

Verfahren zur Separation von Asphalt aus natürlicher Mineralik

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt

DBU-Aktenzeichen: 38222/01

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Bewilligungsempfänger:

Zwisler GmbH – Biggenmoos 55, 88069 Tett nang

Verfasser/in:

Christine Schuhmair, Umweltingenieurin, Zwisler GmbH

Marco Haas, Projektmanager (bei Zwisler GmbH bis 10/25)

Projektlaufzeit: 03/2022 bis 03/2026

Tett nang, März 2026

Inhalt

1. Zusammenfassung zum Verfahren zur Separation von Asphalt aus natürlicher Mineralik.....	1
2. Einleitung	3
2.1 Ressourcenschonung durch nassmechanische Bodenaufbereitung bei der Zwisler GmbH.....	3
2.2 Herkunft teerhaltiger Altlasten.....	3
2.2.1 Verarbeitbare Stoffströme im Überblick.....	4
2.3 Analyse der Situation	4
2.3.1 Quantitative Abschätzung der belasteten Massenströme	6
2.4 Der Weg zum Entwicklungsprojekt	6
3. Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden	8
3.1 Methodik der Prioritätsstufe I.....	8
3.1.1 Betriebseigene Versuchsreihen (Standort Tettngang)	8
3.1.2 Externe Versuchsreihen und Kooperationen	8
3.1.3 Methodik der Sensorevaluation (MFPA Weimar)	9
3.1.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Sortierparameter.....	10
3.2 Methodik der Prioritätsstufe II.....	10
3.2.1 Versuchsreihe und Kooperationen	11
3.2.2 Verfahrensablauf und physikalische Wirkprinzipien der Magnetseparation des <i>AsphaCycle</i> ®-Verfahrens	12
3.2.3 Analyse der Magnetseparation: Trennerfolge in Abhängigkeit von Ölgehalt und Additivtyp	13
4. Ergebnisse	14
4.1 Ergebnis Prio I	14
4.1.1 Ergebnisse betriebseigener Versuchsreihen.....	14
4.1.2 Ergebnisse der Versuchsreihen mit externen Firmen	15
4.1.3 Ergebnis der Sensorevaluation (MFPA Weimar)	17
4.1.4 Ergebnis zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Sortierparameter	18
4.2 Ergebnisse Prio II	19
4.2.1 Ergebnisse der Versuchsreihen mit externen Firmen	19
4.2.2 Ergebnisse der magnetischen Markierung und Separation im Feinkornbereich (0,5 – 16 mm) - <i>AsphaCycle</i> ®-Verfahren	20

4.2.3	Ergebnisse der Magnetseparation: Trennerfolge in Abhängigkeit von Ölgehalt und Additivtyp des <i>AsphaCycle</i> ®-Verfahrens	20
4.3	Diskussion	23
4.4	Bewertung	23
4.5	Öffentlichkeitsarbeit.....	25
4.6	Fazit	25
5.	Anhänge	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schadstoffverteilung des Annahmematerials der Deponie Fischbach	5
Abbildung 2: Erkennungsraten der klassischen Klassifikatoren	17
Abbildung 3: Visuelle Gegenüberstellung von Asphalt und dunkler Mineralik.	18
Abbildung 4: Trennerfolgskurve mit FeSi<125µm als Magnetadditiv.	21
Abbildung 5: Trennerfolgskurve mit MSM<125µm als Magnetadditiv.	22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Versuchsreihen für Korngrößen im Bereich 0-100 mm	9
Tabelle 2: Aufnahmen von Datensatz (Kies, Teer und Bitumen)	9
Tabelle 3: Betrachtung Wirtschaftlichkeit von optischen Sortierern	10
Tabelle 4: Übersicht der Versuchsreihen (Priorität II)	11
Tabelle 5: Ermittlung physikalischer Eigenschaften des firmeneigenen Stoffstromes ...	15
Tabelle 6: Ergebnisse der Maschinenhersteller zu optischer Sortierung (16/32)	16

Abkürzungsverzeichnis

AGS	AGS Anlagen + Verfahren GmbH
AKW	Amberger Kaolin Werke (Apparate und Verfahren GmbH)
AZ	Aktenzeichen
BAM	Bundesamt für Materialforschung
Bauma.....	Weltleitmesse für Baumaschinen, Bergbaumaschinen und Baufahrzeuge
BHS.....	Bayerische Berg-, Hütten- und Salzwerke
BTEX.....	Gruppe flüchtiger, aromatischer Kohlenwasserstoffe (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole)
C10-C40.....	Mischkunststoffe der Fraktion C10-C40 (hochwertig - Gewerbeabfall)
Cc+	Gesteinskörnung aus Beton oder Natursteingranulat (Klasse +: besonders schadstoffarm)
Cyanide ges.	Gesamtcyanid
DACH	Deutschland, Österreich und Schweiz
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DepV	Deponieverordnung
EBV	Ersatzbauverordnung
EOX	extrahierbare organisch gebundene Halogene
FeSi.....	Ferrosilizium
IAB	Institut für angewandte Bauforschung (Weimar)
IFAT	Weltleitmesse für Umwelttechnologien (Wasser, Abwasser, Abfall, Rohstoffe)
LHKW	leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
M.-%	Massenprozent
MFPA.....	Materialforschungs- und Prüfanstalt
MKW C10-C22	Mischkunststoffe der Fraktion C10-C22 (hochwertig - minderwertig)
MSM.....	aufbereitete Magnetschlacke
Nm ³ /h.....	Normkubikmeter pro Stunde
Nm ³ /t	Normkubikmeter pro Tonne

OST Ostschweizer Fachhochschule
PAKpolyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB (7) sieben Indikator-Polychlorierten Biphenyle
Rc+Rezyklierte Gesteinskörnung aus Mischabbruch
.....(Klasse +: besonders schadstoffarm)
RWTH.....Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SMI.....Sortier- und Trenntechnik für die Magnetindustrie
.....(englisch, sorting and separation solutions for the magnetic industry)
t/h Tonne pro Stunde
Tematechnisches Marketing
UMTEC Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik
Z.1.1.....Bodenmaterial der Materialklasse BM-F1 (gemäß EBV), ehemals Z.1.1
Z.1.2.....Bodenmaterial der Materialklasse BM-F2 (gemäß EBV), ehemals Z.1.2
Z.2..... Bodenmaterial der Materialklasse BM-F3 (gemäß EBV), ehemals Z.2

1. Zusammenfassung zum Verfahren zur Separation von Asphalt aus natürlicher Mineralik

Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Ergebnisse des Entwicklungsprojektes „Verfahren zur Separation von Asphalt aus natürlicher Mineralik“, welches die technologische Transformation von der Deponierung kontaminierter Erdaushübe hin zu einer hochwertigen Kreislaufwirtschaft zum Ziel hat. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff Asphalt oft als Synonym für schwarz befestigte Straßenflächen verwendet. Technisch betrachtet bezeichnet er jedoch ein Gemisch aus Gesteinskörnungen und einem Bindemittel (Bitumen). Wurde ein teerhaltiges Bindemittel verwendet, spricht man von „teerhaltigem Straßenbelag“. In diesem Bericht wird mit Asphalt beides gemeint und nur bei Bedarf dezidiert unterschieden. Am Standort der Zwisler GmbH wurde hierfür ein innovatives Verfahren zur automatisierten Separation von Asphaltfragmenten aus mineralischen Stoffströmen validiert.

Problemstellung und Relevanz:

Historisch bedingte anthropogene Einträge, insbesondere PAK (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe)-belastete Teerasphaltreste, führen dazu, dass signifikante Mengen mineralischen Erdaushubs als schadstoffbelastet klassifiziert werden. Allein am Beispiel der Deponie Fischbach (Landkreis Bodenseekreis) fielen in zwei Jahren ca. 85.000 t an. Trotz eines nutzbaren Mineralikanteils von ca. 94 M.-% entzieht die aktuelle Entsorgungspraxis diese wertvollen Ressourcen dem Baustoffkreislauf. Das Projekt adressiert somit die drängende ökologische Notwendigkeit, Primärressourcen zu schonen und Deponieraum zu entlasten.

Methodik und strategische Anpassung:

Die technologische Umsetzung erfolgte in zwei prioritären Entwicklungsstufen:

- **Priorität I:** Der Fokus lag auf der prozesskritischen Detektion und anschließendem Aussortieren von mit Bindemittel behafteten Schadstoffpartikeln, sodass eine unbelastete und verwertbare Kiesfraktion entsteht. Mittels optischer Sortiersysteme gelang der verfahrenstechnische Durchbruch beim Nachweis der optischen Unterscheidbarkeit von unverschmutzter Mineralik gegenüber mit Bitumen/Teer behafteter Mineralik im Grobkornbereich >16mm. Dazu wurden im Projektverlauf neuartige Hochleistungssortierer entwickelt, welche das Material im visuellen und nahen Infrarotbereich scannen und mit Hilfe künstlicher Intelligenz (KI) eine Abscheiderate von Asphaltkörnern von über 90 % ermöglichen. Die erkannten Schadstoffpartikel werden anschließend mittels Druckluft-Ejektion gezielt aus dem Materialstrom ausgeschossen. Diese Sortieranlagen sind mittlerweile kommerziell auf dem Markt verfügbar und bewähren sich im industriellen Einsatz.
- **Priorität II:** Das ursprüngliche Ziel schadstoffhaltiges Teer-Bindemittel von unproblematischem Bitumen-Bindemittel mittels Sensorik unterscheiden und anschließend separieren zu können, wurde aufgrund unergiebigere Ergebnisse im Projektverlauf gestoppt. Dies insbesondere, als dass nach diversen Laborversuchen Prof. Dr. Bunge, Ostschweizer Fachhochschule, die

entscheidende Idee kam, die mit Bindemittel behafteten Asphaltpartikel mittels selektiver Benetzbarkeit von reinen Kiespartikeln zu trennen. Aufgrund der vielversprechenden Laborergebnisse wurden die Projektmittel, welche ursprünglich für die sensorische Teer/Bitumen-Unterscheidung vorgesehen waren, konsequent für die Entwicklung und Validierung dieses neuen, oberflächenphysikalischen Verfahrens eingesetzt. Resultat ist die erstmalige verfahrenstechnische Möglichkeit bindemittelbehaftete Kiespartikel in der Korngröße 0.5 – 16 mm selektiv und mit hoher Wirksamkeit von sauberem Sand/Kies abzutrennen. Das Prinzip ist im Labormaßstab eingehend untersucht und in der Folge von Zwisler GmbH patentiert worden. Nun steht die Entwicklung einer Pilotanlage im Technikumsmaßstab an. Das Verfahren hat das konkrete Potential eine seit langer Zeit bestehende, ökologisch und wirtschaftlich äußerst relevante Lücke in der Sortiertechnik zu schließen.

