

Impressum

Auftraggeber : Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Abfall und Rohstoffe, CH-3003 Berne
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer : CSD Ingénieurs SA

Autoren : Alexander Flacher, Eric Säuberli

Begleitung BAFU : Clara-Marine Pellet und David Hiltbrunner

Hinweis : Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Titelbild : Staat Freiburg – Amt für Umwelt – 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	11
1.1	Mandat.....	11
1.2	Grundlagen der Studie	12
2	Problemstellung - Rahmenbedingungen und Ziel der Arbeit.....	13
2.1	Generell zu lösende Problemstellung.....	13
2.2	Rechtliche, regulatorische und normative Grundlagen in der Schweiz.....	15
2.3	Zusammenfassung des rechtlichen und regulatorischen Rahmens der Nachbarländer	21
2.3.1	Frankreich.....	22
2.3.2	Belgien.....	23
2.3.3	Italien	25
2.3.4	Deutschland.....	26
2.3.5	Österreich	27
2.3.6	Niederlande	28
2.3.7	Zusammenfassung	30
2.4	Maximal zulässiger Gehalt an rezyklierten Bitumengranulaten gemäss Strassenverkehrsnormen und Stand der Technik	31
2.4.1	Situation in der Schweiz	31
2.4.2	Situation in der Europäischen Union	34
2.5	Aktueller Stand der Verwertungs-, Behandlungs- und Entsorgungssektoren in der Schweiz und im Ausland.....	39
2.5.1	Lage in der Schweiz	39
2.5.2	Lage in der Europäischen Union	40
2.6	Schätzung zukünftiger Mengen an in der Schweiz anfallendem Bitumenabfall und nicht wiedergewonnener Überschüsse.....	46
2.6.1	Ergebnisse der Studie "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz"	46
2.6.2	Zusammenfassung des zu lösenden Problems und der zu behandelnden nicht verwerteten Mengen	48
3	Stand der Technik - Behandlungsanlagen.....	52
3.1	Übersicht – Gesamtansicht	52
3.2	Thermische Behandlung	54
3.2.1	Thermische Behandlung in einer spezialisierten Anlage	54
3.2.2	Thermische Behandlung in Zementwerken.....	66
3.2.3	Pyrolyse.....	69
3.3	Mechanische Bearbeitung.....	70

3.3.1	Allgemeine Beschreibung des Prozesses	70
3.3.2	Stand der Technik	70
3.3.3	Flussdiagramme und Qualität der aus der Behandlung resultierenden Fraktionen	72
3.3.4	Wirtschaftliche Aspekte	76
3.3.5	Umweltschutz	77
3.4	Chemisch-physikalisches Reinigungsverfahren	78
3.4.1	Verfahrensübersicht	78
3.4.2	Stand der Technik	80
3.4.3	Materialflüsse	81
3.4.4	Produktqualität	82
3.4.5	Wirtschaftlichkeit	83
3.4.6	Umweltaspekte	84
3.4.7	Risiken	85
3.4.8	Zusammenfassung	85
3.5	Kombinierte Behandlung	86
3.5.1	Allgemeine Beschreibung des Prozesses	86
3.5.2	Stand der Technik	86
4	Zukunftsszenarien für die Bewirtschaftung und Behandlung von Ausbauphosphat in der Schweiz.....	87
4.1	Übersicht zu den anfallenden Mengen und Verwertungsmöglichkeiten pro Kategorie	87
4.2	Bituminöse Abfälle mit PAK-Gehalten > 250 mg / kg	88
4.2.1	Behandlung in einer speziellen thermischen Anlage im Ausland (Niederlande)	88
4.2.2	Behandlung in einer oder mehreren neuen thermischen Verwertungsanlagen in der Schweiz	89
4.2.3	Behandlung in einem Zementwerk in der Schweiz	90
4.2.4	Pyrolyse in der Schweiz	90
4.2.5	Mögliche Vorbehandlungen zur Trennung des Bindmittels vom mineralischen Anteil	91
4.3	Potenziell verwertbare bituminöse Abfälle mit PAK-Gehalten < 250 mg / kg	92
4.4	Zusammenfassung - bevorzugte Szenarien	94
4.4.1	Allgemeine Aspekte	94
4.4.2	Wirtschaftliche Aspekte	94
4.4.3	Zusammenfassung	96
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	100

