversuch

AVL-Gerlingen

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 2 (diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage mit anschließender Kompostierung) im Winterversuch mit den Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Gerlingen.

In Abbildung 34 rechts sind die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel in der Nullcharge dargestellt. Wie an der Anlage 1, wurden in der Nullcharge der angelieferte Bioabfall, sowie eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht. Im Fertigkompost wurde eine geringe Belastung mit BAW-Fragmenten und konventionellen Kunststoffpartikeln entdeckt, die jedoch unter dem in der Düngemittelverordnung festgelegten Grenzwert liegt.

Abbildung 34 zeigt zudem die Ergebnisse der Analyse der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Versuchscharge und die dazugehörigen Siebüberläufe (15-20 mm, 20-40 mm und > 40 mm) nach der Nachrotte. Neben den Siebüberläufen wurde der angelieferte Bioabfall, der Gärrest, das Rottegut nach der Intensivrotte, sowie der Fertigkompost untersucht. Durch die verteilten Projektbeutel stieg der Input an BAW-Beuteln gegenüber der Nullcharge an. Anders als im Sommerversuch wurde im Gärrest eine große Menge an BAW-Fragmenten entdeckt. Der höhere Anteil im Gärrest liegt daran, dass die Bezugsmasse (die Biomasse) sich aufgrund der Abbauprozesse reduziert hat. Ein Grund für die größere Menge an BAW-Fragmenten im Gärrest könnten die niedrigeren Außentemperaturen (Witterungsbedingungen) während der Lagerung in den Sammelbehältnissen und einhegender niedriger(e) mikrobieller „Vorab“-Aktivitäten (Biofilme etc.) als in den Sommermonaten vor Einbringung des Biogutes in dem Vergärungsprozess sein.

Auch nach der Intensivrotte konnten noch einige BAW-Fragmente entdeckt werden, jedoch deutlich weniger als im Gärrest. Die BAW-Fragmente wurden entweder abgebaut oder sind in Partikel < 1 mm fragmentiert. Im Gärrest konnten neben den BAW-Fragmenten auch in einem wesentlich geringeren Maß konventionelle Kunststoffpartikel entdeckt werden. Die Zunahme dieses Anteils nach der Intensivrotte ist wiederum auf die Abnahme der Bezugsmasse zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Siebüberläufe zeigen, dass je größer die Maschenweite der Siebanlage ist, desto mehr konventionelle Kunststoffe konnten gefunden werden. Das liegt daran, dass konventionelle Kunststoffe nicht auf Zerfall ausgelegt sind und daher langsamer als BAW-Beutel bzw. gar nicht fragmentieren. In den Siebüberläufen konnte nur eine sehr geringe Menge an BAW-Fragmenten gefunden werden, da sich die Fragmente größtenteils bereits soweit zersetzt hatten, dass diese nicht mehr ausgesiebt werden konnten. Im Fertigkompost konnte eine geringe Belastung mit Kunststoffpartikeln entdeckt werden, die unterhalb des Grenzwerts lag. Den größten Anteil hatten hier PE-Fragmente, die wahrscheinlich durch mechanische Zerkleinerung entstanden sind.

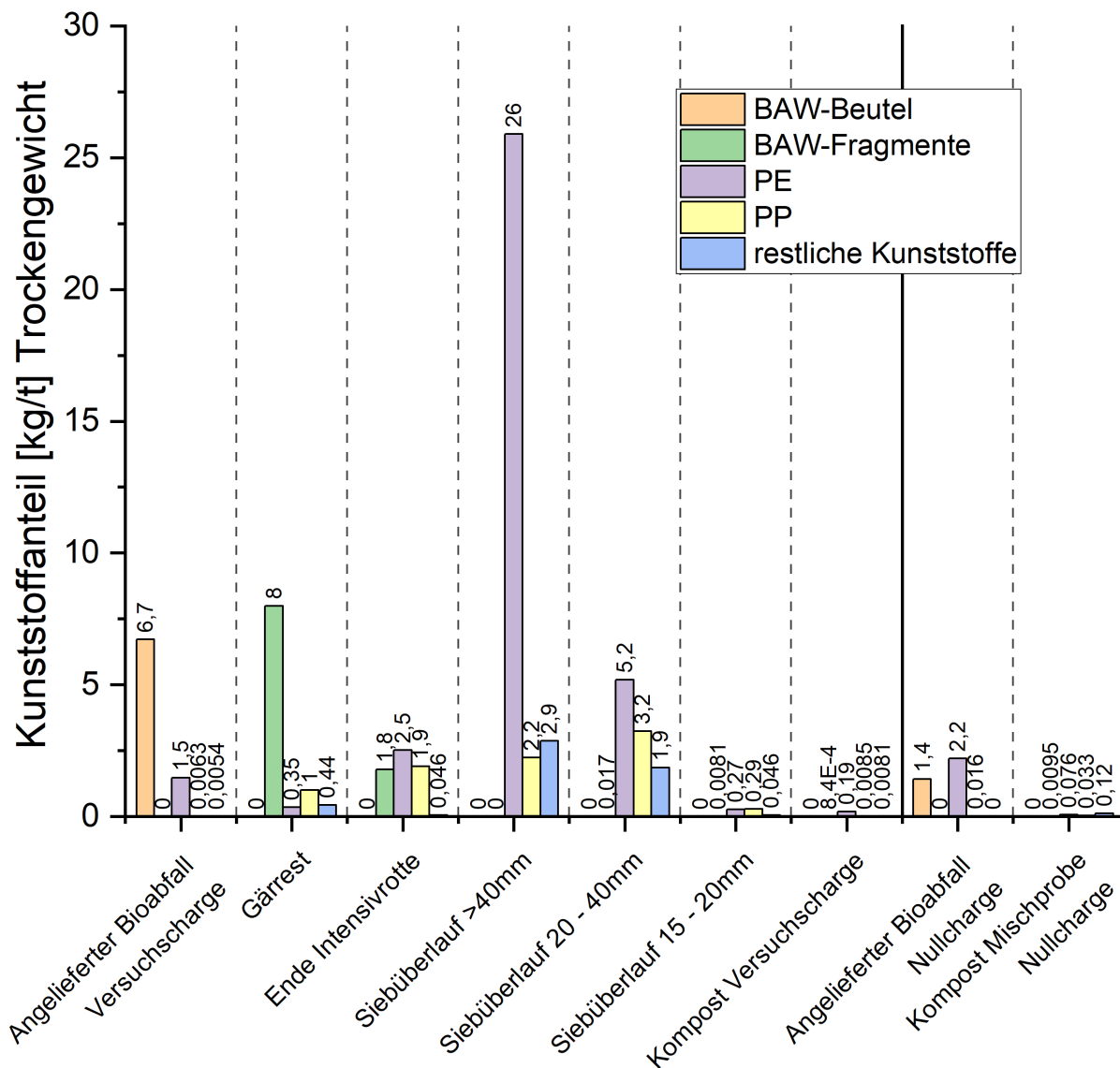


Abbildung 34: Stoffstromanalyse der Partikel > 1 mm der Anlage 2 (diskontinuierliche, mesophile Trockenvergärungsanlage - mit anschließender Kompostierung) im Winterversuch mit den Bioabfällen aus der Modellregion AVL-Gerlingen

GOA-Ostalbkreis

Abbildung 35, zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 2 im Winterversuch mit den Bioabfällen aus der Modellregion GOA-Ostalbkreis.

Abbildung 35 rechts zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Nullcharge. Wie in der Modellregion Gerlingen, wurden der angelieferte Bioabfall und eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht. Durch das verwendete Sacksammelsystem ist der Eintrag an PE sehr hoch, der Input an BAW-Beuteln jedoch sehr niedrig. Wie bereits in der Modellregion Gerlingen erwähnt, weist der Fertigkompost zwar eine

Belastung mit Kunststoffpartikeln auf, diese liegt jedoch unter dem Grenzwert von 0,1 % der Trockenmasse.

In Abbildung 35 links sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Versuchsscharge dargestellt. Zudem sind die zugehörigen Siebüberläufe abgebildet. Neben den Siebüberläufen von 20-40 mm bzw. größer 40 mm wurden der angelieferte Bioabfall, der Gärrest, das Rottegut nach der Intensivrotte sowie der Fertigkompost untersucht. Durch die verteilten Beutel wurde der Input an BAW-Beuteln deutlich erhöht, während sich weniger GOA-Sammelbeutel aus PE im angelieferten Bioabfall befanden. Wie bei der Modellregion Gerlingen wurde im Gärrest eine große Menge an BAW-Fragmenten entdeckt. Auch in der Intensivrotte wurde ein großer Anteil an BAW-Fragmenten detektiert. In den Siebüberläufen nach der Nachrotte und im Fertigkompost befanden sich jedoch kaum, bis keine BAW-Fragmente. Das bedeutet wiederum, dass sich die BAW-Fragmente entweder abbauten oder in Partikel kleiner 1 mm fragmentierten. Der hohe Input an BAW-Beutel führt zwar dazu, dass sich der Anteil an BAW-Fragmenten im Fertigkompost mehr als verzehnfacht, die Menge liegt jedoch noch unter dem erlaubten Grenzwert. Der hohe Anteil an konventionellen Kunststoffen im Gärrest ist auf die Verringerung der Biomasse zurückzuführen. Im Siebüberlauf, vor allem dem Siebüberlauf größer 40 mm, konnte eine große Menge an konventionellen Kunststoffen entdeckt werden, im Fertigkompost jedoch nur eine vergleichsweise geringe Menge. Da sich diese Kunststoffe weder kaum abbauen noch stark fragmentieren, ist davon auszugehen, dass eingetragene konventionelle Kunststoffe beim Sieben größtenteils entfernt werden und daraus nur sehr vereinzelt Mikroplastikpartikel entstehen.