Zentrale Ergebnisse und ökologische Transformation:

Die Projektergebnisse belegen, dass eine Recyclingquote von ca. 80 M.-% realisierbar ist. Dies bedeutet, dass die ursprünglich vollständig zu deponierende Materialmenge in zwei Teilströme getrennt wird: 80 M.-% des Materials werden so weit von Schadstoffen gereinigt, dass sie als Baustoff wiederverwendet, werden können. Lediglich die verbleibenden 20 M.-% der Masse, in denen die Schadstofffracht nun konzentriert vorliegt, müssen weiterhin deponiert werden. Diese effiziente Massentrennung schont nicht nur wertvolle Primärressourcen, sondern führt gleichzeitig zu einer massiven Entlastung des knappen Deponieraums.

2. Einleitung

Die Bauwirtschaft steht vor der Herausforderung, steigende Abfallmengen bei gleichzeitig schwindenden Primärressourcen und Deponieräumen zu bewältigen. Das folgende Kapitel beleuchtet die aktuelle Situation der regionalen Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Bodenseeregion. Dabei ist begrifflich zwischen dem oberflächennahen, belebten Boden (Ober- und Unterboden) und dem darunterliegenden, mineralischen Aushubmaterial zu unterscheiden. In der Fachwelt und Praxis hat sich hierfür der Begriff der „nassmechanischen Bodenaufbereitung“ (oft auch synonym „Bodenwäsche“) etabliert, selbst wenn technisch gesehen primär das mineralische Aushubmaterial gemeint ist. In der Folge werden die bestehenden Kapazitäten dieser Anlagen den gegenwärtigen Herausforderungen durch anthropogen belastete Stoffströme gegenübergestellt, um die Notwendigkeit für technologische Innovationen abzuleiten.

2.1 Ressourcenschonung durch nassmechanische Bodenaufbereitung bei der Zwisler GmbH

Die Zwisler GmbH (Tettngang), ein seit über einem Jahrhundert regional etabliertes Unternehmen mit circa 150 Mitarbeitern, leistet durch den Betrieb einer nassmechanischen Kies- und Bodenaufbereitungsanlage einen signifikanten Beitrag zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Mit einem jährlichen Durchsatz von circa 100.000 Tonnen forciert das Unternehmen die Transformation vom primären Ressourcenverbrauch hin zur qualifizierten Sekundärrohstoffgewinnung.

Durch die nassmechanische Aufbereitung gelingt es bereits heute, eine Recyclingquote von circa 90 % des mineralischen Abfallstoffstroms zu realisieren und das behandelte Material als Sekundärbaustoff unmittelbar in den regionalen Wirtschaftskreislauf zurückzuführen. Die kontinuierliche Steigerung der Aufbereitungsmengen in den vergangenen Jahren hat maßgeblich zur Schonung der Primärressourcen in der unternehmenseigenen Kiesgrube beigetragen. Gleichzeitig wurde wertvoller Deponieraum entlastet, der nun prioritär für die nicht aufbereitbaren, minderqualitativen Materialien zur Verfügung steht. Darunter fällt derzeit auch noch der mit teerhaltigen Asphaltstücken verunreinigte mineralische Erdaushub.

2.2 Herkunft teerhaltiger Altlasten

Historisch fungierten teerhaltige Bindemittel über ein Jahrhundert als elementare Komponenten im globalen Infrastrukturbau. Aufgrund der Gesundheits- und Umweltrisiken der darin enthaltenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), die, als hochgradig karzinogen und mutagen klassifiziert sind, wurde die Verwendung von Steinkohlenteer im westdeutschen Straßenbau 1984 (in den neuen Bundesländern 1990) verboten. Stattdessen wird seit den 1980er Jahren Bitumen mit geringen PAK-Gehalten als Teerersatz verwendet.

Infolge der jahrzehntelangen Nutzung kam es zu einer weiträumigen Schadstoffverteilung. Der Großteil der PAK-Belastungen resultiert heute aus dem Rückbau alter Straßenbeläge sowie der historischen, teils unkontrollierten Ausbringung von teerhaltigem Fräsgut auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Durch anschließende Bodenbearbeitung (z. B. Pflügen) wurden diese Partikel großflächig in den Oberboden

eingearbeitet. Der Bestand an teerhaltigem Ausbauasphalt im deutschen Straßennetz wird aktuell auf ca. 1,0 Milliarden Tonnen geschätzt. Diese Abfallströme stellen eine persistente Herausforderung für das Stoffstrommanagement dar, da deren vollständiger Rückbau und Dekontamination voraussichtlich noch mehrere Dekaden beanspruchen werden. Aktuell muss dieses Material ressourcenintensiv thermisch behandelt oder in spezialisierten Deponieklassen (gemäß DepV) gesichert werden.

2.2.1 Verarbeitbare Stoffströme im Überblick

Das Spektrum der Massenströme, die mittels der hier untersuchten Separationsverfahren für Asphalt und Mineralik aufbereitet werden können, umfasst insbesondere folgende Kategorien:

1. **Aushübe aus Bauvorhaben:**

Die Bodenbeschaffenheit, beispielhaft betrachtet in der Bodenseeregion, ist massiv durch anthropogene Eingriffe der Nachkriegszeit geprägt. Infolge von Kriegsschäden wurden teerhaltiger Straßenausbruch und Trümmer zur Verfüllung von Bombenkratern genutzt. Die Relevanz dieser Belastungen zeigt sich in der aktuellen Baupraxis: Bei der Anlieferung von Aushubmaterial (z. B. am Standort Fischbach) wird regelmäßig ein Anteil von 5 bis 10 % Teerasphalt identifiziert. Fachspezifische Erhebungen bestätigen, dass diese Kontaminationen eine bundesweite Herausforderung für die Entsorgungswirtschaft darstellen, da sie mangels wirtschaftlicher Aufbereitungsalternativen zumeist deponiert werden müssen.

2. **Straßenunterbau (Auskofferungsmaterial)**

Beim Rückbau teerhaltiger Verkehrsflächen verbleiben im darunterliegenden Straßenunterbau oft geringe Mengen teerhaltiger Partikel. Obwohl diese Fraktion überwiegend aus hochwertigen mineralischen Gesteinskörnungen besteht, führt bereits eine geringfügige stoffliche Verunreinigung zur Einstufung als belasteter Abfall. Eine direkte Wiederverwendung als Primärbaustoff ist nach geltenden Umweltvorschriften ausgeschlossen, was die Entsorgungskosten erhöht und wertvolle mineralische Ressourcen bindet.

2.3 Analyse der Situation

In den Jahren 2020 und 2021 wurde eine umfassende Untersuchung der von der Firma Zwisler GmbH betriebenen Deponie Fischbach durchgeführt. Das Kernziel dieser Erhebung war die detaillierte Aufschlüsselung und schadstofftechnische Bewertung der angelieferten Materialien (zugelassen bis zur Materialklasse BM-F3).

Im Untersuchungszeitraum von März 2019 bis März 2020 wurden insgesamt 128 Haufwerke mit einer Gesamtmenge von rund 80.000 Tonnen Bauaushub dokumentiert. Im Rahmen dieser Studie wurden sämtliche Schadstoffanalysen systematisch ausgewertet, um ein präzises Profil über die Belastungsstruktur des Gesamtstoffstroms zu erstellen. Diese Datenbasis dient als empirische Grundlage für die Entwicklung und Dimensionierung künftiger Aufbereitungsverfahren.

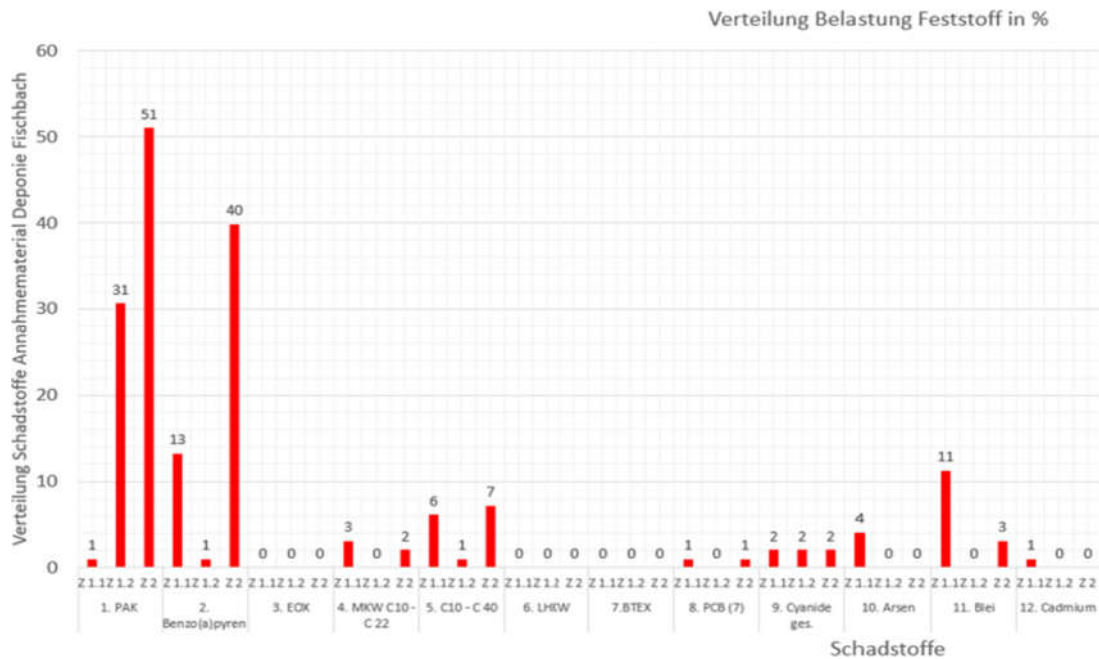


Abbildung 1: Schadstoffverteilung des Annahmematerials der Deponie Fischbach (im Zeitraum März 2019-März 2020), Z.1.1: Bodenmaterial mit sehr geringen stofflichen Belastungen (neue Kennzeichnung: BM-F1), Z.1.2.: Bodenmaterial mit moderater stofflicher Belastung (neue Kennzeichnung BM-F2), Z.2.: Bodenmaterial mit deutlich stofflicher Belastung (neue Kennzeichnung BM-F3) (siehe Ersatzbaustoffverordnung (EBV))

Die Auswertung der Daten (Abbildung 1) macht deutlich: Das Hauptproblem im Annahmematerial der Deponie sind PAK und Benzo[a]pyrene. Diese Belastungen stammen eindeutig aus den darin enthaltenen Resten von altem Teerasphalt.