6	Literaturverzeichnis	105
----------	-----------------------------------	------------

Anhangsverzeichnis

Anhang A	Liste der kontaktierten Unternehmer	108
Anhang B	Schätzung der zu behandelnden Abfallmengen pro Kanton	110
Anhang C	Wirtschaftliche Übersichtstabelle.....	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundsätze der Verwertung von mineralischen Baustellenabfällen (Quelle: BAFU, 2010)	17
Abbildung 2: Anforderungen an die Qualität der zurückgewonnenen Materialien (Quelle: BAFU, 2010)	18
Abbildung 3: Verwendungsmöglichkeiten der sechs Recyclingbaustoffe	19
Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Strassenaufbaus (Quelle: Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz, Energie- und Ressourcen-Management GmbH)	31
Abbildung 5: Maximal mögliche Zugabemengen an Recyclingasphalt	36
Abbildung 6: Gesamtproduktion von Heiss- und Warmasphalt in der EU-28 und EU-28 plus Norwegen, der Schweiz und der Türkei im Zeitraum 2008-2018 (Daten entnommen aus [9])	40
Abbildung 7: Anwendung in Deckschicht, Binderschicht und Tragschicht als Prozentsatz der Gesamtproduktion 2018 2018 (Daten entnommen aus [9])	40
Abbildung 8: Gesamtproduktion von Heiss- und Warmasphalt in der Schweiz und nahegelegenen Ländern im Zeitraum 2008-2018 (Daten entnommen aus [9])	41
Abbildung 9: Asphaltproduktion und Asphaltwiederverwendung in Deutschland (Deutscher Asphaltverband, 2020)	43
Abbildung 10: Anteil recyceltes Asphaltgranulat in Deutschland (Deutscher Asphaltverband, 2020)	43
Abbildung 11: Asphaltproduktion in den Niederlanden und die Verfügbarkeit von Recyclingasphalt (entnommen aus [13])	44
Abbildung 12: Zusammenfassung der in der Schweiz für den Zeitraum 2018-2035 erzeugten bituminösen Abfälle	46
Abbildung 13: Bituminöse Abfälle, die bis 2026-2035 gemäss den verschiedenen Szenarien nicht verwertet werden.	49
Abbildung 14: Verteilung der zu behandelnden Mengen nach Kantonen (in Prozent) auf der Grundlage des Strassenproduktionsflusses	51
Abbildung 15: Prinzip der Trennung der mineralischen Fraktion vom Bindemittels bzw. der bindemittelreichen Fraktion	53
Abbildung 16: Übersicht zu den Inputs und Outputs im thermischen Reinigungsverfahren von REKO	55

Abbildung 17: Prozessschema der thermischen Reinigung bei REKO B.V.	55
Abbildung 18: Massenflussdiagramm der thermischen Reinigungsverfahren von REKO (entnommen aus [17])	57
Abbildung 19: Anzahl der Schiffe für den Abtransport der gleichen Tonnage [20]	59
Abbildung 20: Pegelstände Kaub und Maxau (01/2000 bis 11/2020). Datenquelle: Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)	59
Abbildung 21: Wasserstandsganglinien des Pegels Kaub aus den Jahren 2002 und 2003 mit Havarien. Datenquelle: Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)	60
Abbildung 22: Netto Ergebnisse in der Kategorie Klimawandel für den Vergleich der thermischen Verwertung in den Niederlanden (orange) und der Verwertung auf der Deponie in Deutschland (blau) für best case (Entstehungsort in Mannheim) und worst case (Entstehungsort in Schönau) Szenarien. [17]	62
Abbildung 23: Resultate für die weiteren Wirkungskategorien aus der Ökobilanz des Fraunhofer Instituts zur thermischen Verwertung in den Niederlanden gegenüber der Verwertung im Deponiebau in Deutschland. [17]	63
Abbildung 24: Karte der Schweizer Zementwerke [Quelle: Cemsuisse]	67
Abbildung 25: Zementklinker Herstellung am Beispiel eines Kalzinatorofens [Quelle: GTZ-Holcim]	67
Abbildung 26: Schematische Darstellung einer Pyrolyseanlage	69
Abbildung 27: Flussdiagramm einer mechanischen Behandlung, die eine Trennung von Körnern > 8mm ermöglicht.	73
Abbildung 28: Flussdiagramm einer mechanischen Behandlung, die eine Trennung von Körnern > 2mm ermöglicht.	75
Abbildung 29: Übersicht zum chemischen Reinigungsverfahren von HEMO Recycling	78
Abbildung 30: Ablauf der chemisch-physikalischen Reinigung von Ausbauasphalt und Fräsgut	80
Abbildung 31: Übersicht der ARCA Reinigungsanlage in 2D und 3D. Der Platzbedarf für eine grosstechnische Reinigungsanlage mit 60'000-120'000 t/Jahr soll gemäss HEMO Recycling AG 20 x 30 Meter betragen [29].	81
Abbildung 32: Massenflussdiagramm des chemisch-physikalischen Reinigungsverfahrens gemäss HEMO Recycling AG	82
Abbildung 33: Asphaltgranulat 16/70 vor (links) und nach (rechts) der chemischen Reinigung	83
Abbildung 34: Maximale Mengen an Ausbauasphalt, die gemäss den verschiedenen Szenarien behandelt werden sollen.	87
Abbildung 35: Zusammenfassung der wirtschaftlichen Bewertungen der verschiedenen Behandlungssektoren	98
Abbildung 36: Maximale Mengen an Ausbauasphalt, die gemäss den verschiedenen Szenarien behandelt werden sollen.	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die zulässigen Verwertungsmethoden in der Schweiz (einschliesslich geplanter Entwicklungen)	16
Tabelle 2: Zusammenfassung der in Frankreich zugelassenen Wiederherstellungskanäle (einschliesslich geplanter Änderungen)	22
Tabelle 3: PAK-Grenzwert für die Verwendung als Baumaterial (Quelle: VLAREMA Anhang 2.3.2.A)	24
Tabelle 4: Zusammenfassung der in der belgischen Region Wallonien zugelassenen Verwertungswege	24
Tabelle 5: Zusammenfassung der in Italien zugelassenen Verwertungswege	25
Tabelle 6: Verwertungsklassen in Deutschland gemäss «RuVA-StB 01 (Fassung 2005)», entnommen aus [4]	26
Tabelle 7: Zusammenfassung der zugelassenen Verwertungsmethoden in Deutschland	27
Tabelle 8: Zulässige PAK-Gehalte und Einsatzarten für die verschiedenen Qualitätsklassen in Österreich	28
Tabelle 9: Zulässige PAK-Gehalte und Einsatzarten in den Niederlanden	29
Tabelle 10: Vergleichende Zusammenfassung der zugelassenen Sektoren für die Schweiz und die EU	30
Tabelle 11: Bitumenmischungen, zulässige Mengen von Mischungen sowie von Mischungen nach Schichten, Arten und Arten von Mischungen (SN 640 431-1b-NA)	32
Tabelle 12: Vergleich des maximal zulässigen Gehalts an rezyklierten Bitumenaggregaten gemäss dem VSS-Standard, dem ASTRA-Handbuch und dem zukünftigen Leitfaden «Kies für Generationen», der erstellt wird.	33
Tabelle 13: Maximal zulässiger Gehalt an recycelten Zuschlagstoffen in Frankreich	35
Tabelle 14: Maximal zulässiger Gehalt an Bitumenaggregaten, die im Strassenbau in Belgien zulässig sind.	35
Tabelle 15: Maximal zulässige Recyclinganteile pro Schicht in Deutschland (entnommen aus [5])	37
Tabelle 16: Maximal zulässige Recyclinganteile pro Schicht in den Niederlanden (entnommen aus [5])	37
Tabelle 17: Vergleichende Zusammenfassung des maximal zulässigen Gehalts an recycelten Gesteinskörnungen für die Schweiz und für ausgewählte Länder der EU	38
Tabelle 18: Materialbilanz von Ausbausphalt nach Verwertungssektor (Quelle: Rubli, 2020)	39
Tabelle 19: Zusammenfassung zu den produzierten Asphaltmengen, dem Aufkommen an bituminösen Granulaten und der Verwertungsrate in der Schweiz und ausgesuchten Ländern der EU	45
Tabelle 20: Definition von Szenarien basierend auf unterschiedlichen Annahmen zu Verwertungsraten im Strassenbau	48
Tabelle 21: Zusammenfassung der überschüssigen Mengen, die nicht zur Behandlung zurückgewonnen wurden	49
Tabelle 22: Vereinfachte Zusammenfassung der Partikelgrössenverteilung der verschiedenen Schichten.	51
Tabelle 23: Übersicht zu den thermischen Reinigungsanlagen in den Niederlanden	56