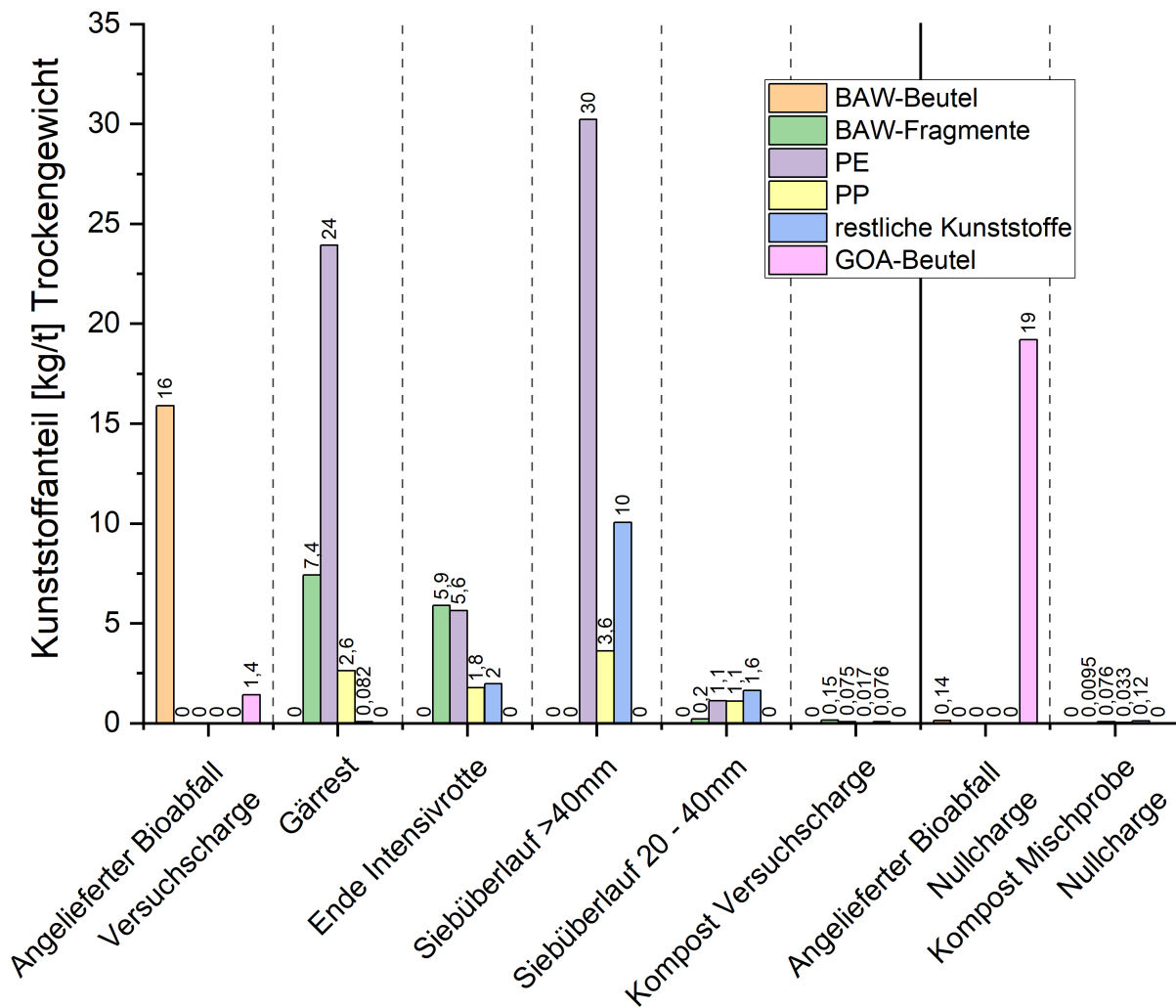


Abbildung 35: Stoffstromanalyse (>1 mm) des Winterversuchs in der Modellregion GOA an der Anlage 2

Kunststoff-Partikel < 1 mm

An der Anlage 2 konnten im Winterversuch nur die Fertigkomposte der Versuchsscharge aus den Modellregionen Gerlingen und GOA auf Kunststoffpartikel kleiner 1 mm untersucht werden. Das Ergebnis der Analysen ist in Abbildung 36 dargestellt. Wie bei den vorherigen Analysen der Partikel kleiner 1 mm dominieren die PBAT-Partikel. Trotz hoher Standardabweichungen wird deutlich, dass in der Modellregion Gerlingen weniger PBAT-Partikel aufgrund des niedrigeren BAW-Inputs gefunden wurden. Wie an der Anlage 1 führte ein höherer Input an BAW-Beuteln zu mehr PBAT-Partikeln kleiner 1 mm im Fertigkompost. Obwohl der Input an BAW-Beuteln in der Modellregion GOA an der Anlage 2 etwas höher war als an der Anlage 1, wurden an der Anlage 2 weniger PBAT-Partikel im Fertigkompost gefunden. Dies könnte an der unterschiedlichen Anlagentechnik liegen, kann aufgrund der hohen Standardabweichungen statistisch aber nicht bestätigt werden.

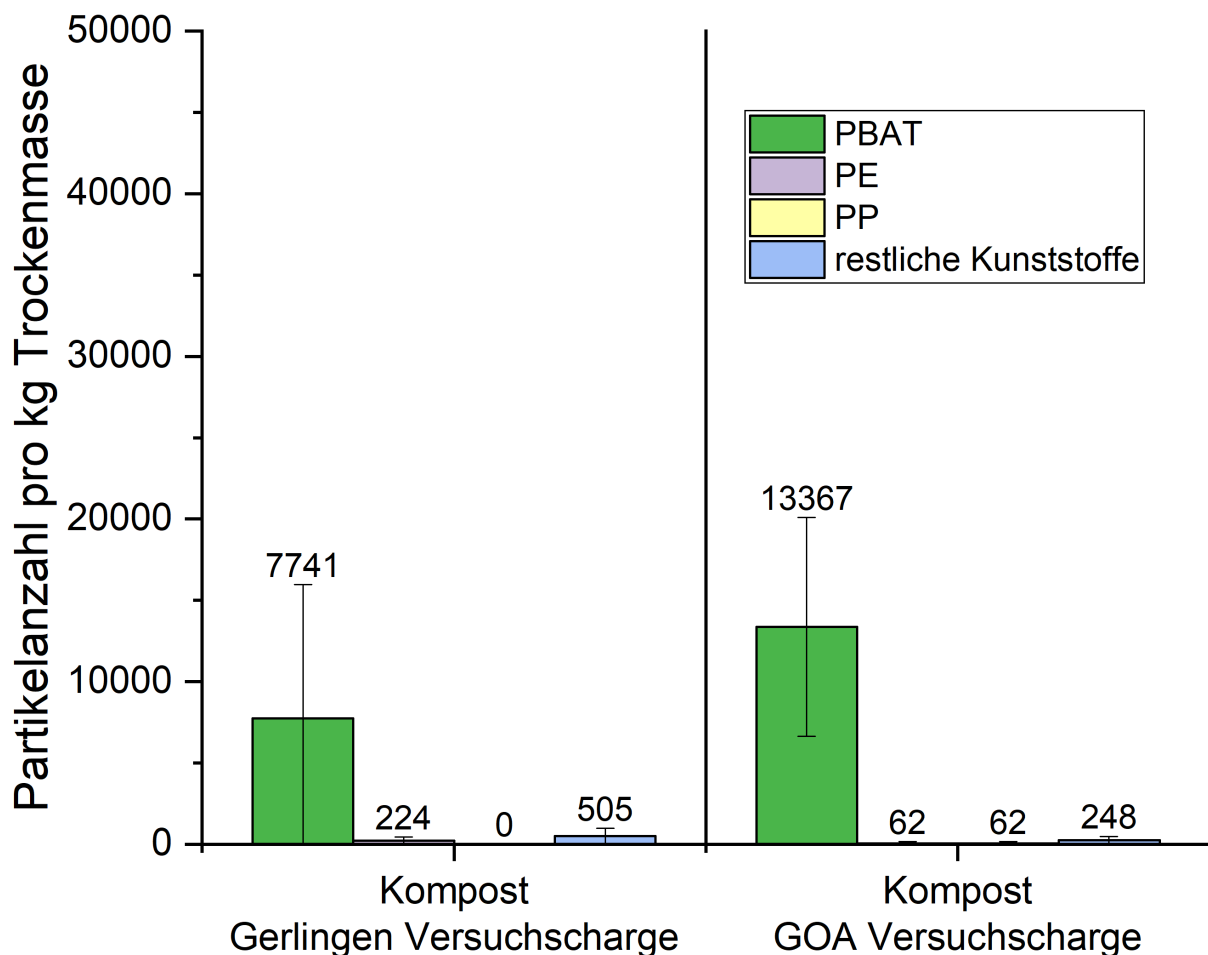


Abbildung 36: Kunststoffpartikel <1 mm im Fertigkompost der Versuchscharge in den Modellregionen Gerlingen und GOA an der Anlage 2 im Winterversuch