- Über 80 % der angelieferten Materialien sind mit PAK belastet (Bodenmaterial Z.1.1- Z.2)
- Über 50 % der angelieferten Materialien sind mit Benzo[a]pyrene belastet (Bodenmaterial Z.1.1- Z.2)
- Sämtliche weiteren Untersuchungsparameter verbleiben auf einem geringen Konzentrationsniveau und erfordern keine kostenintensiven Spezialverfahren

Nicht nur die chemische, auch die stoffliche Auswertung der Stoffströme verdeutlicht das erhebliche Potenzial einer weiterführenden Aufbereitung. Die physikalische Analyse des Gesamtmassenstroms zeigt eine sehr konsistente Verteilung:

- **Mineralik (ca. 94 M.-%):** Der überwiegende Anteil besteht aus unbelasteter natürlicher Gesteinskörnung (Fein- und Grobanteile).
- **Asphaltanteile (ca. 5 M.-%):** Die Schadstoffe sind nahezu vollständig in den Asphaltfragmenten – vornehmlich historischen Ursprungs – gebunden.
- **Störstoffe (ca. 1 M.-%):** Organische und anorganische Fremdstoffe wie Holz, Ziegel und Kunststoffe.

Derzeit erfolgt die Verwertung dieser belasteten Massen in einem technischen Bauwerk im Rahmen der Sanierung und Rekultivierung der Deponie Fischbach. Diese Form der Sicherungsverwertung verhindert zwar eine Schadstoffemission, entzieht die wertvolle Mineralik jedoch dem Baustoffkreislauf.

2.3.1 Quantitative Abschätzung der belasteten Massenströme

Die exakte Quantifizierung der teerkontaminierten Boden- und Unterbaufractionen in Deutschland und Europa stellt eine methodische Herausforderung dar. Da belastete Materialien über Jahrzehnte hinweg verbaut oder infolge von Kriegseinwirkungen unkontrolliert verteilt wurden, basieren aktuelle Berechnungen weitgehend auf groben Schätzwerten. Ein signifikanter Anteil dieser Stoffströme wurde bereits in der Vergangenheit auf Deponien verbracht. Schätzungen gehen jedoch davon aus, dass sich noch mehrere Milliarden Tonnen belastetes Material im Boden sowie unter bestehenden Verkehrsflächen befinden. Da für diese Mengen bislang keine wirtschaftlichen Trennverfahren existieren, können sie nicht im Sinne einer hochwertigen Kreislaufwirtschaft rückgewonnen werden. Sie verbleiben somit als ungenutztes Ressourcenpotenzial und potenzielle Umweltbelastung im Untergrund.

2.4 Der Weg zum Entwicklungsprojekt

Aufgrund der anfallenden hohen Aushubmengen mit Asphaltkontaminationen plant die Firma Zwisler GmbH den Bau einer weiteren nassmechanischen Bodenaufbereitungsanlage für belastete Aushübe. Dies einerseits, um das verfügbare Deponievolumen zu entlasten, andererseits aber auch um die Mineralik möglichst baulich verwerten zu können. Es werden bereits Bodenwaschanlagen betrieben, welche mobile Schwermetalle, Pflanzenschutzmittel, flüssige PAK und Salze separieren, bzw. die Schadstoffe in die Feinstfraktion verfrachten können. Es gab vor Projektbeginn allerdings keine bekannte angewandte mechanische Technik, die im Stande gewesen wäre, feste Asphaltteile aus der Mineralik zu separieren. Aus diesem Grund war und ist die Firma Zwisler GmbH hochmotiviert die Entwicklung einer Technologie zur Asphaltseparation voranzutreiben, um in Zukunft hochwertige Gesteinskörnung rezyklieren zu können, anstelle sie deponieren zu müssen.

Vor Beantragung der DBU-Fördergelder wurden dabei verschiedene interne sowie externe Maschinenversuche mit Firmen und Instituten durchgeführt. Dabei wurde versucht, mittels optischer Separation oder klassischer mineralischer Aufbereitung die festen Asphaltstücke von der Mineralik zu trennen. Einige Grundlagenversuche erzielten aussichtsreiche Ergebnisse, was zur folgenden Zielsetzung führte (Förderantrag 03/2022):

Priorität I: „Bei der optischen Sortierung wird bisher über die Sensoren die schwarze Mineralik als Asphalt erkannt. Dadurch wird ca. 15 M.-% natürliche Mineralik mit dem Asphalt ausgeschlossen und muss mit dem Asphalt teuer entsorgt werden. Unser Ziel ist es, dass die schwarze Mineralik von dem Asphalt unterschieden wird und in der verwertbaren Mineralikfraktion verbleibt. Dies hätte enorme Kostenvorteile bei der Entsorgung und bei den Betriebskosten (Druckluft)¹.“

Priorität II: „Die Sensorik soll schadstoffhaltiges Teer-Bindemittel von Bitumen-Bindemittel unterscheiden und separieren können. Somit könnte das ausgeschlossene Bitumen im Straßenbau wieder eingesetzt werden. Der separierte Teerbelag könnte bei

¹ DBU Förderantrag AZ 38222/01

der *Reko* in Rotterdam thermisch und stofflich verwertet werden. Dadurch wird der Stoffstrom in die einzelnen Massenströme aufgeteilt und zu 100 % verwertet².“

Im Projektverlauf zeigte sich, dass die rein optische Trennung, die ursprünglich für Priorität I und II geplant war, im Feinkornbereich an wirtschaftliche und physikalische Grenzen stößt. Ebenso erwies sich die automatisierte Unterscheidung von Teer und Bitumen als eine in diesem Projekt kaum lösbare Aufgabe. Aufgrund der technologischen Anforderungen und Aussichten wurde die Prozessstrategie im Projektverlauf angepasst: Während die Grobkorn-Sortierung (> 16 mm) weiterhin auf dem Verfahren der optischen Sortierung basiert, wurde für die Feinkorn-Sortierung (0,5–16 mm) ein innovatives magnetochemisches Verfahren entwickelt. Letzterer Ansatz steigert die Trennschärfe gerade in jenen Partikelgrößenbereichen, in welchen optische Sensoren ihre systembedingten Auflösungsgrenzen erreichen. Die Entwicklung der automatisierten Unterscheidung von Teer und Bitumen wurde dagegen eingestellt.

Die Prioritäten wurden im Projektverlauf wie folgt angepasst:

- **Priorität I:** Grobkorn-Sortierung > 16mm mittels optischer Sortiersysteme
- **Priorität II** Feinkorn-Sortierung (0.5-16mm), mittels oberflächenphysikalischer Verfahren

² Ebd., S. 6.

3. Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden

Die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit gliedert sich in mehrstufige Untersuchungsreihen, die in enger Kooperation mit externen Forschungsinstituten und spezialisierten Maschinenherstellern durchgeführt wurden. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die Frage, wie die Trennschärfe zwischen natürlichem Gestein und Asphalt so optimiert werden kann, dass ein Maximum an sauberem Material zurückgewonnen wird.

3.1 Methodik der Prioritätsstufe I

Die Priorisierung der Untersuchungsreihen erfolgte bei Projektbeginn zugunsten der Prio I, da für diese technologischen Ansätze eine höhere Realisierungswahrscheinlichkeit prognostiziert wurde.

3.1.1 Betriebseigene Versuchsreihen (Standort Tettnang)

In Ergänzung zu den externen Tests (3.1.2) wurden im Laborcontainer sowie an der bestehenden nassmechanischen Anlage der Firma Zwisler GmbH im Biggenmoos betriebseigene Untersuchungen durchgeführt:

- **Stoffstromanalyse:** Ermittlung der physikalischen Parameter (Dichte, Adhäsion, Kornform) des firmeneigenen Materials.
- **Prozesswasser-Analyse:** Untersuchung des Einflusses von Additiven und Flockungsmitteln im Prozesswasser
- **Konditionierung:** Händische Aufbereitung und Klassierung von Probenmaterial für die großtechnischen Maschinenversuche.
- **Physikalische Eigenschaften:** Charakterisierung von Teer, Bitumen und Mineralik, sowie Ziegel, Beton und Holz

3.1.2 Externe Versuchsreihen und Kooperationen

Um ein breites Spektrum an Trenntechnologien zu evaluieren, wurden umfangreiche Versuchsreihen mit externen Partnern aus der Industrie sowie wissenschaftlichen Instituten initiiert. Insgesamt wurden ca. 40 differenzierte Maschinenversuche für Prio I und II projektiert. In Tabelle 1 sind die Versuchsreihen dargestellt, die den Korngrößenbereich der Prio I abdecken. Dabei wurden unterschiedlichen Technologien angewendet: Setzmaschinenteknik, selektive Zerkleinerung, optische Sortierung und spektrometrische Analyse.