Tabelle 24: Zusammensetzung der Betriebskosten bei der chemischen Reinigung von HEMO Recycling AG	84
Tabelle 25: Zusammenfassung zu den geschätzten Behandlungskosten für die verschiedenen Verwertungswege	96
Tabelle 26: Zusammenfassung zu den Eigenschaften der verschiedenen Behandlungskanäle	99

Abkürzungen

ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
EAPA	European asphalt pavement association
EN	Europäische Norm
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (France)
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAK < 250 mg/kg	PAK-Gehalt weniger als 250 mg/kg (oder ppm)
PAK > 250 mg/kg	PAK-Gehalt grösser als 250 mg/kg (oder ppm)
SMA	Splittmastixasphalt
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutzgesetz
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen

Definitionen

Bitumenaggregate oder Asphaltaggregate	Sortiertes und gebrochenes Material aus dem Fräsen oder Abbruch von bituminösen Belägen, bestehend aus Bitumen, Füllstoffen (sehr feine Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser von weniger als ca. 0.1 mm), groben und feinen Gesteinskörnungen.
Ausbauasphalt	Ausbauasphalt bezeichnet den durch schichtweises Kaltfräsen eines Asphaltbelages gewonnenen kleinstückigen Fräsasphalt und den beim Aufbrechen bituminöser Schichten in Schollen anfallenden Aufbruchasphalt.
Bitumen	Bitumen ist ein Produkt der Erdöldestillation und besteht aus Kohlenwasserstoffverbindungen mit nur einem sehr geringen Anteil an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) [1].
Gestehungskosten	In dieser Studie werden die Kosten als die Gesamtkosten des Betreibers für die Handhabung von einer Tonne Abfall definiert. Diese Gesamtkosten sind die Summe der Fixkosten (einschliesslich der Amortisation von Investitionen) und der Betriebskosten der Behandlungsanlage.
Teer	Teer ist ein Produkt, das nach der Verkokung (Pyrolyse) von Kohle und der anschliessenden Destillation von rohem Teer erhalten wird. Es besteht fast ausschliesslich aus aromatischen Kohlen-

wasserstoffverbindungen mit hohen Anteilen an PAK und Phenolverbindungen. Seine Anwesenheit in Strassenasphalt macht es zu einem gefährlichen und umweltkritischen Baumaterial [1].

Kaltverwertung

Verwendung in nicht gebundener Form in Fundamenten

ODER

Verwendung in gebundener Form bei der Herstellung von Kaltmischungen (5°C - 30°C), die in einer zentralisierten Anlage oder vor Ort produziert werden können und deren Aufbereitungsstufen wie folgt sind: Fragmentierung und mögliche Zugabe von Wasser und frischen Gesteinskörnungen zur Korrektur der Korngrössenverteilung, Zugabe eines kalten Bindemittels: entweder ein bituminöses Bindemittel in Form einer Emulsion oder eines Bitumenschaums oder ein bituminöses Bindemittel mit einem Zusatz von hydraulischem Bindemittel (Zement oder Kalkhydrat).

Warmverwertung

Verwendung in gebundener Form bei der Herstellung von Heissmischungen ($> 140^{\circ}\text{C}$), die in einer zentralisierten Anlage oder vor Ort erzeugt werden können - Erhitzen, um die Mischung zu erweichen, und Regenerierung des Bitumens durch Zugabe von Additiven.