4.1.3.3 Anlage 3 Vergärung in thermophiler Trockenfermentationsanlage mit anschließender Kompostierung – Winterversuch

Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Anlage 3 (kontinuierliche, thermophile Trockenfermentationsanlage mit anschließender Kompostierung) im Winterversuch mit den Bioabfällen aus den Modellregionen AVL-Markgröningen und GOA-Ostalbkreis.

In Abbildung 37 rechts sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Nullcharge dargestellt. Wie im Sommersversuch konnten, aufgrund der Anlagentechnik, hier nur der angelieferte Bioabfall aus den Modellregionen und eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht werden. Im Fertigkompost wurde wie im Sommersversuch eine höhere Belastung mit Kunststoffpartikeln als an den anderen Anlagen entdeckt. Das liegt vermutlich an der Anlagentechnik. Die Belastung liegt noch unter dem in der Düngemittelverordnung festgelegten Grenzwert.

Abbildung 37 links zeigt die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für der Kunststoffpartikel > 1 mm in der Versuchscharge. Wie in der Nullcharge konnten nur der angelieferte Bioabfall und eine Mischprobe des Fertigkomposts untersucht werden. Durch die verteilten BabbA-BAW-Beutel ist der Input an BAW-Beuteln deutlich gestiegen, im Fertigkompost konnten jedoch keine BAW-Fragmente größer 1 mm nachgewiesen werden. Da der Siebüberlauf vor der Vergärung (größer 60 mm) nicht untersucht werden konnte, ist nicht klar, wie viele BAW-Beutel hier bereits entfernt wurden. Auch konnten keine Siebüberläufe nach der Nachrotte analysiert werden. Daher ist an dieser Anlage nicht sicher, ob sich die BAW-Beutel abbauen, fragmentieren oder bei der Siebung entfernt werden. Die Belastung mit Kunststoffpartikeln größer 1 mm ist in der Versuchscharge höher als an den anderen Anlagen, liegt jedoch auch noch unter dem Grenzwert von 0,1 % der Trockenmasse.

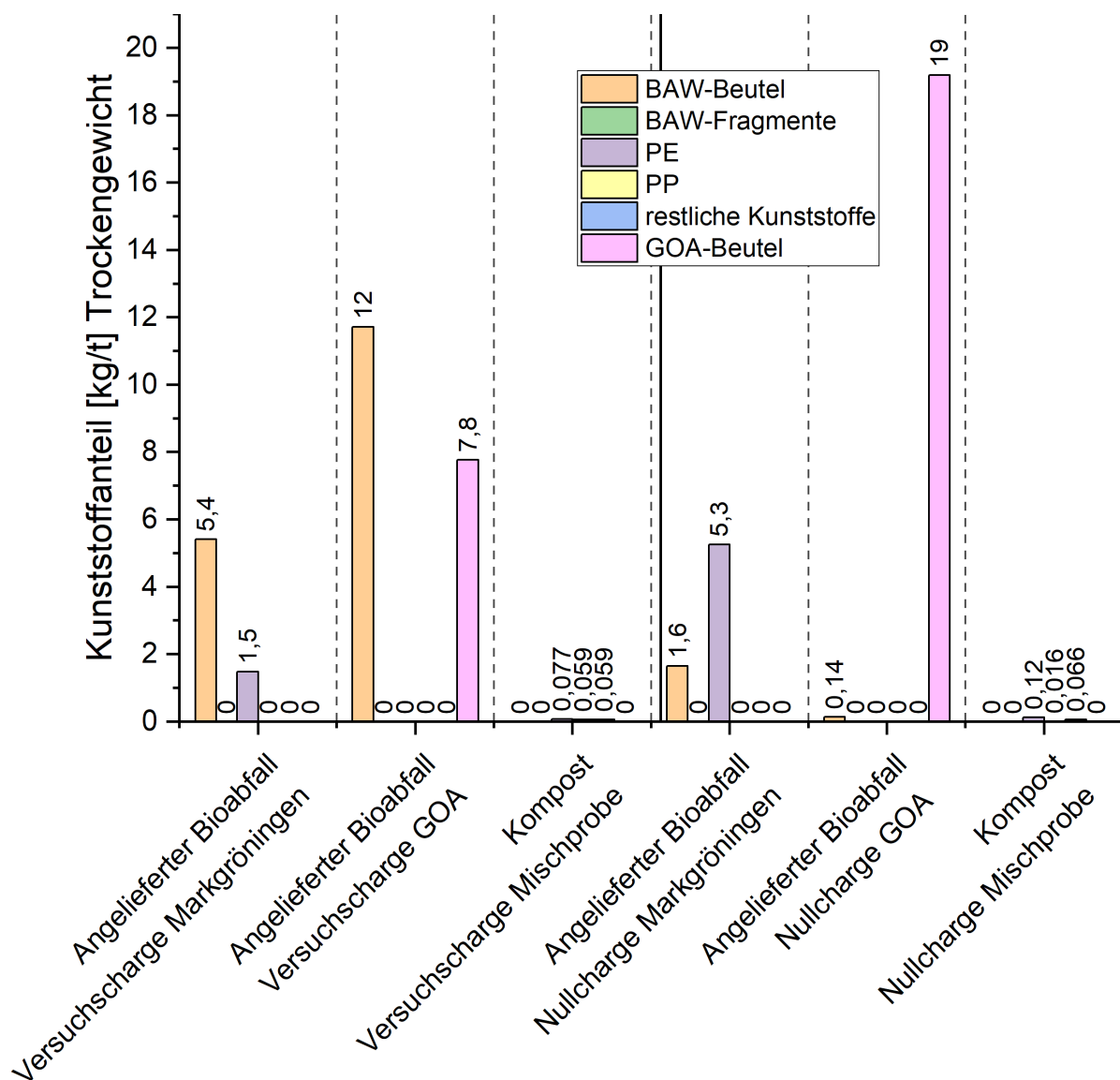


Abbildung 37: Stoffstromanalyse (>1 mm) des Winterversuchs in den Modellregionen Markgröningen und GOA an der Anlage 3

4.1.4 Fazit

Das Projekt BabbA hat mittels Chargenanalysen und Stoffstromanalysen erstmals eine großangelegte Untersuchung der Belastung von Bioabfällen, Rottegut und Kompost mit BAW und konventionellen Kunststoffen durchgeführt. Hierbei wurde explizit auch Mikroplastik bis zu einer Größe von 10 µm untersucht. Die Inhomogenität des Probematerials führte teilweise zu höheren Abweichungen in den quantitativen Ergebnissen der Stoffstromanalysen, allerdings liefern die Ergebnisse einen verlässlichen Einblick bezüglich der relevanten Fragen des Projektes.

- 1) *Führt die Einführung von BAW-Sammelbeuteln zu einer Verdrängung von konventionellen Kunststoffsammlbeuteln bzw. verringert sich durch den Einsatz von BAW-Sammelbeuteln der Fremdstoffgehalt im angelieferten Bioabfall?*

Nein. Durch die Chargenanalysen wurde ersichtlich, dass nur im Sommersversuch bei den Sammelgebieten der AVL ein Rückgang der konventionellen Kunststoffsammlbeutel im Vergleich zur Nullcharge erkennbar war. Dies konnte im Winterversuch jedoch nicht bestätigt werden. Möglicherweise spielte hier der psychologische Effekt des „sich beobachtet Fühlens“ eine Rolle: Durch die Verteilung der Informationsflyer zum Projekt BabbA wurde den Bürger*innen mitgeteilt, dass der Bioabfall auf Qualität geprüft wird, und dementsprechend wurde durch die Bürger*innen kurzfristig etwas mehr auf saubere Mülltrennung geachtet. Da im Winterversuch die Unterschiede des angelieferten Bioabfalls zwischen Null- und Versuchscharge im Rahmen der natürlichen Schwankungen sehr gering waren, kann die Hypothese, dass durch den Einsatz von BAW-Sammelbeuteln ein Rückgang der konventionellen Kunststoffbeutel erzielt würde, nicht bestätigt werden. Dies spiegelt sich in der Erfassung der generellen Fremdstoffbelastung wider: Es konnte im Rahmen der normalen Schwankungen kein Unterschied der durchschnittlichen Fremdstoffbelastung zwischen den Versuchschargen und den Nullchargen der AVL beobachtet werden. Die Gesamtmenge an Sammelbeuteln änderte sich im Versuch mit der Modellregion GOA allerdings nicht.