Tabelle 1: Übersicht der projektieren Versuchsreihen für Korngrößen im Bereich 0-100 mm

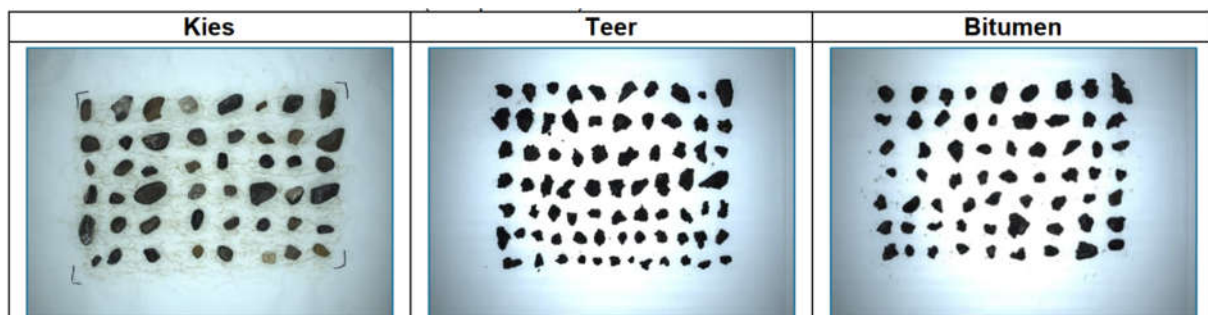
Technologien / Verfahren	Partner aus Industrie und Forschung	Korngrößenbereich	Untersuchungsschwerpunkt
Setzmaschinenteknik	Allmineral	4 – 32 mm	Dichtesortierung
Selektive Zerkleinerung	BHS-Sonthofen	0 – 100 mm	Mechanischer Aufschluss
Optische Sortierung	Steinert, Tomra, Binder & Co, Redwave	8 – 80 mm	Sensorgestützte Einzelkornsortierung
Spektrometrische Analyse	MFPA Weimar	Labormaßstab	Optische Differenzierbarkeit Asphalt vs. Mineralik

3.1.3 Methodik der Sensorevaluation (MFPA Weimar)

Ein zentraler Arbeitsschritt war die Beauftragung einer Forschungsarbeit (Prüfbericht Nr. B 28.21.133.01, siehe Anhang 3) beim MFPA Weimar (Materialforschungs- und Prüfanstalt). Methodisch wurde hierbei untersucht, inwieweit die spektroskopische Signatur von nasser Mineralik und Asphalt eine automatisierte Unterscheidung ermöglicht.

Für die Erkennung des Probenmaterials wurden Bilder von Partikeln mit einer hochauflösenden Industriekamera aufgenommen. Diese wurden dazu verwendet, um daraus charakteristische Bildmerkmale wie Textur, Farbe, Form und Grauwerte zu bestimmen. Insgesamt wurden über 200 Bildmerkmale berechnet und daraus die für diese Erkennungsaufgabe signifikanten Merkmale ausgewählt. Diese Merkmale wurden dann für das Trainieren eines Klassifikators verwendet. In Tabelle 2 sind Beispielaufnahmen von den drei Hauptkategorien (Kies, Teer und Bitumen) der Proben dargestellt. Alle Aufnahmen wurden mit nasser Oberfläche aufgenommen.

Tabelle 2: Aufnahmen von den drei Hauptkategorien der Proben (Kies, Teer und Bitumen). Alle Aufnahmen wurden mit nasser Oberfläche aufgenommen. Die Proben wurden von Zwister GmbH zur Verfügung gestellt. (Beispielbilder aus Prüfbericht; MFPA)



Der nächste Prozessschritt war das Sortiertraining. Die im vorhergehenden Schritt erstellten Merkmalsvektoren wurden in maschinellen Lernverfahren zum Trainieren von Sortierern verwendet. Es wurden für die Sortierer drei klassische Lernverfahren genutzt: Support-Vektor-Maschine (SVM), Multilayer Perceptron (MLP) und k-Nächster-Nachbar (kNN). Die Erkennungsrate stellt dabei den Anteil an richtig erkannten Objekten im Testdatensatz dar. Weiterhin wurden zwei unterschiedliche Beleuchtungstypen und deren Einfluss auf die Ergebnisse untersucht. Alle Objekte wurden mit Ringlicht (B1 – Objekte sind von allen Seiten gleichmäßig beleuchtet) und dem Auflicht (B2 – ein direktes Licht von oben) aufgenommen. Die Datensätze wurden sowohl als Zwei-Klassen- als auch als Drei-Klassen-Problem generiert. Die Hauptpriorität lag dabei auf der Unterscheidung zwischen den auszusortierenden Materialien (Bitumen und Teer) sowie der Fraktion Kies (Zwei-Klassen-Problem). Die weiterführende Klassifizierung aller einzelnen Fraktionen – Bitumen, Teer und Kies – wurde im Rahmen der Untersuchungen bei der MFPA ebenfalls durchgeführt (Drei-Klassen-Problem), auf diese Nebenspriorität wird jedoch im vorliegenden Bericht nicht detailliert eingegangen.

3.1.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Sortierparameter

Zur Bewertung der industriellen Umsetzbarkeit wurden für die optischen Sortiersysteme spezifische Betriebsparameter definiert. Methodisch wurden der Durchsatz (t/h) ins Verhältnis zum Druckluftbedarf (Nm³/h) gesetzt (Tabelle 3), um die energetische und ökonomische Effizienz der unterschiedlichen Kornfraktionen zu ermitteln.

Tabelle 3: Betrachtung Wirtschaftlichkeit von optischen Sortierern bezogen auf unterschiedliche Korngrößenbereichen, beispielhaft anhand der Daten aus den Versuchen mit den Sensorsortierern der Firma Binder (Negativsortierung von 5% Störstoff).

Optische Sortierung (Bandbreite 1400 mm)	Durchsatz t/h	Druckluftbedarf pro Stunde in Nm ³ /h	Druckluftverbrauch pro Tonne in Nm ³ /t
4 – 8 mm	10	197	19,7
8 – 16 mm	20	98	4,9
16 – 32 mm	40	40	1
32 – 80 mm	60	34	0,6

3.2 Methodik der Prioritätsstufe II

Im Fokus der Prio II steht die Aufbereitung des Korngrößenbereichs 0,5 bis 16 mm, für welche die sensorgestützte Sortierung keine ausreichende Trenngüte und keine wirtschaftliche Betriebsweise erzielen konnte. Die Unterschreitung der wirtschaftlichen Detektionsgrenze bei optischen Systemen machte die Entwicklung alternativer Trennverfahren notwendig.

Strategische Neuausrichtung:

Die ursprüngliche Zielsetzung der Prioritätsstufe II im Förderantrag sah die technologische Trennung von Bitumen und Teer vor. Im Rahmen der Forschungsarbeiten stellte sich jedoch heraus, dass eine saubere Separation dieser beiden Stoffgruppen aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Ähnlichkeiten mit den gewählten Ansätzen nicht prozesssicher realisierbar ist. Infolgedessen wurde der Schwerpunkt von Prio II auf die

effiziente Separation von Asphaltpartikeln aus mineralischen Massenströmen von < 16 mm Korngröße verlagert.

3.2.1 Versuchsreihe und Kooperationen

Zur Evaluation eines breiten Spektrums an Trenntechnologien wurden anfänglich auch für die Prioritätsstufe II umfangreiche Versuchsreihen mit industriellen Partnern und wissenschaftlichen Instituten initiiert. In Tabelle 4 sind die Versuchsreihen aufgeführt, die spezifisch für den Korngrößenbereich von <16 mm der Prio II projiziert wurden. Ergänzend hierzu sind in Tabelle 1 zusätzliche Untersuchungen aufgeführt, deren Anwendungsbereich ebenfalls die kleineren Kornfraktionen der Prio II abdeckt.

Tabelle 4: Übersicht der projizierten Versuchsreihen (Priorität II)

Technologien Verfahren	Partner (Industrie / Forschung)	Korngrößenbereich	Untersuchungsschwerpunkt
Nassmechanische Setztechnik	AGS, BAM Berlin, Siebtechnik Tema	0 – 4 mm 2 -8 mm	Dichtentrennung (Feinsand)
Dichtentrennung (Tisch/Spiral)	RWTH Aachen, Trennso- Technik, AKW	0 – 4 mm	Sortierung mittels Fliehkraft & Schwerkraft
Flotation Kohlespirale	Dr. Jakobs GmbH	0 – 8 mm	Grenzflächenchemische Trennung
Mechanischer Aufschluss	Hosokawa Alpine	0 – 16 mm	Selektive Mahlung (Gutbettwalzenmühle)
Optische Sortierung	3SMI	2 – 8 mm	Sensorik im Feinkornbereich
Magnetische Separation	UMTEC (FH OST)	0,5 – 16 mm	Selektive Konditionierung (AsphaCycle®)

Parallel zu den optischen Sortierversuchen erfolgte seit 2021 eine enge Forschungskooperation mit dem Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC) an der OST – Ostschweizer Fachhochschule in Rapperswil, Schweiz. Unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. Rainer Bunge wurde ein innovativer Ansatz verfolgt: die Separation basierend auf den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften von Asphaltpartikeln und natürlichem Kies. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurde das Verfahren – im Folgenden „AsphaCycle®“ genannt – erfolgreich im Labormaßstab entwickelt und validiert.

3.2.2 Verfahrensablauf und physikalische Wirkprinzipien der Magnetseparation des *AsphaCycle*[®]-Verfahrens

Das beschriebene Verfahren ist ein Ansatz zur stofflichen Trennung, der sich die unterschiedliche Benetzbarkeit (Hydrophobie vs. Hydrophilie) von Teer bzw. Bitumen gegenüber Mineralien zunutze macht, um ein eigentlich nicht-magnetisches Material (Asphalt) mit magnetischen Eigenschaften auszurüsten. Das Herzstück des Verfahrens ist eine selektive hydrophobe Agglomeration. Das Verfahren verzichtet auf eine rein mechanische oder sensorbasierte Sortierung und nutzt stattdessen die unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften von Asphalt und Mineralik, um eine selektive Anlagerung zu induzieren. Das Verfahren durchläuft dabei folgende Schritte:

1. Herstellung der funktionellen Ausrüstung

Zuerst wird feinstes magnetisches (eisen- oder ferrosilizium-haltiges) Pulver mit handelsüblichem und lebensmittel-echten Pflanzenöl vermischt. Dabei werden die magnetischen Partikel in einer hydrophoben (wasserabweisenden) Phase eingebettet. Anschließend wird das magnetische Öl/Pulver-Gemisch einem Wasserbad zugegeben. Dies führt zu einer energetischen Spannung mit Phasentrennung: Das nunmehr magnetische Öl „flüchtet“ vor dem Wasser und sucht eine chemisch verwandte, also hydrophobe, Oberfläche.

2. Das Wasserbad als physikalischer Filter

Das Wasser fungiert hier als energetisches Selektionsmedium zwischen zwei gegensätzlichen Oberflächen:

- **Asphalt/Bitumen:** Ist von Natur aus unpolar und hydrophob (lipophil). Er stößt Wasser ab, zieht aber andere ölhaltige oder hydrophobe Stoffe an (Van-der-Waals-Kräfte).
- **Mineralik (Gestein/Sand):** Ist polar und hydrophil (lipophob). Schon nur bei Befeuchtung bildet sich sofort ein hauchdünner Wasserfilm um jeden Stein. Eingetaucht in ein Wasserbad, wirkt dieser Film wie ein physikalischer Schutzschild, der verhindert, dass die öligen Bestandteile den Stein überhaupt berühren können.