Der vorliegende Bericht geht von einem Verbot der Deponierung aller bituminösen Abfälle ab dem 1. Januar 2026 aus. Diese Frist wurde in der Entwurfphase bis zum 1. Januar 2031 verlängert. Dies gilt auch für den Phase I-Bericht "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz", der von der Energie- und Ressourcen-Management GmbH im August 2020 erstellt wurde.

1 Einführung

1.1 Mandat

Aufgrund der neuen Bestimmungen der VVEA ab 2026 und insbesondere dem Verbot der Deponierung und baulichen Verwertung von bituminösen Abfällen mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250 mg / kg, möchte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) ein klares Bild der aktuellen Situation und Entwicklungen haben, um zukünftige Behandlungsmöglichkeiten dieser Abfälle in der Schweiz zu beurteilen.

In diesem Zusammenhang beauftragte das BAFU im Mai 2020 die CSD Ingenieure AG mit einer technischen und wirtschaftlichen Analyse der Entwicklung und Entsorgung von bituminösen Abfällen in der Schweiz, um auf dieser Grundlage Empfehlungen zu erarbeiten, die für die nationale Planung von Behandlungseinrichtungen für den Zeitraum 2026 - 2035 erforderlich sind.

Ziel der Studie ist es insbesondere, einen Überblick zum Stand der Technik verschiedener Verfahren und Behandlungsanlagen von bituminösen Abfällen in der Schweiz und in Europa zu etablieren, um die Schlüsselfaktoren für die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer (oder mehrerer) Aufbereitungsanlage(n) auf nationalem Boden klar zu identifizieren und konkrete Empfehlungen für die Zukunft abzuleiten.

Dieser Bericht stellt ein Referenzdokument zum aktuellen und zukünftigen Stand der Aufbereitung bituminöser Abfälle dar, um die Grundlagen für die Umsetzung der gewünschten Strategie festlegen zu können, welche insbesondere die folgenden Aspekte umfasst:

- Umsetzung der Prinzipien des Kreislaufwirtschaftsmodells mit Erhöhung der Materialrückgewinnungsrate.
- Gewährleistung Versorgungssicherheit im Zusammenhang mit der Anwendung der neuen VVEA-Bestimmungen ab 2026.
- Gewährleistung der ökologischen und wirtschaftlichen Relevanz der empfohlenen Lösungen, indem gegebenenfalls die Hebel oder Massnahmen festgelegt werden, die hinsichtlich der Rahmenbedingungen und gegebenenfalls der rechtlichen Grundlagen umzusetzen sind.

Auf dieser Grundlage ist der Bericht wie folgt gegliedert:

- Problemstellung – Rahmenbedingungen und Ziel der Arbeit (Kapitel 2)
- Stand der Technik - Behandlungsanlagen (Kapitel 3)
- Zukunftsszenarien für die Bewirtschaftung und Behandlung von bituminösen Abfällen in der Schweiz (Kapitel 4)
- Schlussfolgerungen und Empfehlungen (Kapitel 5)

1.2 Grundlagen der Studie

Die Studie wurde auf der Grundlage der Ergebnisse der parallel durchgeführten Studie des Büros Energie- und Ressourcen-Management GmbH (Dr. S. Rubli) durchgeführt und darauf abgestimmt. Das Ziel dieser Studie war es, die aktuellen und zukünftigen Mengen bituminöser Abfälle (2026-2035) anhand von 4 Szenarien zu erfassen, wobei in den Szenarien zwischen den Kategorien mit PAK-Gehalt über und unter 250 mg/kg unterschieden wurden. Diese Studie war Gegenstand eines im August 2020 veröffentlichten Abschlussberichts "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz".

Darüber hinaus wurde eine bibliografische Arbeit durchgeführt, um die Grundsätze der Entsorgung bituminöser Abfälle in der Schweiz und der Europäischen Union zu bestimmen und auch eine Bestandsaufnahme der verschiedenen bestehenden oder geplanten Aufbereitungsanlagen in diesen Regionen vorzunehmen. Die Referenzdokumente können im Literaturverzeichnis am Ende dieses Dokuments gefunden werden.

Parallel dazu werden verschiedene Organisationen und Einrichtungen kontaktiert, die auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft, der Herstellung von Asphaltmischgut oder einem anderen mit dieser Studie verbundenen Bereich tätig sind (z.B. Dach- / Berufsverbände, Forschungsinstitute / Universitäten, Verwaltungen oder Unternehmen), um möglichst vollständige Informationen zu erhalten. Die in Anhang A aufgeführten Stellen wurden kontaktiert, um entweder das Thema im Allgemeinen zu besprechen oder um spezifische Fragen zu klären.

2 Problemstellung - Rahmenbedingungen und Ziel der Arbeit

2.1 Generell zu lösende Problemstellung

In der Schweiz stellen bituminöse Materialien aus Strassenabbruch ein erhebliches Abfallvolumen dar, das je nach Gehalt an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) gemäss den Bestimmungen der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) über unterschiedliche Entsorgungs-/Verwertungskanäle entsorgt wird.

Zur Erinnerung: Bitumenhaltiger Asphalt ist ein Gemisch aus einem bituminösem Bindemittel und Gesteinskörnungen, dessen PAK-Gehalt mit dem Vorhandensein von Teer im Bindemittel zusammenhängt. In der Tat wurde in der Schweiz eine Mischung "Bitumen-Teer" als Bindemittel verwendet, bis der Einsatz von teerhaltigen Bindemitteln in den Jahren 1985-1986 verboten wurde. Seit dieser Zeit wurden nur Bindemittel auf Basis von Bitumen verwendet. Letzteres wird aus der Destillation von Erdöl gewonnen und enthält sehr wenige PAK, wodurch es viel weniger schädlich als Teer ist.