- 2) *Ändert sich die Kompostgüte nach aktuellen Richtlinien bei Verwendung von BAW-Beuteln in Bezug auf den erlaubten Kunststoffgehalt?*

Nein. In der Regel wurden die Kunststoffgrenzwerte für Kunststofffragmente größer als 1 mm eingehalten. Jedoch gibt es keine aktuellen Regelungen für Partikel kleiner als 1 mm.

- 3) *Werden zertifizierte kompostierbare BAW-Beutel in kommunalen Bioabfallverwertungsanlagen (Kompostierung & Vergärung mit anschließender Kompostierung) vollständig abgebaut?*

Nein. Ein vollständiger biologischer Abbau bedeutet die Umsetzung des Materials in Biomasse, CO₂, Salze und Wasser. Da im fertigen Kompost immer noch große Mengen an Partikeln < 1 mm mit PBAT-Signatur (Hauptbestandteil vieler BAW-Beutel) gefunden wurden, und diese Menge oft mit dem Input an BAW-Beuteln anstieg, kann nicht von einem vollständigen Abbau gesprochen werden.

- 4) *Verursachen BAW-Sammelbeutel mehr oder weniger Mikrokunststoffpartikel im fertigen Kompost als konventionelle Kunststoffbeutel?*

Mehr. Im Bereich kleiner 1 mm dominierte der Anteil der PBAT-Partikel stark über die Gesamtheit der konventionellen Kunststoffpartikel. Durch die Stabilität der konventionellen Kunststoffbeutel zerfallen diese nicht im Kompostierungsprozess und die Produktion von kleinen Fragmenten durch mechanische Einwirkungen ist verhältnismäßig gering. BAW-Beutel hingegen sind entwickelt worden, um in der Kompostierung zu kleinen Fragmenten zu zerfallen und sich abzubauen. Allerdings konnten die untersuchten BAW-Beutel in allen drei Anlagentypen entdeckt und BAW-Mikrokunststofffragmente < 1mm nachgewiesen werden. Diese verbleiben dort und könnten beim Ausbringen des fertigen Kompostes in die Umwelt gelangen.

- 5) *Hat der Anlagentyp und die Witterung einen Einfluss auf den Zerfallsprozess von BAW-Beuteln?*

Ja. Die Zeitpunkte, an denen weniger große Fragmente und mehr kleine Fragmente in der Stoffstromanalyse aufgezeichnet wurden, variierten. Die genauen Parameter, die den Zerfall der BAW-Beutel begünstigen, wurden im Rahmen des BabbA Projektes nicht im Detail erfasst. Allerdings ist bezeichnend, dass in der reinen Kompostieranlage im Winter am Ende der Kompostierung noch vollständige Standard BAW-Beutel, bzw. große Fragmente davon, im Siebüberlauf gefunden wurden, während dies im Sommer nicht der Fall war. Dort wo die dünnwandigeren Hemdchenbeutel eingesetzt wurden,

wurden kaum BAW-Fragmente im Siebüberlauf gefunden, was darauf hindeutet, dass neben den Bedingungen in den Anlagen und neben der Witterung auch das Design der BAW-Beutel einen Einfluss auf die Fragmentierung hat.

4.2 Laborexperimente zur Untersuchung des Abbauverhaltens

In den ersten Laborversuchen wurde von jedem, in den technischen Anlagen eingesetzten Beutel jeweils 12 Stück im Laborkompostierer auf Zerfall und Bioabbaubarkeit hin untersucht. Es wurde das Mater-Bi Biosackerl und der ecovio®-Beutel in einem Kompostansatz und der Mater-Bi Standardbeutel mit dem Papierbeutel in einem parallellaufenden Kompostansatz zusammen nach Kapitel 3.5 und oben beschriebenen Verfahren kompostiert.



Abbildung 38: Darstellung der Kompostierung und der Beutelfragmente nach einer sechswöchigen Kompostierung. a) Kompostierer; b) ecovio®-Tragebeutel; c) Mater-Bi® (Biosackerl); d) Mater-Bi® (Standard)

Wie in Abbildung 38 dargestellt, konnten vom Mater-Bi® (Biosackerl) nach 6 Wochen Kompostierung, nur noch einzelne Fragmente gefunden werden, vom Papierbeutel waren keine Fragmente mehr auffindbar. Dagegen war der ecovio®-Beutel (Standard) nur teilweise angegriffen und selbst der Aufdruck war noch gut lesbar. Der Mater-Bi®-Beutel (Standard) war deutlich stärker desintegriert als der ecovio®-Beutel. Die ersten Ergebnisse zeigen auf, dass das Desintegrationsverhalten der Beutel unterschiedlich ist. Der Abbau konnte nicht

untersucht werden. Auch können die Ergebnisse ein Hinweis darauf sein, dass die im Siebüberlauf der Anlage 1 und 2 gefundenen BAWs nicht nur von den „Randgebieten“ der Miete stammen. Hierzu sind weitere Untersuchungen, vor allem an realen technischen Anlagen notwendig.

4.3 Abschätzung des Abbauverhaltens von BAW-Materialien im Boden

4.3.1 Abbaubarkeit

Kompostiertes ecovio® aus der Sommercharge 2021 mit Vorbehandlung in der Anlage 1 wurde innerhalb von 145 Tagen im Boden in standardisierten Labortests zu 25% mineralisiert und wies damit einen deutlich höheren Mineralisierungsgrad auf als unbehandeltes ecovio®, das im Vergleich dazu nur einen Mineralisierungsgrad von 5 % erreichte (Abbildung 39). Die Mineralisierungsdynamik des kompostierten ecovio®s verlief innerhalb der ersten 70 Tage des Versuchs analog zum biologisch sehr gut abbaubaren Referenzpolymer PHB. Beide Polymere wiesen nach 70 Tagen eine Mineralisierung von etwa 13% auf. Während das kompostierte ecovio® danach mit nahezu konstanter Rate mineralisiert wurde, stieg die Mineralisierungsrate des Referenzpolymers PHB deutlich an, so dass nach 145 Tagen 46 % PHB und damit deutlich mehr als ecovio® mineralisiert wurde. In den ersten 30 Tagen wurden die wachsbeschichteten Papierbeutel im Vergleich zu allen anderen Materialien am schnellsten mineralisiert. Anschließend verlangsamte sich die Mineralisierung und nach 145 Tagen wurden die Papiertüten zu 43 % mineralisiert. LDPE wurde erwartungsgemäß innerhalb von 145 Tagen nicht mineralisiert.

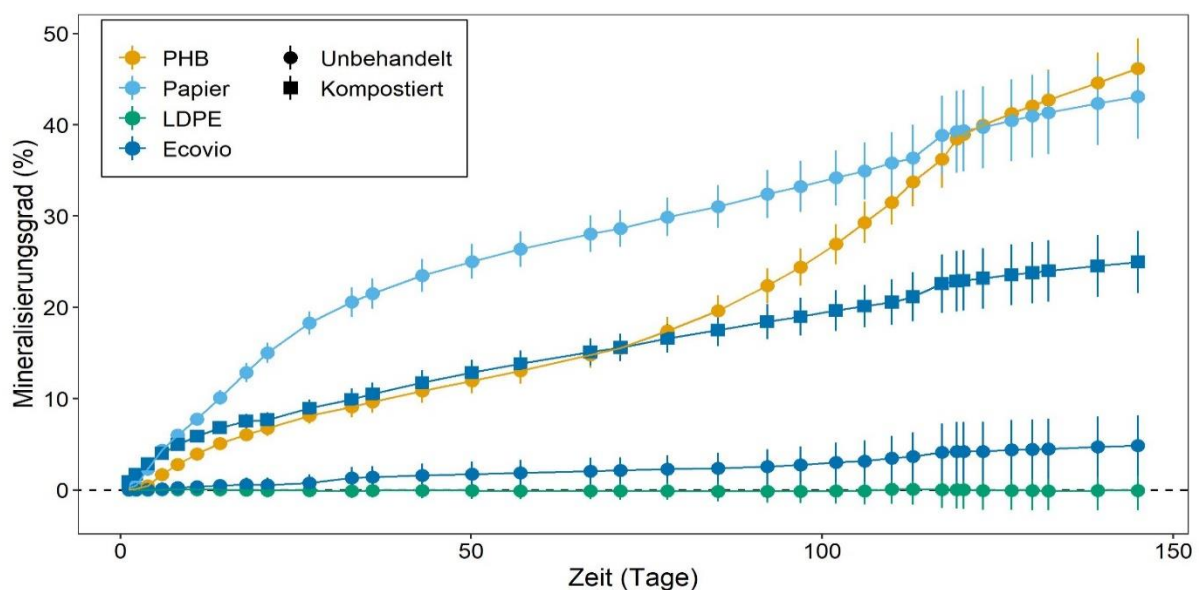


Abbildung 39: Abbauersuch Sommercharge 2021.