3. Agglomeration:

Sobald die Öltropfen mit den darin enthaltenen Metallpartikeln im Wasser auf Teer oder Bitumen treffen, haften sie am lipophilen Bitumen an. Es entsteht ein relativ stabiles Hybrid-Material: die Asphaltstücke sind mit einer magnetischen „Haut“ ausgerüstet worden. Da dieser Vorgang nur bei den apolaren Bindemitteln funktioniert, werden diese selektiv magnetisiert.

4. Die magnetische Trennung (Suszeptibilität)

In der Folge hat der Asphalt eine physikalische Eigenschaft, die er vorher nicht hatte: eine hohe magnetische Suszeptibilität (Anziehbarkeit).

- Bei der nachfolgenden magnetischen Abscheidung folgt die Mineralik lediglich der Trägheit und Schwerkraft.
- Die „magnetisierten“ Asphaltpartikel hingegen werden durch das Magnetfeld selektiv aus ihrer Flugbahn abgelenkt und in einen separaten Schacht geleitet.

3.2.3 Analyse der Magnetseparation: Trennerfolge in Abhängigkeit von Ölgehalt und Additivtyp

Zur Bestimmung der Adsorptions- und Sortier-Effizienz und Selektivität des *AsphaCycle*[®]-Verfahrens wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit am UMTEC (Tschopp, 2024; siehe Anhang 2) experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Arbeit erfolgte ohne direkte Projektfinanzierung, leistete jedoch durch die wissenschaftliche Aufarbeitung des Themas einen wesentlichen Beitrag zur Verfahrensentwicklung. Als Matrix diente ein wassergesättigtes Kies-Asphaltgemisch mit einem Asphaltanteil von ca. 5 %. Dieses wurde in getrennten Versuchsreihen mit in Öl dispergiertem Pulver aus Magnetschlacke (MSM) sowie Ferrosilizium-Pulver (FeSi) versetzt. Dabei variierte der Ölgehalt in der gesamten Mischung in definierten Abstufungen zwischen 0,1 % und 2,0 %, wobei spezifische Konzentrationsbereiche für die jeweiligen Trägermaterialien (FeSi: 0,1–0,8 %; MSM: 0,2–2,0 %) untersucht wurden.

4. Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen dienten dazu, eine technisch zuverlässige Lösung für die Trennung von Asphalt und dunkler Mineralik zu finden. Im Fokus stand die Überwindung der physikalischen (insbesondere der optischen) Ähnlichkeit beider Stoffe, die bislang ein hochwertiges Recycling erschwerte.

Die folgenden Ergebnisse fassen die Erkenntnisse aus der Forschung und den industriellen Sortierversuchen zusammen. Sie belegen schlussendlich das große Potenzial des *AsphaCycle*®-Verfahrens, das nach der erfolgreichen Validierung der Grundlagen nun die Basis für eine künftige industrielle Nutzung bildet.

4.1 Ergebnis Prio I









In der Prio I lag der Fokus auf der grundlegenden Machbarkeit der sensorgestützten Sortierung. Ziel war es, festzustellen, ob eine saubere Trennung von Asphalt und natürlicher Mineralik unter Praxisbedingungen überhaupt möglich ist.

4.1.1 Ergebnisse betriebseigener Versuchsreihen

Die Gegenüberstellung der Materialgruppen (Mineralik und Asphalt) verdeutlicht die zentrale Herausforderung der optischen Sortierung (Tabelle 5):

- Optische Konvergenz im nassen Zustand: Während Mineralik und schwarzer Asphalt im trockenen Zustand farblich (bunt/grau vs. schwarz) gut unterscheidbar sind, nähern sie sich im nassen Zustand optisch stark an den Asphalt an. Oft erscheinen dann Körner beider Gruppen gleichermaßen dunkel und glänzend.
- Physikalische Unterscheidungsmerkmale:
 - Oberfläche: Asphalt hebt sich durch eine leicht raue, poröse Oberfläche sowie das Vorhandensein von Bitumen/Teer ab, während die natürliche Mineralik von Primarkies (Rundkies oder gebrochen) eher glatt ist.
 - Hydrophilie: Ein entscheidendes Trennmerkmal ist das Benetzungsverhalten. Natürliche Mineralik ist hydrophil (wasserliebend), während die asphaltgebundene Mineralik aufgrund des Bindemittels hydrophob (wasserabweisend) reagiert.

Tabelle 5: Ermittlung der physikalischen Eigenschaften des firmeneigenen Stoffstromes

Unterscheidung:	Gemisch	Mineralik	Schwarze Mineralik	Asphalt Mineralik + Bindemittel
Nass				
Trocken				
Farbe:	Gemisch	Bunt	Schwarz	Schwarz, gesprenkelt
Form:	Gemisch	Rund und kantig	Meist rund	Häufig Splitt
Härte:	Gemisch	Hart	Hart	Bindemittel weich
Oberfläche:	Gemisch	Eher glatt	Eher glatt	Leicht rau, porös
Bindemittel:	Gemisch	Nein	Nein	Ja
Hydrophilie:	Gemisch	Hydrophil	Hydrophil	Hydrophob
Art Bindemittel:	Gemisch	Nein	Nein	Bitumen/Teer
Dichte kg/l:	Gemisch	2,6	2,6	2,3
Besteht aus Kohlenstoff	Teilweise	Nein	Nein	Nur Bindemittel

4.1.2 Ergebnisse der Versuchsreihen mit externen Firmen

Im Rahmen der Prio I wurde ein breites Spektrum an Aufbereitungsverfahren bei namhaften Instituten und Anlagenherstellern untersucht. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt differenzieren:

1. Mechanische und klassische Aufbereitungsverfahren

Die Versuche zur Setzmaschinenteknik (Allmineral, 4–32 mm) sowie zur selektiven Zerkleinerung (BHS Sonthofen, 0–100 mm) lieferten keine ausreichenden Ergebnisse. Diese klassischen Verfahren erwiesen sich als ungeeignet, um die geforderte Trenngüte zwischen Asphalt und natürlicher Mineralik zu erreichen.

2. Optische Sortierverfahren im Fokus

Bei der sensorgestützten optischen Sortierung (Korngrößenbereich 8–80 mm) zeigte sich ein heterogenes Bild.

Tabelle 6: Ergebnisse der vier Maschinenherstellern zu optischer Sortierung mit jeweils Korngröße 16/32; *Gewicht Asphalt in Auswurf / Gewicht Asphalt in Input

Maschinenhersteller	Input		Drop/Durchlauf (Produkt)		Eject/Auswurf (Rückstand)		Ausbringen Asphalt in Rückstand *
	Anteil Mineralik	Anteil Asphalt	Anteil Mineralik	Anteil Asphalt	Anteil Mineralik	Anteil Asphalt	
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
Redwave	94.8%	5.2%	99.6%	0.4%	7.0%	93.0%	93%
Tomra	89.2%	10.8%	99.0%	1.0%	34.1%	65.9%	91%
Binder (MINEXX)	94.9%	5.1%	99.7%	0.3%	9.2%	90.8%	94.9%
Steinert	93.9%	6.1%	98.8%	1.2%	77.6%	22.4%	22.4%

Die Ergebnisse der vier Anbieter (Tabelle 6, Korngröße 16/32) sind aufgrund variierender Randbedingungen nur bedingt direkt vergleichbar. Die Bewertung der Sortierleistung basiert auf der Definition des Ausbringens, welches den Anteil des im Input enthaltenen Asphalts beschreibt, der erfolgreich in die Reststofffraktion (Eject) separiert wurde, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Reinheit dieser Fraktion. Dieser Wert dient als maßgeblicher Indikator für die Effektivität des Prozesses, bei dem der Materialstrom in einen mineralischen Durchlauf und einen asphaltreichen Auswurf aufgespalten wird. In der Praxis ergibt sich hierbei ein technischer Zielkonflikt: Während für den Durchlauf eine Reinheit von 100 % angestrebt wird, darf im Auswurf möglichst keine verwertbare Mineralik enthalten sein, um Ressourcenverluste zu vermeiden. Da diese Zielgrößen divergieren, strebt die Prozesskonfiguration ein wirtschaftliches Optimum an, wobei die gesetzlichen Grenzwerte für Fremdstoffanteile den qualitativen Rahmen vorgeben

Wie in Tabelle 6 ersichtlich, variiert die Leistungsfähigkeit der untersuchten Systeme erheblich. Als entscheidender Indikator für den Erfolg wurde das Ausbringen von Asphalt in den Rückstand (Eject) herangezogen.

- **Erfolgreiche Validierung (Binder + Co. & REDWAVE):** Die Systeme von Binder + Co. und Redwave liefern die saubersten Ergebnisse im Durchlauf. Mit einer Produktreinheit von 99,7 % (Binder + Co) bzw. 99,6 % (Redwave) mineralischem Anteil im Produkt wird der verbleibende Asphaltgehalt im Kies auf ein Minimum von 0,3 % bis 0,4 % reduziert. Dieser Erfolg resultiert maßgeblich daraus, dass beide Hersteller die Ergebnisse des Prüfberichtes der MFPA Weimar (siehe 4.1.3) integriert haben, der von der Zwisler GmbH beauftragt wurde. Dessen bildanalytische Erkenntnisse über Kies, Teer und Bitumen ermöglichen die exakte Kalibrierung der Sortiersysteme.

- **Defizite der Standard-Systeme:**

- **Tomra:** Zwar erreichte auch das System von Tomra eine gute Ausbringung des Asphalt (91 %), jedoch zum Preis einer mangelnden Selektivität. Die resultierende hohe Fehlerrate führte zu einem unwirtschaftlichen „Dauerschuss“ der Druckluftdüsen, wodurch massiv wertvolle Mineralik im Auswurf (34,1 %) verloren ging.
- **Steinert:** Das Sortiersystem von Steinert konnte die Anforderungen der „Schwarz-Schwarz-Trennung“ unter den vorliegenden Testbedingungen nicht vollumfänglich erfüllen. Zwar wurde der Asphaltgehalt im Produkt signifikant von 6,1 % auf 1,2 % reduziert, jedoch ist die Zusammensetzung des Ejects (Rückstand) kritisch zu bewerten: Dieser besteht zu 77,6 % aus wertvoller Mineralik. Dies deutet auf einen massiven Fehlaustrag hin, bei dem erhebliche Mengen an sauberer Mineralik fälschlicherweise der Abfallfraktion zugeordnet werden. Im Vergleich zu den mit MFPA-Parametern optimierten Systemen mangelt es hier an der notwendigen Trennschärfe für eine wirtschaftliche Aufbereitung.