Im Rahmen einer globalen Reflexion über die Bewirtschaftung von bituminösen Abfällen und die Entwicklung eines Kreislaufwirtschaftsmodells müssen neue Kanäle für die Rückgewinnung / Aufbereitung von bituminösen Abfällen eingerichtet werden, insbesondere durch Verknüpfung mit den folgenden zwei geplanten Entwicklungen:

- Ab dem 1. Januar 2026 können bituminöse Abfälle mit einer PAK-Konzentration von mehr als 250 mg / kg laut VVEA nicht mehr direkt im Bau verwertet oder auf Deponien gelagert werden.
- Aufgrund des Mangels an Deponievolumen in mehreren Kantonen und um das Prinzip der Kreislaufwirtschaft zu entwickeln, plant das BAFU die Deponierung von bituminösen Abfällen ab 1. Januar 2026 generell zu verbieten unabhängig von ihrem PAK-Gehalt.

Derzeit ist die Behandlung in einer spezialisierten thermischen Anlage in den Niederlanden der einzig mögliche Behandlungsweg für Abfälle mit einem hohen PAK-Gehalt (> 1'000 mg / kg gemäss den geltenden Vorschriften; > 250 mg / kg ab 2026). In den thermischen Aufbereitungsanlagen werden die im Bindemittel enthaltenen PAK zerstört und die mineralischen Gesteinsfraktionen können zurückgewonnen werden. Um nicht von einem einzigen Entsorgungsweg abhängig zu sein, muss die Thematik der Behandlung teerhaltiger Abfälle auf nationaler Ebene angegangen werden.

Bei Abfällen mit einem PAK-Gehalt unter 250 mg / kg ist das Verfahren zur Rückgewinnung von bituminösen Granulaten für den Strassenbau bereits gut etabliert, erlaubt es aber derzeit nicht, die Gesamtmenge der anfallenden Abfälle zu absorbieren (Anforderungen der Strassennormen; Technologie der Asphaltproduktionsanlagen; Praktiken und Gewohnheiten der verschiedenen Akteure im Bauwesen usw.).

Auf dieser Grundlage werden im Folgenden die verschiedenen zu berücksichtigenden Punkte aufgeführt, die im weiteren Verlauf des Berichts ausführlicher behandelt werden:

- Allgemein betrachtet hängt die maximal verwertbare Gesamtmenge an bituminösem Abfall (als Granulat) im Strassenbau von den folgenden Elementen ab:
 - Der maximal zulässige Gehalt in den einzelnen Schichten (Normen / konkrete Praktiken).
 - Die zukünftige Grösse der Asphaltfläche bestimmt "Angebot vs. Nachfrage" für die Recyclinggranulate. Tatsächlich ist in der Vergangenheit und bis in die nahe Zukunft mit einer relativ grossen Erweiterung des Strassennetzes und der Asphaltfläche zu rechnen, was zu einer erheblichen Nachfrage an rezyklierten Zuschlagstoffen führt. Die in Bezug auf Raumplanung und Mobilität festgelegten Richtlinien werden mittelfristig die Erstellung neuer Strassen oder Asphaltplätze stark einschränken, was die potenzielle Nachfrage nach rezyklierten bituminösen Zuschlagstoffen begrenzen wird. Um nicht mit

grossen Mengen überschüssiger, nicht verwerteter bituminöser Granulate konfrontiert zu werden, muss der Anteil rezyklierter Granulate, die für die Reparaturarbeiten am bestehenden und zukünftigen Strassennetz verwendet werden, erheblich erhöht werden.

- ➔ Diese verschiedenen Elemente wurden im Rahmen der vom BAFU in Auftrag gegebenen und parallel durchgeführten Studie "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz" der Energie- und Ressourcen-Management GmbH (Dr. S. Rubli) modelliert. Dies war Gegenstand eines separaten Berichts, der im August 2020 veröffentlicht wurde und dessen Ergebnisse in Kapitel 2.6.1 zusammengefasst sind.
- Bituminöse Abfälle mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250 mg / kg:
 - In Anbetracht des Verbots der Deponierung und der direkten Verwertung in der Bauindustrie ab 2026 wird es notwendig sein, Verfahren zu implementieren, die die Schadstoffe eliminieren oder die problematische Fraktion abtrennen (die in jedem Fall eliminiert werden muss).
- Bituminöse Abfälle mit einem PAK-Gehalt von weniger als 250 mg / kg:
 - Zu viel dieser Abfälle werden auf Deponien entsorgt (Typ B). Es ist daher notwendig, die Rückgewinnung von Bitumenaggregaten im Rahmen des Strassenbaus zu optimieren, indem verschiedene Hebel aktiviert werden: Weiterentwicklung des normativen Rahmens; Weiterentwicklung der Technologie von Asphaltproduktionsanlagen; Sensibilisierung der verschiedenen Akteure im Bausektor, bessere Integration dieses Ziels in die Ausschreibungskriterien; ...
 - Sollte trotz dieser Bemühungen zur Förderung des Recyclings bituminöser Gesteinskörnungen im Strassenbau mittel- / langfristig ein Überschuss an nicht verwerteten Gesteinskörnungen verbleiben, müssen andere Aufbereitungswege implementiert und entwickelt werden, die eine selektive Rückgewinnung der verschiedenen Bestandteile bituminöser Gesteinskörnungen (Bindemittel oder bindemittelreiche Fraktionen; mineralische Gesteinskörnungen) ermöglichen.