Anmerkung: Zeitlicher Verlauf der Mineralisierung der Prüfmaterien im Boden bei optimaler Bodenfeuchte und -temperatur. Mittelwerte: $n = 2$ für PHB, Papier und LDPE; $n=3$ für ecovio® und ecovio®|komp. Die Fehlerbalken zeigen 95% Konfidenzintervalle

Kompostiertes ecovio® aus der Wintercharge 2022 mit Vorbehandlung in der Anlage 1 (reine Kompostierung) wurde innerhalb von 86 Tagen in standardisierten Labortests zu 15 % mineralisiert (Abbildung 40). Die Mineralisierung des Materials ist vergleichbar für Sommercharge und Wintercharge. Nach 85 Tagen wurden aus der Sommercharge 17,5 % des kompostierten ecovio® mineralisiert (Abbildung 39). Analog zum Sommerchargenversuch wurde unbehandeltes ecovio® im Winterchargenversuch nicht mineralisiert, der ermittelte Mineralisierungsgrad von 2,6 % nach 86 Tagen unterschied sich nicht signifikant von Null (Einstichproben-t-Test, $p = 0.259$). Die biologische Vorbehandlung wirkte sich auf die Mineralisierung des Mater-Bi® (Standard) im Boden nur geringfügig aus. Das kompostierte BAW-Material war nach 86 Tagen zu 12 %, das unbehandelte Mater-Bi® zu 14 % mineralisiert. Die Mineralisierung der beiden Mater-Bi®-Materialien war damit vergleichbar zu der des kompostierten ecovio® mit Vorbehandlung. Mit biologischer Vorbehandlung in der Anlage 2 wurden kompostiertes ecovio® und Mater-Bi® am wenigsten mineralisiert (5-9 % nach 73 Tagen), was höchstwahrscheinlich auf den geringeren C-Gehalt (Tabelle 7) und den höheren Zersetzungsgrad im Vergleich zu den anderen Materialien zurückzuführen ist (Abbildung 40). Die Mineralisierung des wachsbeschichteten Papiers in standardisierten Labortests war in beiden Abbauversuchen vergleichbar: 31 % und 33% nach 86 Tagen im Versuch mit der Sommercharge bzw. mit der Wintercharge. Beim Referenzpolymer PHB zeigten sich Unterschiede in der Mineralisierungsdynamik. Im Winterchargenversuch setzte auf eine vergleichbare Anfangsphase, die zweite schnellere Mineralisierungsphase etwas früher ein, so dass im Winterchargenversuch nach 86 Tagen PHB bereits zu 35 % mineralisiert wurde, im Vergleich zu 20 % im Sommerchargen-Versuch.

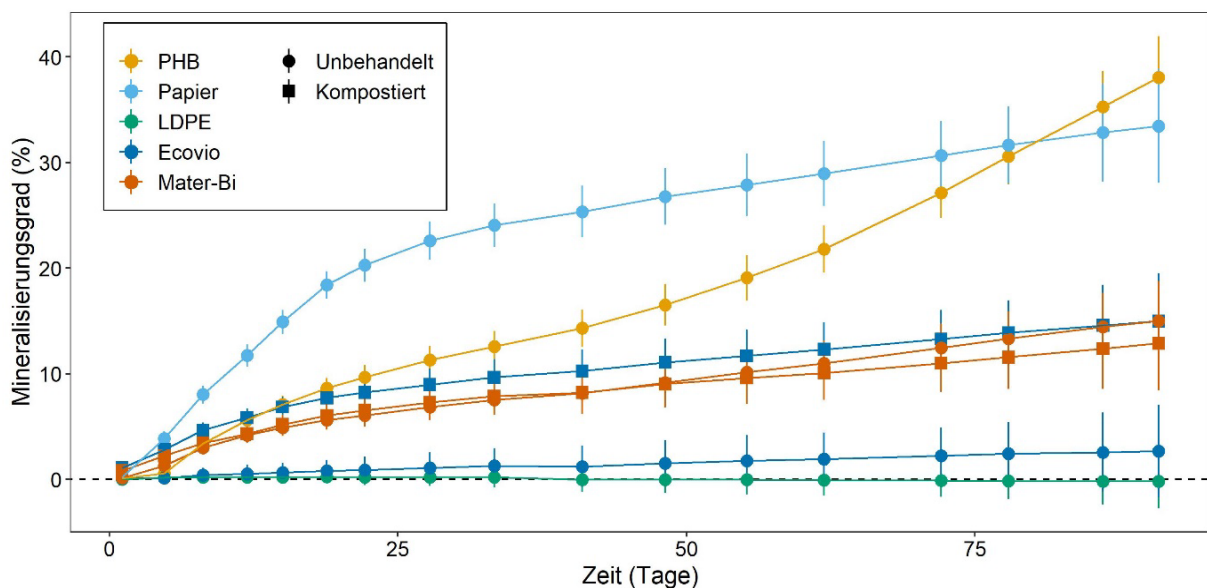


Abbildung 40: Abbauversuch Wintercharge 2022

Anmerkung: Zeitlicher Verlauf der Mineralisierung der Prüfmaterialien im Boden bei optimaler Bodenfeuchte und -temperatur. Mittelwerte: $n=3$ für alle Varianten, nur $n=2$ für kompostiertes Mater-Bi® mit Vorbehandlung in der Anlage 2). Die Fehlerbalken zeigen 95% Konfidenzintervalle.

4.3.2 Auswirkungen von BAW-Sammelbeuteln auf Enzymaktivitäten im Boden

Im Vergleich zur Kontrolle war die Aktivität des Enzyms Lipase im Boden nach Zugabe von kompostiertem ecovio® (Anlage 1) um 177 % ($p < 0,001$) und nach Zugabe des unbehandelten ecovio® um 68 % ($p < 0,001$) erhöht (Abbildung 41). Die mittlere Lipaseaktivität des Bodens mit kompostiertem ecovio® lag zwar deutlich höher ($+3600 \text{ nmol}^{-1} \text{ g h}^{-1}$) als mit unbehandeltem ecovio®. Allerdings war dieser Unterschied aufgrund der hohen Varianz in den Messdaten nicht signifikant ($p = 0.145$). PHB-versetzter Boden zeigte eine um 44 % erhöhte Lipaseaktivität im Vergleich zur Kontrolle ($p < 0,001$). Die signifikant höheren Lipaseaktivitäten im Boden des kompostierten und unbehandelten ecovio® und des PHB deuten auf eine enzymatisch katalysierte Hydrolyse der Esterverbindungen dieser Polymere und ihre Depolymerisierung im Boden hin (Schöpfer, Schnepf, et al., 2022; Zumstein et al., 2017).

Die Aktivität des Enzyms N-Acetyl-Glucosaminidase war im PHB-behandelten Boden um 75 % ($p < 0.01$) gegenüber der Kontrolle erhöht (Abbildung 41). Noch höher war die mittlere N-Acetyl-Glucosaminidase-Aktivität im Boden, der wachsbeschichtete Papierbeutel enthielt ($+104$ % im Vergleich zur Kontrolle). Allerdings war dieser Effekt aufgrund großer Unterschiede der beiden Replikate in der Behandlungsgruppe der Papierbeutel nicht signifikant. Die Erhöhung der N-Acetyl-Glucosaminidase-Aktivität könnte auf die erhöhte Abundanz von Pilzen nach Zugabe von PHB und Papier im Boden zurückzuführen sein (Maillard et al., 2018).

Boden mit Zugabe von unbehandeltem ecovio® zeigte eine um 51 % signifikant höhere β -Glucosidase-Aktivität im Vergleich zur Kontrolle ($p < 0.01$). Boden mit PHB und Papierbeuteln wies zwar einen größeren Effekt auf ($+151$ und $+87$ %). Aufgrund von hohen Varianzen in den Behandlungsgruppen, war dieser Unterschied aber nicht signifikant.