Folglich erreichten nur Binder + Co. sowie REDWAVE das notwendige wirtschaftliche Optimum zwischen hoher Asphalt-Separation und minimalem Ressourcenverlust.

4.1.3 Ergebnis der Sensorevaluation (MFPA Weimar)

In der Abbildung 2 sind die Ergebnisse der klassischen Sortierer mit Belichtung B1 (Ringlicht) und B2 (Auflicht) des Zwei-Klassen-Problems zusammengefasst.

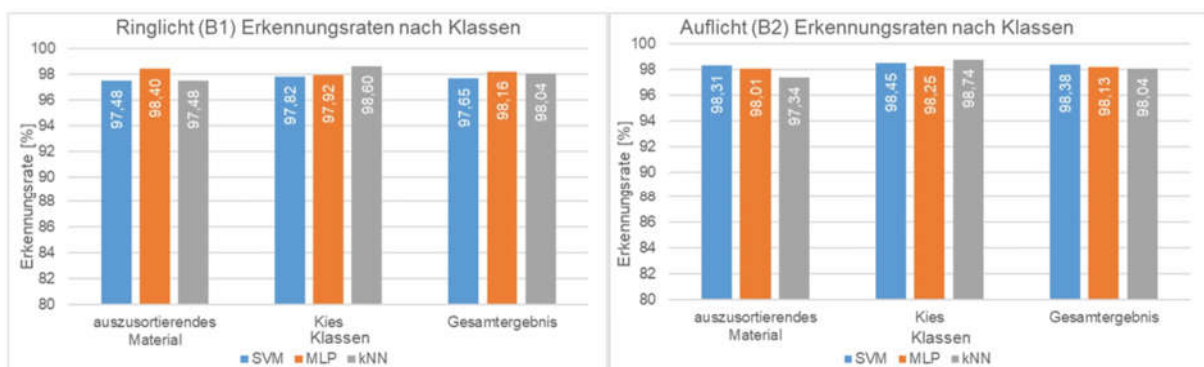


Abbildung 2: Erkennungsraten der klassischen Klassifikatoren mit den optimierten Merkmalsvektoren (2-Klassen-Problem)

Bei Betrachtung der Ergebnisse, lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die auszusortierenden Partikel (Bitumen + Teer) sehr gut von den Kiespartikel unterschieden werden können. Alle Sortierer erreichen ein ähnlich gutes Ergebnis. Das höchste Ergebnis mit der Erkennungsrate von 98,38 % wurde mit dem SVM Klassifikator und der Auflicht Beleuchtung erreicht. Die anderen Klassifikatoren (MLP und kNN) erreichen ein ähnlich hohes Ergebnis und liegen dabei nur geringfügig niedriger. Mit einer optimalen Beleuchtung lassen sich besser Ergebnisse erreichen.

Das zentrale Ergebnis der Untersuchungen unter der Leitung von Frau Dr. Linß (MFPA) belegt die technische Machbarkeit der sensorgestützten Trennung:

- **Überwindung der optischen Barriere:** Es wurde wissenschaftlich nachgewiesen, dass mittels neu entwickelter spezifischer Detektionsverfahren selbst feuchte, dunkle Mineralik zuverlässig von Asphaltfragmenten unterschieden werden kann.
- **Grundlage für Prio I:** Diese Erkenntnis durchbrach die bisherige Barriere der optischen Ähnlichkeit beider Stoffgruppen (siehe Abbildung 3) und lieferte die notwendigen Parameter für die algorithmische Kalibrierung der Hochleistungssortierer. Die erarbeiteten Grundlagenuntersuchungen bildeten die essenzielle Voraussetzung dafür, dass Maschinenhersteller wie Binder + Co. und REDWAVE ihre Sortierergebnisse signifikant optimieren und ihr Produktportfolio ausweiten konnten. Damit ist das Aufgabenziel erreicht und es erübrigen sich aktuell weitere wissenschaftliche Untersuchungen in diesem Korngrößenbereich.



Abbildung 3: Visuelle Gegenüberstellung von wasserbenetztem Asphalt und dunkler Mineralik (Schwarze Mineralik). Die minimale farbliche Differenzierung verdeutlicht die Herausforderung für die optische Detektion im nassen Zustand. (Foto: Mischa Tschopp, UMTEC)

4.1.4 Ergebnis zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Sortierparameter

Die Auswertung der Leistungsdaten (in Tabelle 3) zeigt eine direkte Korrelation zwischen zunehmender Korngröße und steigender Wirtschaftlichkeit. Während der Einsatz bei grobem Material (16–80 mm) als hocheffizient einzustufen ist, stößt das Verfahren im Feinkornbereich an seine ökonomischen Grenzen.

- **Grobgut (16 – 80 mm):** In diesem Bereich arbeitet die Anlage hochgradig wirtschaftlich. Bei Durchsatzmengen von bis zu 60 t/h ist der spezifische Druckluftverbrauch minimal (unter 1 Nm³/t). Die Investitions- und Betriebskosten stehen hier in einem exzellenten Verhältnis zum Ertrag.
- **Mittelgut (8 – 16 mm):** Die Wirtschaftlichkeit ist in diesem Korngrößenbereich grenzwertig. Da der Luftverbrauch pro Tonne im Vergleich zur nächstgrößeren Fraktion bereits um den Faktor 5 (4,9 Nm³/t) ansteigt (bei gleichzeitig halbiertem Durchsatz), ist ein rentabler Betrieb nur bei einer sehr hohen Wertschöpfung des Endprodukts oder geringen Energiekosten denkbar.
- **Feingut (4 – 8 mm):** Der Betrieb in dieser Fraktion ist unter den gegebenen Annahmen unwirtschaftlich. Der massive Anstieg des Druckluftbedarfs auf fast 200 Nm³/h bei gleichzeitig geringem Durchsatz (10 t/h) führt zu einem spezifischen

Druckluftverbrauch von 19,7 Nm³/t. Die daraus resultierenden hohen Energiekosten übersteigen in der Regel den Marktwert des sortierten Materials.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Der optische Sortierer sollte primär für Fraktionen ab 16 mm eingesetzt werden, um eine optimale Amortisation der Anlage zu gewährleisten.

4.2 Ergebnisse Prio II

Die Ergebnisse aus Prio I belegten, dass die optische Sortierung im Kleinkornbereich auch mit den neuentwickelten Technologien derzeit nicht wirtschaftlich umsetzbar ist, weshalb im weiteren Projektverlauf alternative Trennmerkmale evaluiert wurden.

4.2.1 Ergebnisse der Versuchsreihen mit externen Firmen

Der Fokus dieser Versuchsreihen (siehe Tabelle 1 und Tabelle 4) lag primär auf der Untersuchung von Feinkornfraktionen (0–20 mm) und alternativen Trennverfahren. Dabei wurden zahlreiche mechanische, nasschemische und physikalische Verfahren untersucht, um die wirtschaftliche Lücke im Kleinkornbereich zu schließen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1. Mechanische und dichtegebundene Trennverfahren:** Versuche mit klassischen Aufbereitungstechniken im Bereich von 0 bis 8 mm lieferten durchweg nicht ausreichende Ergebnisse. Dies betrifft insbesondere:
 - **Setzmaschinentchnik:** Untersucht durch AGS, das BAM Berlin sowie die Firma Siebtechnik.
 - **Trenntische & Flotation:** Getestet an der RWTH Aachen (Wet shaking table), bei Trenso Tech sowie durch Dr. Jakobs GmbH (Kohlespirale & Flotation).
 - **Dichtesortierung:** Versuche mit Wendelscheidern und Attritionszellen (AKW) sowie Gutbettwalzenmühlen (Hosokawa) konnten die geforderte Trennschärfe ebenfalls nicht erreichen.
- 2. Optische Sortierung im Kleinkornbereich:** Die Untersuchung der optischen Sortierbarkeit im Bereich von 2 bis 8 mm durch 3SMI bestätigte die bereits in Prio I gewonnenen Erkenntnisse: Eine rein optische Separation ist in diesen geringen Korngrößen derzeit nicht wirtschaftlich umsetzbar.
- 3. Wissenschaftlicher Erfolg durch Magnetseparation:** Den entscheidenden Durchbruch in der Feinkornaufbereitung erzielte die Kooperation mit UMTEC (FH OST Rapperswil, Schweiz) unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Bunge. Bei der Untersuchung der Magnetabscheidung (0–20 mm) konnten gute Trennerfolge (für 0,5–16 mm) erzielt werden. Dieses Verfahren stellt somit eine vielversprechende technologische Ergänzung zur optischen Grobkornsortierung dar und wird daher mit großem Interesse weiterverfolgt.

4.2.2 Ergebnisse der magnetischen Markierung und Separation im Feinkornbereich (0,5 – 16 mm) - *AsphaCycle*[®]-Verfahren

Die Untersuchung der magnetischen Markierung stellte einen wesentlichen Durchbruch in der Aufbereitung feinkörniger Fraktionen (0,5 – 16 mm) dar. Während optische Systeme in diesem Bereich an wirtschaftliche Grenzen stoßen, lieferte dieser oberflächenphysikalische Ansatz vielversprechende Ergebnisse.

Zentrale Erkenntnisse und Trenngüte

- **Selektive Haftung:** In einem Wasserbad lagerten sich die hydrophobierten Metallpartikel ausschließlich an den Asphaltfragmenten an. Die hydrophile Mineralik blieb aufgrund ihres schützenden Wasserfilms gänzlich unbeeinflusst.
- **Induktion magnetischer Suszeptibilität:** Es wurde nachgewiesen, dass ehemals unmagnetische Asphaltpartikel durch die selektive magnetische Ausrüstung eine für eine Sortierung ausreichende Magnetisierbarkeit erhalten. Im Funktionsnachweis konnten markierte Asphaltpartikel bis zu einer Größe von 16 mm Durchmesser sicher mittels eines Stabmagneten aus dem Medium gehoben werden. Dies belegt die Eignung für den Einsatz industrieller Magnetabscheider.
- **Effizienz im Feinkornbereich:** Im Gegensatz zur optischen Sortierung korreliert die Effizienz dieses Verfahrens weniger mit der Partikelgröße als vielmehr mit der verfügbaren hydrophoben Oberfläche. Dies ermöglichte stabile Trennerfolge selbst bei Korngrößen deutlich unter 8 mm.
- **Reduktion der Gewichtskraft:** Bei der Demonstration vor der DBU konnte die selektive Trennung für Partikel bis 16 mm Durchmesser erfolgreich nachgewiesen werden. Aufgrund des hydrostatischen Auftriebs im wässrigen Medium reduziert sich die effektive Gewichtskraft der Asphaltpartikel um ca. 40 %. Diese signifikante Verringerung der resultierenden Gravitationskraft ermöglicht im Wasser eine effiziente magnetische Separation der belasteten Materialien, selbst bei Partikelgrößen von bis zu 16 mm Durchmesser.