2.2 Rechtliche, regulatorische und normative Grundlagen in der Schweiz

Basierend auf den Bestimmungen des Bundesgesetzes über den Umweltschutz (USG) ist die wichtigste Rechtsgrundlage für die Entsorgung von bituminösen Abfällen in der Schweiz die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA). Neben den Bestimmungen der VVEA sind weitere Richtlinien zu berücksichtigen, beispielsweise die Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle, BAFU 2006, 2. aktualisierte Auflage 2010, welche die Grundsätze und Anforderungen für die Verwertung von mineralischen Bauabfällen, einschliesslich bituminöser Abfälle, festlegt. Letztere soll jedoch in naher Zukunft ersetzt werden.

Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) vom 4. Dezember 2015 (Stand 1. Januar 2018)

Im Sinne der VVEA gehören bituminöse Abfälle zu den Baustellenabfällen, die als "Abfälle, die bei Neubau-, Umbau- oder Rückbauarbeiten von ortsfesten Anlagen anfallen" definiert sind.

In den nachfolgend zitierten Artikeln 20 und 52 werden die Bedingungen für die Verwertung von Abfällen aus dem Abbruch von Bauwerken und insbesondere von bituminösen Materialien festgelegt. Darüber hinaus gehören gemäss Anhang 5, Kapitel 2.1, e. der VVEA "Ausbauasphalt mit einem Gehalt bis zu 250 mg PAK pro kg" zu den Abfällen, die derzeit auf Deponien des Typs B angenommen werden.

- **VVEA - Art. 20 Mineralische Abfälle aus dem Abbruch von Bauwerken**

¹ *Ausbauasphalt mit einem Gehalt bis zu 250 mg PAK pro kg, Strassenaufbruch, Mischabbruch und Ziegelbruch ist möglichst vollständig als Rohstoff für die Herstellung von Baustoffen zu verwerten.*

² *Ausbauasphalt mit einem Gehalt von mehr als 250 mg PAK pro kg darf nicht verwertet werden. [...]*

- **VVEA - Art. 52 Ausbauasphalt**

¹ *Ausbauasphalt mit einem Gehalt von mehr als 250 mg PAK pro kg darf im Rahmen von Bauarbeiten bis zum 31. Dezember 2025 verwertet werden, wenn:*

- a. der Ausbauasphalt höchstens 1000 mg PAK pro kg enthält und in geeigneten Anlagen so mit anderem Material vermischt wird, dass er bei der Verwertung höchstens 250 mg PAK pro kg enthält; oder*
- b. der Ausbauasphalt mit Zustimmung der kantonalen Behörde so verwendet wird, dass keine Emissionen von PAK entstehen. Die kantonale Behörde erfasst den genauen Gehalt an PAK im Ausbauasphalt sowie den Standort der Verwertung und bewahrt die Informationen während mindestens 25 Jahren auf.*

² *Ausbauasphalt mit einem Gehalt von mehr als 250 mg PAK pro kg darf bis zum 31. Dezember 2025 auf einer Deponie des Typs E abgelagert werden.*

Auf dieser Grundlage sind die verschiedenen in der Schweiz zugelassenen Entsorgungs-/Verwertungswege nach ihrem Gehalt an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) mit Angabe der zu erwartenden Entwicklung ab dem 1. Januar 2026 in der untenstehenden Tabelle 6 zusammengefasst.

In Tabelle 6 sind auch Informationen enthalten, die durch das BAFU übermittelt wurden, welches die Deponierung bituminöser Abfälle generell verbieten möchte, um das Prinzip der Kreislaufwirtschaft zu fördern, aber auch aufgrund der Knappheit der Deponievolumen des Typs B und E in mehreren Kantonen.

Tabelle 1: Übersicht über die zulässigen Verwertungsmethoden in der Schweiz (einschliesslich geplanter Entwicklungen)

PAK-Gehalt	2020 - 2025 (VVEA)	2026 und danach (VVEA und geplante Änderungen)
< 250 mg/kg	Verwertung im Strassenbau bevorzugt Deponierung möglich (Typ B)	Verwertung im Strassenbau bevorzugt Deponieverbot durch das BAFU geplant
250 – 1000 mg/kg	Verwertung im Strassenbau unter be- stimmten Bedingungen möglich Deponierung möglich (Typ E)	Verwertung im Strassenbauverboten Deponierung verboten
> 1000 mg/kg	Verwertung verboten Thermische Behandlung zur Elimination Deponierung möglich (Typ E)	

Neben den oben genannten Bestimmungen, die die Mindestbedingungen für die Verwertung von an der Quelle getrennten bituminösen Abfällen festlegen, sind für diese Studie weitere Bestimmungen der VVEA zu berücksichtigen.

Insbesondere sind möglicherweise die in Artikel 19 und Anhang 3 der VVEA festgelegten Bedingungen für die Bewertung von Aushub- und Ausbruchmaterial potenziell zu berücksichtigen, um die Möglichkeiten und Grenzen für die Verwertung der in den bituminösen Abfällen enthaltenen Fraktion mineralischer Gesteinskörnungen zu bestimmen, die im Rahmen eines Aufbereitungsverfahrens von der bindemittelreichen Fraktion getrennt worden wäre.