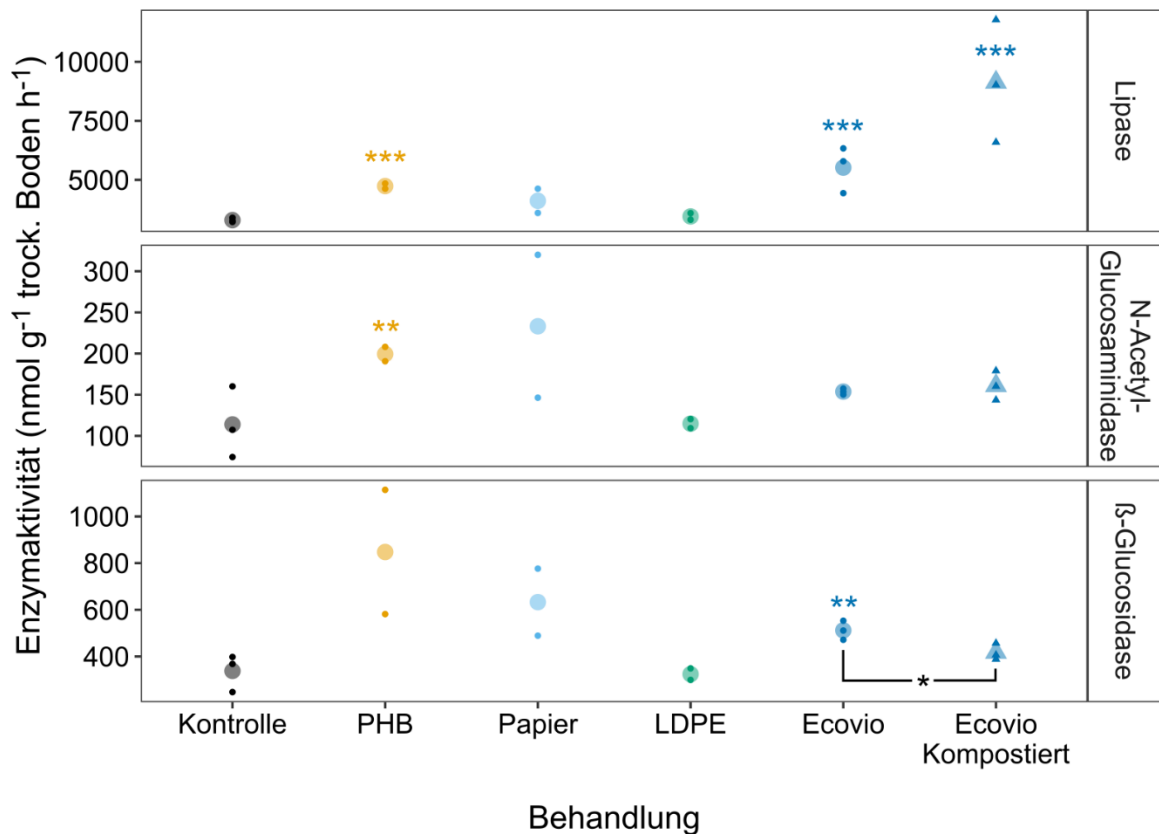


Abbildung 41: Abbaueversuch Sommercharge 2021 Enzymaktivität

Anmerkung: Mikrobielle Enzymaktivitäten im Boden am Ende des Versuchs nach 86 Tagen. Mittelwerte und Einzelwerte der Replikate: $n = 3$ für die Kontrollgruppe, ecovio® und kompostiertes ecovio® nach biologischer Vorbehandlung in der Anlage 1; $n = 2$ für PHB, Papier und LDPE. Statistisch signifikante Unterschiede im Vergleich zur Kontrolle (unbehandelter Boden) sind in der jeweiligen Farbe der Behandlungsgruppen kodiert. Der schwarze Stern kennzeichnet einen signifikanten Unterschied zwischen unbehandeltem und kompostiertem ecovio®. Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ und *** $p < 0,001$.

4.3.3 Fazit

Die beiden untersuchten BAW-Materialien ecovio® und Mater-Bi® wurden im Boden unter standardisierten Labortests im Untersuchungszeitraum von 145 bzw. 86 Tagen teilweise mineralisiert. Dabei wurde ecovio® mit biologischer Vorbehandlung und Kompostierung signifikant schneller als unbehandeltes ecovio® umgesetzt. Mit biologischer Vorbehandlung ist die Mineralisierung von ecovio® und Mater-Bi® im Boden vergleichbar und erreichte innerhalb von etwa 5 Monaten bis zu 25% bei optimaler Bodenfeuchte und -temperatur. Im Vergleich dazu wurden über den gleichen Zeitraum wachsbeschichtete Papiertüten und das Referenzpolymer deutlich stärker mineralisiert (bis zu 46%). Die Art der biologischen Vorbehandlung beeinflusste die Abbaubarkeit der BAW-Materialien. Im Vergleich zur Kompostierung (Anlage 1) führte die Vergärung mit anschließender Kompostierung (Anlage 2) zu stärker zersetztem BAW-Material und in der Folge zu einer etwas geringeren Mineralisierung im Boden. Dieser Befund deutet darauf hin, dass die Mineralisierbarkeit des

inhomogenen BAW-Materials mit zunehmendem Zersetzungsgrad in der Anlage abnimmt, weil der relative Anteil schlechter abbaubarer Bestandteile des BAW-Materials (z.B. kristalline Strukturen) während der Zersetzung zunimmt. Die Enzymanalysen im Boden unterstützen die Mineralisierungsbefunde und deuten darauf hin, dass Bodenmikroorganismen BAW-Sammelmedien nach enzymatisch katalysierter Depolymerisierung als Wachstumssubstrat nutzen können.

Unter Feldbedingungen ist aufgrund von Abbaulimitierungen durch suboptimale Bodenfeuchte und -temperatur eine deutlich geringere Mineralisierung der prozessierten BAW-Materialien Mater-Bi® und ecovio® als die unter Laborbedingungen festgestellte Mineralisierung von bis zu 25% innerhalb von 5 Monaten zu erwarten. Insgesamt ist davon auszugehen, dass mit Komposten in Agrarökosysteme eingebrachtes Mater-Bi® und ecovio® über einen längeren Zeitraum im Boden verbleibt. Der Eintrag der beiden untersuchten BAW-Materialien sollte deshalb zur Vermeidung von Umweltbelastungen im Rahmen des Vorsorgeprinzips weitestmöglich begrenzt werden, auch wenn im Rahmen dieser Studie keine negativen Auswirkungen auf das Bodenmikrobiom festgestellt wurden.

4.4 Öffentlichkeitsarbeit/ Ergebnisse der Umfragekampagne

4.4.1 Umfragekampagne - Sommersversuch

Wie in Tabelle 10 dargestellt, war im Sommersversuch der Rücklauf der Umfragebögen in Gerlingen mit knapp 20 % am höchsten, bei Steinheim und Markgröningen dagegen sehr gering. Das gleiche wurde auch bei der Beutelanzahl in dem angelieferten Biogut beobachtet.

Tabelle 10: Darstellung der an die Haushalte verteilten Umfragen und der Rücklauf - Sommersversuch

	Steinheim	Gerlingen	Markgröningen
Haushalte insgesamt	5.133	7.700	6.643
An Haushalte verteilt	1.027	1.540	1.329
Rücklauf insgesamt	64	298	43
Rücklauf Online	7	38	1
Rücklauf postalisch	57	260	42

Die Frage, ob die Bürger*innen den Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffbeuteln für sinnvoll halten, ergab bei Zusammenfassung der Ergebnisse aus Markgröningen und Gerlingen, dass 66 % den Einsatz für sinnvoll erachten, 32 % für nicht sinnvoll. Als Gründe für den Einsatz von BAW-Beutel gaben die Befragten an, dass es mit diesem sauber und hygienischer sei den Bioabfall zu sammeln, der Beutel wasserdicht ist, gut für die Umwelt, einfache Handhabung ermöglicht und Gerüche vermindert. Gegen die BAW-Beutel wurde angeführt, dass Zeitungspapier zum Sammeln ausreichend sei. Zusätzlich wurden grundsätzliche Zweifel an der Abbaubarkeit geäußert.

Von den Befragten in Steinheim (Papierbeutel) fanden 76 % den Einsatz von Papierbeuteln sinnvoll, 22 % dagegen nicht. Vor allem wurde hier positiv die Sauberkeit und dadurch verbesserte Hygiene in der Sammlung angegeben, dass der Papierbeutel als umweltfreundlich gilt und dieser einfach zu handhaben sei. Als Grund dagegen wurde aufgeführt, dass Zeitungspapier ausreichend sei und dass die Beutel durchweichen und dadurch die Sauberkeit vermindert werde.

4.4.2 Umfragekampagne – Winterversuch

Der Rücklauf beim Winterversuch war bei Steinheim fast doppelt so hoch wie beim Sommersversuch (Tabelle 11). Außerdem wurden für eine bessere Vergleichbarkeit der Daten Gerlingen und Markgröningen zusammengefasst, da hier Mater-Bi® Beutel ausgeteilt wurden.