Der qualitative Funktionsnachweis im Kleinversuch ist erbracht. Damit wurde die wissenschaftliche Grundlage für eine spätere Skalierung der Magnetseparation im Feinkornbereich geschaffen.

4.2.3 Ergebnisse der Magnetseparation: Trennerfolge in Abhängigkeit von Ölgehalt und Additivtyp des *AsphaCycle*[®]-Verfahrens

Als Additiv dienen entweder aufbereitete magnetische Schlacke (MSM) oder FeSi-Pulver. Aufgrund der deutlich höheren Feststoffdichte von FeSi muss das Verhältnis von Öl zu Magnetadditiv hierbei angepasst werden, wobei FeSi den Vorteil bietet, dass der Öl Anteil bezogen auf die Feststoffmasse auf unter 0,4 % gesenkt werden kann (siehe Zusammenfassung in Anhang 1).

In der Grafik (Abbildung 4) sind die durchschnittlichen Trennerfolge von drei Magnetseparationen bei unterschiedlichem Ölgehalt mit FeSi<125µm als Magnetadditiv dargestellt. Die Abbildung zeigt die Trennerfolge bei feuchtem Kies-Asphaltgemisch. Die

Mindestanforderung bei feuchtem Kiesasphaltgemisch kann bis zu einem Ölgehalt von mindestens 0.2% eingehalten werden, wenn die Trennscheide optimal nachgeführt wird.

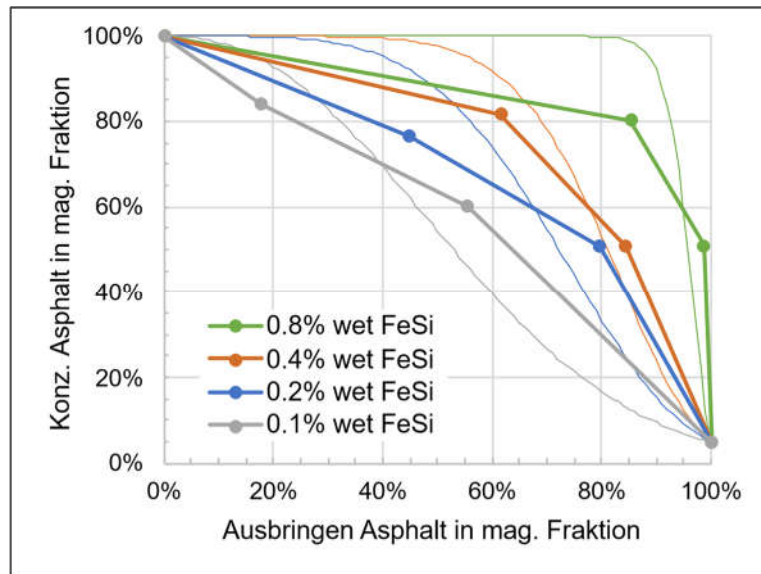


Abbildung 4: Trennerfolgskurve (Mittelwerte) bei unterschiedlichem Ölgehalt bei feuchtem Kies-Asphaltgemisch mit FeSi<125µm als Magnetadditiv.

In der folgenden Grafik (Abbildung 5) sind die durchschnittlichen Trennerfolge von drei Magnetseparationen bei unterschiedlichem Ölgehalt mit MSM<125µm als Magnetadditiv dargestellt. In der Abbildung ist zudem der Trennerfolg der Abschlussversuche der Bachelorarbeit (M. Tschopp) als 2.0% wet dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Einzelmessung. Da das Ziel dieser Arbeit ein breites Screening zur Prozessentwicklung war, wurde im Rahmen des vorgegebenen Zeitplans zugunsten der Parameter Vielfalt auf eine statistische Absicherung durch Versuchswiederholungen verzichtet.

Die grafische Darstellung der Trennerfolge mit MSM zeigt, dass die Mindestanforderungen bei einem Ölgehalt von 0.4% und weniger (bezogen auf das Feststoffgewicht) nicht mehr erfüllt werden kann.

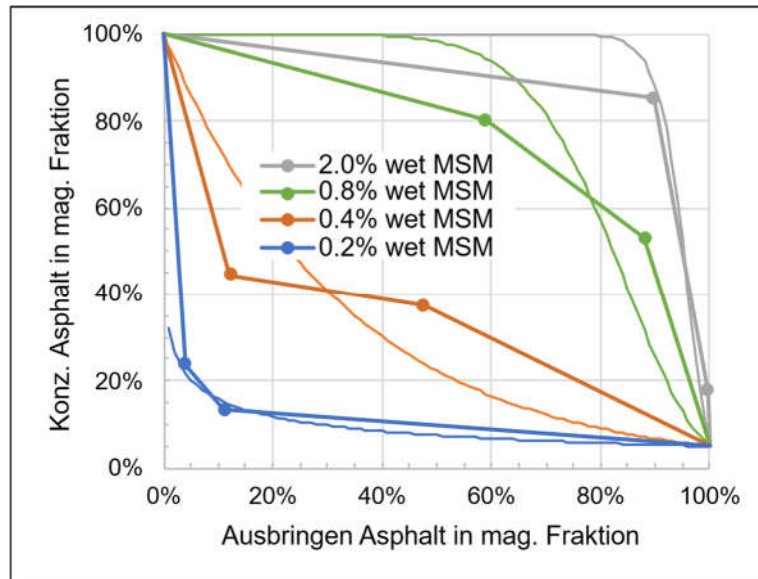


Abbildung 5: Trennerfolgskurve (Mittelwerte) bei unterschiedlichem Ölgehalt bei feuchtem Kies-Asphaltgemisch mit MSM < 125 µm als Magnetadditiv. Die grau dargestellte Trennerfolgskurve (kein Mittelwert, da Einzelmessung) dient als Referenz und zeigt den Abschlussversuch der Bachelorarbeit von Mischa Tschopp.

Interpretation der Trennkurven:

Am Beispiel der Versuchsreihe mit 0,8 % FeSi (Abbildung 4, grüne Kennlinie) lässt sich ein charakteristisches Trennverhalten beobachten:

1. Bis zu einem Ausbringen von ca. 85 % weist der Prozess eine hohe Selektivität auf, wobei die Konzentrat-Reinheit auf einem stabilen, hohen Niveau verbleibt.
2. **Kritischer Trennpunkt:** Jenseits dieses Schwellenwertes ist ein signifikanter, steiler Abfall der Reinheit im Konzentrat zu verzeichnen. Dieser Effekt resultiert daraus, dass für eine weitere Steigerung des Ausbringens zunehmend Partikel mit geringerer magnetischer Suszeptibilität oder höherem Verunreinigungsgrad in das Konzentrat überführt werden.
3. **Optimum:** Der Bereich unmittelbar vor dem Abfall der Kurve markiert das technisch-ökonomische Optimum. Hier wird das maximale Ausbringen generiert, um die geforderte Produktqualität der Klasse Cc+ und Rc+ zu erreichen, ohne diese durch übermäßige Asphaltanhaftungen zu beeinträchtigen.

4.3 Diskussion

Die im Projekt verfolgten Ziele der **Priorität I** wurden für Korngrößen > 16 mm vollständig erreicht. Der entscheidende technologische Durchbruch gelang durch die erfolgreiche Validierung der bildanalytischen Ergebnisse der MFPA Weimar, die als präzise Datengrundlage für die Kalibrierung der Sensorik dienten. Die Zusammenarbeit mit den Partnern Binder+Co und REDWAVE verlief dabei absolut reibungslos und hocheffizient. Besonders die Ergebnisse im Bereich > 16 mm verdeutlichen, dass die physikalischen Grenzen der sensorgestützten Sortierung für diese Korngröße nahezu ausgeschöpft sind. Die erreichte Trennschärfe ist mittlerweile so hoch, dass eine weitere Steigerung der Genauigkeit im Grobkornbereich kaum noch ökonomische Skaleneffekte erzielen würde. Damit gilt dieser Teilprozess als wissenschaftlich gesättigt und kann ab sofort als ausgereifte Standardlösung in die industrielle Anwendung überführt werden.

Die ursprüngliche Zielsetzung der **Priorität II** sah vor, eine sensorbasierte Unterscheidung zwischen Teer und Bitumen zu realisieren. Im Zuge der intensiven Versuchsreihen in Zusammenarbeit mit der MFPA Weimar und UMTEC wurde jedoch deutlich, dass eine rein optische Trennung dieser beiden Stoffe aufgrund ihrer nahezu identischen spektralen Signaturen physikalisch keine ausreichende Prozesssicherheit bietet. Mit *AsphaCycle*® wurde daraufhin ein konsequenter Methodenwechsel vollzogen: Anstatt auf rein optische Merkmale zu setzen, nutzt das Verfahren die stoffspezifische Hydrophobie von Asphalt zur selektiven magnetischen Markierung. Diese gezielte Neuausrichtung führt zu einer technologisch robusteren Lösung, die das Selektivitätsproblem der optischen Sortierung effizient umgeht und das Marktgebiet für die Sortierung von Korngrößen < 16mm erschließt. Durch die potenzielle Einbindung als Retrofit-Lösung bleibt das Verfahren trotz der notwendigen nassmechanischen Komponenten und des damit verbundenen Wassermanagements wirtschaftlich hochattraktiv, da bestehende Anlagen modular erweitert werden können und teure Neuinvestitionen entfallen. Den finanziellen Aufwendungen stehen Gutschriften aus mehreren Quellen gegenüber: reduzierte Deponiekosten, Verkaufserlös Sekundärmaterial, höheres Preislevel von Ökobaustoffen. Dazu kommen wichtige Umweltaspekte wie Schonung von Deponievolumen und Primärmaterial, wie auch der Entgiftung unserer Umwelt.