Die Bestimmungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Materialien gelten als **unverschmutztes** Aushub- und Ausbruchmaterial, wenn sie die Anforderungen von Anhang 3 Kap. 1 VVEA erfüllen, d. h. eine Zusammensetzung aus mindestens 99 Gew.-% Lockergestein oder gebrochenem Fels (und im Übrigen aus anderen mineralischen Bauabfällen) besitzen und insbesondere einen PAK-Gehalt von **<3 mg / kg Trockenmasse** (Benzo[a]pyren: 0.3 mg / kg) aufweisen. Diese Materialien müssen als Baumaterial für Baustellen oder auf Deponien als Rohstoffe für die Herstellung von Baumaterialien, für die Befüllung von Materialsammelstellen oder für genehmigte Baustellenänderungen bewertet werden. Nicht verwertbare Fraktionen werden auf Deponien des Typs A zugelassen (Anhang 5, Kap. 1 VVEA).
- Als **gering belastetes** Aushub- und Ausbruchmaterial gelten Aushub- und Ausbruchmaterialien, die den Anforderungen von Anhang 3 Kap. 2 der VVEA entsprechen, d.h. eine Zusammensetzung von mindestens 95 Gewichtsprozent aus Lockergestein oder gebrochenem Fels (und im Übrigen aus anderen mineralischen Bauabfällen) besitzen und insbesondere einen PAK-Gehalt von **<12.5 mg / kg Trockenmasse** (Benzo[a]pyren): 1.5 mg / kg) aufweisen. Sie müssen als Rohstoff für die Herstellung von hydraulisch oder bituminös gebundenen Baustoffen, als Baustoff auf Deponien der Typen B–E, als Ersatzrohmaterial für die Herstellung von Zementklinker oder bei Tiefbauarbeiten am Ort der Entstehung der Stoffe verwertet werden, vorausgesetzt, dass eine Behandlung der Materialien, wenn sie erforderlich ist, am Ort selbst oder in unmittelbarer Nähe stattfindet; vorbehalten bleibt Art. 3 der Altlasten-Verordnung vom 26. August 1998 (AltIV).

Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle, BAFU

Gemäss der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (BAFU, 2006) sind die von dieser Studie betroffenen bituminösen Abfälle wie folgt definiert: „**Ausbauasphalt ist der Oberbegriff für den durch schichtweises Kaltfräsen eines Asphaltbelages gewonnenen kleinstückigen Fräsasphalt und den beim Aufbrechen bituminöser Schichten in Schollen anfallenden Aufbruchasphalt.**“

Die Grundsätze für die Verwertung von mineralischen Baustellenabfällen bis hin zur Verwendung der zurückgewonnenen Materialien sind in Abbildung 1 dargestellt.

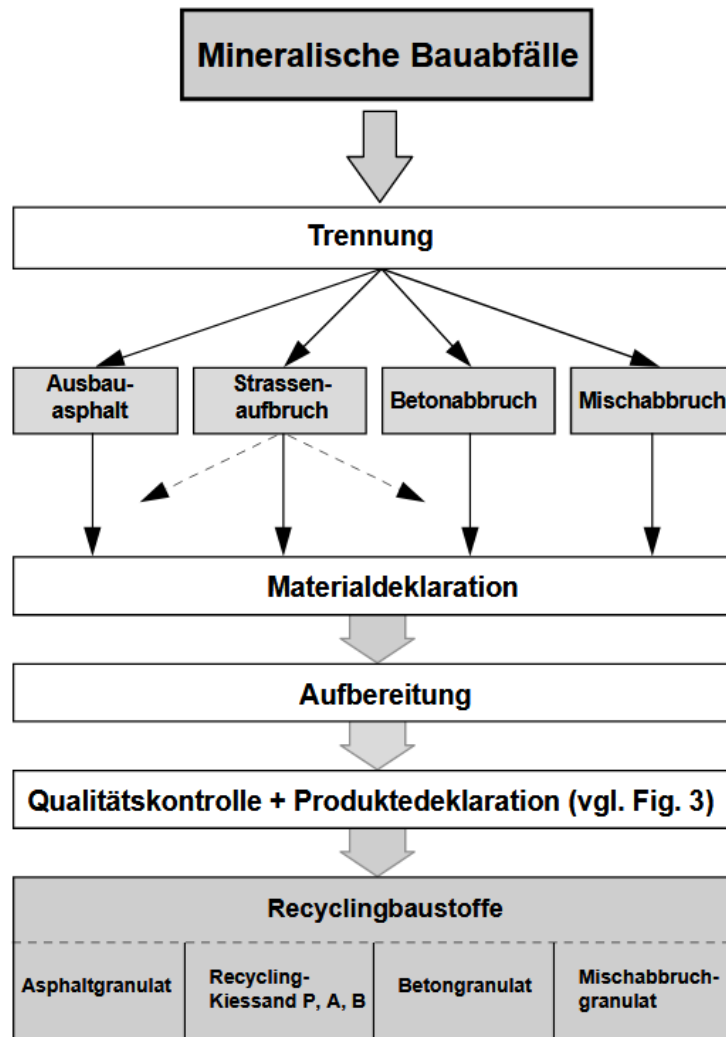


Abbildung 1: Grundsätze der Verwertung von mineralischen Baustellenabfällen (Quelle: BAFU, 2010)

Von den vier in der Richtlinie definierten Kategorien von zurückgewonnenen Materialien, die in der Abbildung unten dargestellt sind, betreffen die folgenden zwei Kategorien speziell bituminöse Gesteinskörnungen :