Tabelle 11: Darstellung der an die Haushalte verteilten Umfragen und der Rücklauf - Winterversuch

	Steinheim	Gerlingen/Markgröningen	GOA
Haushalte insgesamt	5.133	14.343	13.003
An Haushalte verteilt	1.027	2.869	2.600
Rücklauf insgesamt	112	367	501
Rücklauf Online	16	38	452
Rücklauf postalisch	106	329	49

Den Einsatz von biologisch abbaubaren Beuteln halten aus der Region GOA 95 % der Befragten für sinnvoll, bei Gerlingen/Markgröningen 67 %, der Einsatz von Papierbeuteln wurde bei Steinheim von 75 % der Befragten für sinnvoll gehalten. Stimmen, die dagegen waren, gaben zum Ausdruck, dass Zeitungspapier oder ähnliches ausreichend sei, und es gibt Zweifel an der Abbaubarkeit der BAW-Beutel.

Auch, ob die Bürger*innen die Beutel weiterverwenden wollen, stimmten bei der GOA 82 %, bei Gerlingen/Markgröningen 88 % und bei Steinheim 89 % für ja. Die Gründe für die Stimmen dagegen waren, dass man selbst kompostiert oder der Preis stimmen sollte.

Die Teilnehmer*innen wurden nach ihrer Meinung zur Reißfestigkeit, Dichtheit und Hygiene bei der Sammlung der Bioabfallbeutel befragt. Sie konnten auf einer Skala von 1 bis 6 Noten verteilen, wobei „1“ für sehr gut und „6“ für ungenügend steht (Tabelle 12).

Tabelle 12: Qualitätsbewertung der Beutel, Angabe der Mittelwerte

	Steinheim	Gerlingen/Markgröningen	GOA
Reißfestigkeit	2,6	1,7	2,0
Dichtheit	2,8	1,8	2,2
Hygiene bei der Sammlung	2,4	1,6	2,0

Hierbei ist ersichtlich, dass die Mater-Bi®-Beutel sehr gut abgeschlossen haben, gefolgt vom ecovio®-Beutel. Am schlechtesten wurden die Papierbeutel bewertet.

Auf die Frage ob das Sammelverhalten sich nach der Praxisphase verändert habe, gaben bei Gerlingen/Markgröningen 76 % an, dass keine Veränderung stattgefunden habe, bei Steinheim waren es 69 %.

Insgesamt ist zusammenzufassen, dass die Bürger*innen, trotz geringer Zweifel und Unzufriedenheit, dem Einsatz von BAW-Beutel positiv gegenüberstehen. Nichtsdestotrotz hat der Einsatz der BAW- und Papierbeutel während des Projektes nicht unbedingt das Sammelverhalten der Bürger*innen in Bezug auf den Fremdstoffanteil im Bioabfall beeinflusst.

5. Handlungsempfehlungen.

1) Die Versuche im Projekt BabbA zeigten, dass große Mengen an PBAT-Fragmenten < 1 mm in den Komposten vorhanden sein können. Die Ergebnisse deuten zudem darauf hin, dass kompostierte BAW-Fragmente über längere Zeiträume im Boden verbleiben. Mit einer Anreicherung von BAW-Mikrokunststoffen im Boden können negative Auswirkungen auf Bodenfunktionen nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der im BabbA-Projekt erhobenen Daten wird empfohlen, auf die Einbringung von BAW-Sammelbeuteln in technische Bioabfallverwertungsanlagen zu verzichten, solange kein vollständiger Abbau (Abbau = Umsetzung zu CO_2 , Wasser, Salze und Biomasse) innerhalb der Anlagen gewährleistet werden kann. Für eine umfassende Bewertung sollten weitere Versuche in realen Anlagen durchgeführt werden.

2) Die im Projekt durchgeführte Umfrage zeigte, dass der Einsatz von BAW- und Papiersammelbeuteln keine Verbesserung auf das Sammelverhalten der Bürger, insbesondere keine Erhöhung der gesammelten Bioabfallmenge bewirkt. Die Chargenanalyse zeigte keine Verminderung des Fremdstoffgehaltes. Der Einsatz von BAW- und Papiersammelbeuteln zur Erhöhung der gesammelten Bioabfallmenge oder zur Verminderung des Fremdstoffgehaltes ist aufgrund der vorliegenden Daten daher derzeit nicht zu empfehlen.

3) Gemäß ihrer Zertifizierung halten die untersuchten kompostierbaren Produkte die Vorgaben für die aktuellen Normen zur Kompostierbarkeit ein. Die Ergebnisse der BabbA-Studie - insbesondere der Nachweis von hohen Mengen an BAW-Fragmenten < 1 mm in den Komposten - lassen allerdings Zweifel daran aufkommen, ob die aktuellen Normen zur Kompostierbarkeit ausreichend sind und die realen Bedingungen innerhalb der Bioabfallverwertungsanlagen abbilden. Die in der DIN-Norm aufgezeigten Parameter für die technische Bioabfallverwertung erscheinen unrealistisch, da aus ökonomischer Sicht in technischen Anlagen keine 12 Wochen, bzw. 6 Monate, kompostiert werden kann. Darüber hinaus sollten BAW-Materialien in Zukunft in einem einzigen Versuch auf Abbau und Desintegration untersucht werden, und nicht wie aktuell, in zwei voneinander unabhängigen Versuchen. Der Abbau sollte zusätzlich unter den Bedingungen in unterschiedlichen realen technischen Anlagen bestätigt werden. Aufgrund der Projektergebnisse wird eine kritische Revision der aktuellen Normen für die Zertifizierung eines „kompostierbaren“ Produktes empfohlen. Letztendlich liegt hier die Verantwortung für die Abbaubarkeit der zertifizierten BAW-Beutel explizit nicht bei den Bioabfallverwertungsanlagen, sondern bei den Herstellern.

4) In den Sammelgebieten, wo die öffentlich-rechtlichen Entsorger BAW-Sammelbeutel in ihrer Abfallsatzung zugelassen haben, sollten die Komposte und Siebüberläufe auf den Verbleib von BAW-Fragmenten untersucht werden. Dies schließt Partikel < 1 mm ein. Auf Basis der

aufgezeigten Ergebnisse sollte eine Revision der Zulassung bzgl. des Eintrags von BAW-Beuteln in diesen Anlagen diskutiert werden.

5) Die Projektergebnisse legen nahe, dass bei der Erfassung der Qualität des Bioabfalls BAW-Sammelbeutel in Zukunft bei Chargenanalysen als „Fremdstoffe“ erfasst werden sollten, da ihre vollständige Abbaubarkeit in den Versuchen in realen Anlagen nicht bestätigt werden konnte. Zudem sollten die Fremdstoffe nicht nur auf die Feuchtmasse, sondern auch auf die Trockenmasse bezogen werden, um die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Studien zu ermöglichen.

6) Um die Möglichkeit einer Verunreinigung von Komposten durch BAW-Fragmente in Bewusstsein der Bürger zu tragen, bieten sich konkrete Maßnahmen in der Aufklärung und Öffentlichkeitsarbeit an – sei es über die Schulbildung oder über Info- und Werbeaktionen. Es wird erwartet, dass mit zunehmendem Bewusstsein über das Potential und den Mehrwert der biologischen Abfallbehandlung auch eine zunehmende Bereitschaft in der Bevölkerung generiert wird, die Bioabfallsammlung fremdstofffrei zu gestalten.

7) Da die Novelle der Bioabfallverordnung u.a. einen max. Grenzwert für den Kunststoffgehalt vor der ersten biologischen Stufe von $< 1\%$ fordert, ist für die meisten Anlagenbetreiber eine Aufbereitung in Form einer Absiebung und vorheriger Zerkleinerung notwendig. Der Siebüberlauf, welcher hierbei entsteht, also auch die abgesiebten BAW-Sammelbeutel, müssen dann thermisch verwertet werden, da diese nicht von den herkömmlichen Kunststoff-Beuteln differenziert werden können. Dies führt zu zusätzlichen Kosten für die Anlagenbetreiber und zu einem Austrag von biologischem Material mit den BAW-Sammelbeuteln, wodurch letztendlich wiederum der Biogasertrag und die Kompostmenge reduziert wird. Deshalb sollte der Kunststoffeintrag (inkl. BAW-Materialien) auf ein Minimum begrenzt werden.