4.4 Bewertung

Prio I:

Der Durchbruch bei der „Schwarz-Schwarz-Trennung“ (im Korngrößenbereich > 16 mm) leistet einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Bodenschutz. Durch die präzise Identifikation des spezifischen Glanzgrads von Asphalt können belastete teerhaltige Bestandteile erstmals mit höchster Reinheit aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden. Dies verhindert die Deponierung großer Mengen an sauberem Begleitmaterial und ermöglicht die Gewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe. Die Steigerung der Recyclingquote im Bereich > 16 mm reduziert den Bedarf an Primärkies massiv und minimiert so den ökologischen Fußabdruck im Straßen- und Hochbau – ein Kernziel im Sinne der Circular Economy.

Wirtschaftlich betrachtet setzt die Validierung durch die MFPA Weimar neue Maßstäbe für die Zwisler GmbH. Die erzielte Trennschärfe führt zu einer maximalen Ausbringungsrate, wodurch Fehlwürfe (sauberes Material im Abfallstrom) nahezu eliminiert werden. Zudem wird die Energieeffizienz des Druckluftverbrauchs durch eine exakte Materialerkennung maßgeblich gesteigert. Die Ausschleusung – der physikalische Prozess, bei dem Asphaltpartikel mittels gezielter Druckluftimpulse selektiv von der Mineralik getrennt werden – arbeitet nur dann energetisch hocheffizient, wenn die Fehlquote minimiert wird. Da der Prozess im Grobkornbereich bereits seine wissenschaftliche Sättigung erreicht hat, bietet er das bestmögliche Verhältnis von technischem Aufwand zu Ertrag. Die hohe Sensorpräzision von Binder+Co und REDWAVE garantiert eine Prozessstabilität, die Stillstandszeiten reduziert und die Betriebskosten pro Tonne Material minimiert. Damit ist das Verfahren nicht nur technisch überlegen, sondern stellt eine hochrentable Investition für die industrielle Praxis dar.

Prio II (AsphaCycle®):

Der Entschluss sich nicht um jeden Preis auf die geplante Sortierung der teer- oder bitumenhaltigen-Bindemittel zu fixieren, sondern sich neu eingehend mit den Möglichkeiten zur Aussortierung von Belagstücken im Korngrößenbereich < 16 mm zu beschäftigen, hat sich auch im Nachhinein betrachtet als richtig erwiesen.

Die ökologische Relevanz des *AsphaCycle*®- Verfahrens liegt in der Erschließung der feinen Fraktionen (0,5–16 mm) für eine hochwertige Kreislaufwirtschaft. Die bisherigen Untersuchungen im Labormaßstab zeigen, dass durch die selektive magnetische Markierung selbst kleinste teerhaltige Partikel sicher gebunden und vom sauberen Gestein mit hoher Trennschärfe abgetrennt werden können. Dies erlaubt, dass auch feinkörnig belastete Materialien in saubere und verwertbare Sekundärbaustoffe überführt werden können. Die Rückgewinnung von sortenreinem Feinmaterial schont natürliche Ressourcen und reduziert das Aufkommen an belastetem Abfall massiv. Trotz des notwendigen Wassermanagements bietet dieser Ansatz das Potenzial, Stoffkreisläufe zu schließen, die bislang technisch nicht zugänglich waren, und dabei die wirtschaftlichen wie auch ökologischen Anforderungen zu erfüllen.

Wirtschaftlich ist das Verfahren durch den „Retrofit-Gedanken“ besonders attraktiv, da die modulare Einbindung der nassmechanischen Stufe eine kosteneffiziente Aufrüstung bestehender Infrastruktur verspricht. Zudem wurde durch die Nutzung des hydrostatischen Auftriebs im Wasserbad eine Trennmethode etabliert, die selbst bei massereichen Partikeln (bis 16 mm) energetisch hocheffizient arbeitet und die hohen Betriebskosten herkömmlicher Druckluftausblausysteme umgeht. Obwohl für den Transfer in den industriellen Maßstab noch weitere Versuchsreihen erforderlich sind, ist der ökonomische Mehrwert bereits absehbar: Durch die Vermeidung hoher Deponiekosten und die Erzeugung marktfähiger Sekundärprodukte wird das Recycling von mit teerhaltigen Partikeln belastetem Feinkorn erstmals wirtschaftlich kalkulierbar. Zudem erfüllt *AsphaCycle*® durch den Verzicht auf thermische Prozesse und Gefahrstoffe höchste Ansprüche an den Umweltschutz und die behördliche Genehmigungsfähigkeit.

In Europa könnten zukünftig sehr große Mengen teerhaltiger Massenströme mit den beiden Technologien (Prio I + II) aufbereitet werden. Prognosen zufolge liegt das jährliche Aufbereitungsvolumen für PAK-kontaminiertes Material in Deutschland bei circa 2,0

Millionen Tonnen. Auf europäischer Ebene skaliert dieses Potenzial auf ein jährliches Gesamtaufkommen von bis zu 18,0 Millionen Tonnen. Durch die Anwendung der Verfahren ließe sich ein signifikanter Anteil dieser Massenströme dekontaminieren und als hochwertige Sekundärressource in den Materialstoffkreislauf rückführen.

4.5 Öffentlichkeitsarbeit

Um hochwertiges Asphaltrecycling europaweit zum neuen Stand der Technik zu machen, verfolgt die Zwisler GmbH eine bewusste Open-Source-Strategie. Das übergeordnete Ziel ist die Etablierung eines Branchenstandards, weshalb auf eine exklusive Rechteverwertung verzichtet wird. Stattdessen soll das gewonnene Know-how der gesamten Recyclingindustrie zugänglich gemacht werden, um durch aktiven Wissensaustausch und gemeinschaftliche Weiterentwicklung Synergieeffekte innerhalb der Kreislaufwirtschaft zu nutzen.

Erste Meilensteine dieses Transfers wurden bereits durch den Partner Binder+Co gesetzt, der die Ergebnisse der Priorität I durch optische Maschinenversuche auf den Weltleitmessen Bauma 2022/2025 sowie der IFAT 2024 in München präsentierte. Diese aktive Bewerbung der technischen Machbarkeit und der wirtschaftlichen Vorteile soll die Marktentwicklung beschleunigen und eine flächendeckende, hochwertige stoffliche Verwertung von Straßenbauabfällen sicherstellen.

Im Gegensatz zum Grobkornbereich wurde für die Ergebnisse des *AsphaCycle*[®]-Verfahrens hingegen bislang bewusst auf jegliche Öffentlichkeitsarbeit verzichtet. Da sich das Verfahren zur Trennung der Feinanteile (0,5–16 mm) derzeit noch im Labormaßstab befindet, stünden öffentliche Vorfürungen zum jetzigen Zeitpunkt im Widerspruch zur notwendigen Geheimhaltung während des laufenden Patentverfahrens (Anmeldung 22.09.2025 durch Zwisler GmbH). Um die Erteilung des Patents für *AsphaCycle*[®] nicht durch eine neuheitsschädliche Offenlegung zu gefährden, werden technische Details und Versuchsergebnisse vorab weiterhin streng vertraulich behandelt. Parallel dazu wurden bereits die Namensrechte für *AsphaCycle*[®] gesichert, um die Identität des Verfahrens für die spätere Markteinführung rechtlich zu schützen. Da für die industrielle Skalierung der selektiven magnetischen Markierung noch weitere Versuchsreihen erforderlich sind, bleibt die Kommunikation bis zur finalen Validierung auf den internen Projektkreis beschränkt. Im Falle einer erfolgreichen Skalierung in den technischen Maßstab (angestrebtes Folgeprojekt) ist beabsichtigt ausreichend Öffentlichkeitsarbeit zu betreiben, damit diese Technologie in Form von Lizenzvergaben weitflächig zum Stand der Technik werden kann.

4.6 Fazit

Die technologische Anwendung im Grobkornbereich (>16 mm) hat ihre hohe ökonomische Effizienz bereits unter Beweis gestellt. Die implementierten optischen Sortiersysteme erzielen stabile Durchsatzraten von bis zu 60 t/h. Die Refinanzierung der Investitionskosten erfolgt dabei synergetisch: Einerseits durch hohe Annahmeerlöse für das asphaltthaltige Material, andererseits durch signifikant reduzierte Aufwendungen für die Reststoffbeseitigung sowie der Verkaufserlöse von Sekundärbaustoffen. Seit Ende 2025 wird diese Technologie unter der Federführung von Binder+Co (Ansprechpartner Georg Schinnerl) erfolgreich im industriellen Maßstab eingesetzt und von Recyclern

genutzt. Damit wurde die sensorgestützte Separation in diesem Segment erfolgreich als neuer Stand der Technik definiert.

Während das Grobkornsegment bereits die Marktreife erreicht hat, markiert das *AsphaCycle*[®]-Verfahren für den Bereich 0,5 bis 16 mm eine technologische Evolution. Da für diese Feinanteile für die vorliegende Aufgabenstellung bisher keine marktfähigen Sortierlösungen existieren, schließt *AsphaCycle*[®] eine kritische Lücke der Kreislaufwirtschaft. Obwohl der funktionale Nachweis im Labormaßstab erbracht wurde, ist der weitere Weg zur großtechnischen Verifizierung kosten- und ressourcenintensiv. Die Überführung der im Labor ermittelten Parameter in reale industrielle Lastbedingungen erfordert eine hochspezialisierte Begleitung und umfangreiche Testreihen unter Praxisbedingungen. Eine fortgesetzte Förderung durch die DBU ist hierbei das entscheidende Instrument, um die technologische Lücke zwischen Forschung und breiter Marktanwendung zu schließen. Nur so kann sichergestellt werden, dass diese wissenschaftlich validierte Lösung zeitnah als neuer Industriestandard für die Feinkornaufbereitung etabliert wird.

5. Anhänge

- A1 - *Zusammenfassung AsphaCycle® nass*, FH OST, Mischa Tschopp
- A2 - *Abtrennung von Asphaltpartikeln aus der nassen Bauschutttaufbereitung*, FH OST, Bachelorarbeit Mischa Tschopp
- A3 – *Prüfbericht Nr. B 28.21.133.01*, MFPA, Dr.-Ing. E. Linß und M. Sc. J. Walz