6. Diskussion

Die Ergebnisse, die innerhalb des Projektes BabbA erzielt wurden, bestätigen Resultate aus vorherigen wissenschaftlichen Publikationen, die über die Einflüsse der Anlagentechnik auf die Generierung von Mikrokunststoffen und den Verbleib von BAWs in Fertigkomposten berichten (Steiner, Möller, et al., 2022; Steiner, Zhang, et al., 2022). Innerhalb der umfassenden Untersuchungen in BabbA wurden BAW-Partikel im Fertigkompost gefunden, sowohl in der Größenklasse > 1 mm als auch in der Größenklasse < 1 mm. Ob die Fragmentierung großteils über biologisch und/oder physiko-chemisch Prozesse, oder mechanisch (Gewichtung) verläuft, kann aus den vorliegenden Daten nicht eruiert werden. In den oben genannten Publikationen wurden auch die Materialeigenschaften der im Fertigkompost verbliebenen BAWs untersucht. Hier zeigte sich, dass diese kristallinen Strukturen in einem Anteil von bis zu 55 % aufwiesen. Dagegen zeigten zehn unterschiedliche DIN EN 13432 zertifizierte Beutel aus dem Supermarkt nur einen kristallinen Anteil von maximal 15 %. Materialien mit hohen kristallinen Anteilen gelten als schlecht abbaubar, da Kristallstrukturen aufgrund ihrer Stabilität sehr schwer zu spalten sind (Weng et al., 2013). Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede im Kristallinitätsgrad von fabrikneuen und kompostierten BAW-Beuteln ist, dass während der biologischen Prozessierung vorwiegend die amorphen Bereiche der BAW-Beutel abgebaut werden. Zudem ist es möglich, dass die Kristallinität sich aufgrund der Prozessbedingungen verändert, da vor allem Prozesse bei denen Erwärmung und Abkühlung stattfindet, Kristallstrukturen von Kunststoffen beeinflussen können. Aber auch andere mechanische, physikalische und chemische Einflussfaktoren, die sich auf den Kristallinitätsgrad der BAW-Materialien während des Aufenthalts in den Bioabfallverwertungsanlagen auswirken, sind nicht auszuschließen. Diese Aspekte sollten in Zukunft unbedingt näher untersucht werden.

Innerhalb des Projektes war festzustellen, dass die Versuchsbedingungen in den Normen, nach denen die BAWs geprüft und zertifiziert werden zum Teil stark von den realen Bedingungen während der Behandlung in Bioabfallverwertungsanlagen abweichen. Die Vorgabe der DIN EN 13432 und 14995 ist, dass nach 12 Wochen 90 % der zu untersuchenden BAWs in Partikel kleiner 2 mm zerfallen sein müssen um als kompostierbar zu gelten. Reale Anlagen kompostieren bis zu einem Rottegrad von IV – V und dieser ist z.B. bei Anlage 1 (reine Kompostierung) bereits nach 7 Wochen erreicht, bei den beiden anderen Anlagen (Vergärung mit anschließender Kompostierung) bereits nach 6 Wochen oder früher. Es gibt hier sowohl aus Sicht der Rottegradvorgaben als auch aus kaufmännischer Sicht für die Betreiber keinen Grund länger zu kompostieren, was die Sinnhaftigkeit der 12-Wochen-Kompostierung in den DIN-Normen in Fragen stellt. Die Untersuchung der biologischen Abbauarbeit von Materialien ist in der DIN EN ISO 14855 geregelt. Hier ist sogar eine Zeitspanne, wie in der DIN EN 13432 auch, von bis zu 6 Monaten angegeben. Alle Normen

geben Untersuchungsbedingungen vor, welche in der Realität bei den technischen Anlagen in der Regel nicht eingehalten werden, sei es aufgrund der unterschiedlichen Anlagentechniken (Vergärung mit Kompostierung oder reine Kompostierung), Umgebungstemperaturen, jahreszeitlichen Witterungsbedingungen oder aufgrund der Substratzusammensetzung an sich – im Winter mehr Speisereste, im Sommer mehr Grünschnitt. Dies hat alles einen Einfluss auf die mikrobielle Zusammensetzung und Aktivität. Letztendlich müssen die erforderlichen Normen auf die in der Realität vorhandenen Bedingungen in den Anlagen angepasst werden, um eine vollständige Abbaubarkeit zu garantieren, denn es ist bislang noch ungeklärt, wie lange BAW-Partikel in der Umwelt verbleiben, bis sie vollkommen abgebaut sind. Unklar ist weiterhin, welche Folgen die Abbauprodukte für die Umwelt haben könnten, sollten sie mit dem Kompost in die Umwelt eingebracht werden. So gibt es mittlerweile wissenschaftliche Hinweise, dass DIN EN 13432 zertifizierte, allerdings fabrikneue, BAWs in der Umwelt über einen Zeitraum von 3 Jahren nicht (vollständig) abgebaut wurden (Napper & Thompson, 2019). Auch negative Auswirkungen von 0,1% (m/m) an BAWs (PLA) im Boden auf das Wachstum von Gras (*Lolium perenne*) wurden beobachtet (Boots et al., 2019). Schöpfer et al., 2022 konnten allerdings im Feldversuch mit Konzentration von 20 kg/ha eines PLA/PBAT-Blends keine Einflüsse auf den Ernteertrag von Mais und Sommergerste erkennen. Auch zeigt eine vor kurzem erschienene Studie auf, dass die Bodenbeschaffenheit entscheidend für das Verhalten von BAW-Materialien im Boden ist, da es hier zu unterschiedlichen Effekten, wie CO₂-Emissionen oder Änderung der Zusammensetzung der Biomasse im Boden, kommen kann (Rauscher et al., 2023). Diese Beispiele zeigen, dass in Bezug auf das Verhalten von BAW-Materialien in der Umwelt und auf Ihre ökologischen Auswirkungen noch viel Forschungsarbeit nötig ist. Jedoch sollte im Sinne des Vorsorgeprinzips zur Risikovermeidung sichergestellt sein, dass sich BAW-Beutel bereits im Kompost vollständig abbauen, damit sie nicht in die Umwelt gelangen.

7. Quellenverzeichnis

- Boots, B., Russell, C., & Green, D. (2019). Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology*, 53. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- DIN EN ISO 17556. (2019). DIN EN ISO 17556:2019-09, Kunststoffe - Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden durch Messung des Sauerstoffbedarfs in einem Respirometer oder der Menge des entstandenen Kohlendioxids (ISO_17556:2019); Deutsche Fassung EN_ISO_17556:2019. Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO/TS 22939. (2011). Soil quality—Measurement of enzyme activity patterns in soil samples using fluorogenic substrates in micro-well plates. Beuth Verlag GmbH.
- Kehres, B., Bundesgütegemeinschaft Kompost (2006). Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate.
- Maillard, F., Didion, M., Fauchery, L., Bach, C., & Buée, M. (2018). N-Acetylglucosaminidase activity, a functional trait of chitin degradation, is regulated differentially within two orders of ectomycorrhizal fungi: Boletales and Agaricales. *Mycorrhiza*, 28(4), 391–397.
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2019). Environmental Deterioration of Biodegradable, Oxo-biodegradable, Compostable, and Conventional Plastic Carrier Bags in the Sea, Soil, and Open-Air Over a 3-Year Period. *Environmental Science & Technology*, 53(9), 4775–4783. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06984>
- Rauscher, A., Meyer, N., Jakobs, A., Bartnick, R., Lueders, T., & Lehndorff, E. (2023). Biodegradable microplastic increases CO₂ emission and alters microbial biomass and bacterial community composition in different soil types. *Applied Soil Ecology*, 182, 104714. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104714>
- Schöpfer, L., Möller, J. N., Steiner, T., Schnepf, U., Marhan, S., Resch, J., Bayha, A., Löder, M. G. J., Freitag, R., Brümmer, F., Laforsch, C., Streck, T., Forberger, J., Kranert, M., Kandeler, E., & Pagel, H. (2022). Microplastics persist in an arable soil but do not affect soil microbial biomass, enzyme activities, and crop yield. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *jpln.202200062*.
- Schöpfer, L., Schnepf, U., Marhan, S., Brümmer, F., Kandeler, E., & Pagel, H. (2022). Hydrolyzable microplastics in soil—Low biodegradation but formation of a specific microbial habitat? *Biology and Fertility of Soils*, 58(4), 471–486.
- Steiner, T., Möller, J. N., Löder, M. G. J., Hilbrig, F., Laforsch, C., & Freitag, R. (2022). Microplastic Contamination of Composts and Liquid Fertilizers from Municipal Biowaste Treatment Plants: Effects of the Operating Conditions. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01870-2>
- Steiner, T., Zhang, Y., Möller, J. N., Agarwal, S., Löder, M. G. J., Greiner, A., Laforsch, C., & Freitag, R. (2022). Municipal biowaste treatment plants contribute to the contamination of the environment with residues of biodegradable plastics with putative higher persistence potential. *Scientific Reports*, 12(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12912-z>
- Weng, Y.-X., Jin, Y.-J., Meng, Q.-Y., Wang, L., Zhang, M., & Wang, Y.-Z. (2013). Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. *Polymer Testing*, 32(5), 918–926. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.05.001>
- Zumstein, M. T., Rechsteiner, D., Roduner, N., Perz, V., Ribitsch, D., Guebitz, G. M., Kohler, H.-P. E., McNeill, K., & Sander, M. (2017). Enzymatic Hydrolysis of Polyester Thin Films at the Nanoscale: Effects of Polyester Structure and Enzyme Active-Site Accessibility. *Environmental Science & Technology*, 51(13), 7476–7485.