- Asphaltgranulat
- Recycling-Kiessand A

Bauabfallkate- gorien	Ausbau- asphalt	Kies- Sand	Beton- abbruch	Misch- abbruch	Fremd- stoffe
Recyclingbaustoffe					
Asphaltgranulat	80	20	2		0.3*
Recycling-Kiessand P	4	95	4	1	0.3
Recycling-Kiessand A	20	80	4	1	0.3
Recycling-Kiessand B	4	80	20	1	0.3
Betongranulat	3**	95		2	0.3
Mischabbruchgranulat	3	97			0.3 ohne Gips 1%Gips 1% Glas

	Hauptgemengenteil: minimale Massenprozent
	Nebengemengenteil: maximale Massenprozent
Fremdstoffe	maximale Gesamtanteile in Massenprozent (Holz, Papier, Kunststoffe, Metalle, Gips...)
*	Asphaltgranulat, welches heiss aufbereitet wird, darf aus bautechnischen Gründen keine Fremdstoffe enthalten.
**	Betongranulat, welches als Zuschlagstoff für klassifizierten Beton vorgesehen ist, darf keinen Ausbauasphalt enthalten.

Abbildung 2: Anforderungen an die Qualität der zurückgewonnenen Materialien (Quelle: BAFU, 2010)

Was den Recycling-Kiessand A betrifft, so ist es verboten, Kies mit bituminösem Zuschlagstoff zu mischen, um Recyclingkies A zu erhalten. "Die zuständige kantonale Fachstelle kann für Recycling-Kiessand A im Einzelfall einen Ausbauasphaltanteil von 30 Massenprozent zulassen, wenn sichergestellt ist, dass weder Ausbauasphalt noch Asphaltgranulat zugemischt wurden." In einigen Kantonen, vor allem in den französischsprachigen Kantonen, wird die Praxis der Vermischung jedoch noch angewendet.

Abbildung 3 zeigt die möglichen Verwendungen der Recyclingbaustoffe mit der erforderlichen Qualität.

Verwendungsmöglichkeiten Recyclingbaustoffe	Einsatz in loser Form		Einsatz in gebundener Form	
	ohne Deckschicht	mit Deckschicht	hydraulisch gebunden	bituminös gebunden
Asphaltgranulat	*	* *		
Recycling-Kiessand P				
Recycling-Kiessand A				
Recycling-Kiessand B				
Betongranulat				
Mischabbruchgranulat				

	Verwendung möglich
* *	Verwendung möglich mit der Einschränkung: als Planiematerial unter bituminöser Deckschicht
	Verwendung nicht zugelassen
*	Verwendung nur möglich, wenn die Schichtstärke maximal 7cm beträgt und das Asphaltgranulat gewalzt wird

Abbildung 3: Verwendungsmöglichkeiten der sechs Recyclingbaustoffe

Die Verwendung von **Asphaltgranulat** ist daher in ungebundener Form möglich, solange sie als Schicht unter einem bituminösen Belag (und ggf. nach dem Walzen ohne Beschichtung auf eine Dicke von weniger als 7 cm) verlegt wird, und in gebundener Form mit bitumenhaltigen Bindemitteln.

Der **Recycling-Kiessand A** kann nach den gleichen Anforderungen wie bituminöse Gesteinskörnungen mit einer grösseren Einsatzmöglichkeit in den darunter liegenden Schichten (alle Fundamentalschichten; Aufschüttungen) unter einer undurchlässigen Abdeckung aufgewertet werden.

Die Dauerhaftigkeit dieser Kategorie von Recycling-Materialien ist aufgrund der Vermischung von bituminösen Zuschlagstoffen und Kies potenziell in Frage gestellt, was aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcen- und Abfallwirtschaft als problematisch angesehen werden kann.

Derzeit können wir davon ausgehen, dass die Anforderungen der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (BAFU 2006) analog für die verschiedenen Fraktionen gelten, die sich aus der Behandlung von bituminösen Gesteinskörnungen ergeben, die beispielsweise auf die Abtrennung der mineralischen Gesteinskörnungen von der bindemittelreichen Fraktion abzielen.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Anteil an mineralischen Gesteinskörnungen, der aus einem Aufbereitungsprozess resultiert, zumindest nach den gleichen Möglichkeiten verwertet werden kann, wie sie für die Kategorie "Asphaltgranulat" durch diese Richtlinie definiert sind.

Für Verfahren, bei denen der Restbindemittelgehalt in der abgetrennten mineralischen Gesteinskörnung auf ca. 1 % reduziert werden kann, kann davon ausgegangen werden, dass die Einsatzbedingungen von Recycling-Kiessand A zutreffen könnten - Verwendungsmöglichkeit auf allen darunter liegenden Schichten durch eine wasserdichte Beschichtung geschützt.

Diese Elemente werden im Rahmen der neuen BAFU-Vollzugshilfe "Recycling von mineralischen Rückbaustoffen" geklärt, welche die in mehreren Punkten zu aktualisierende Richtlinie für die Verwertung

mineralischer Bauabfälle ablösen wird. Nach den erhaltenen Informationen wird z.B. der Begriff "Kiessand A" abgeschafft, da er nicht mehr dem Stand der Technik entspricht.

Weitere zu berücksichtigende Rechtsgrundlagen

Zusätzlich zu den oben genannten Bestimmungen zur Abfallbewirtschaftung und -behandlung können weitere Rechtsgrundlagen gelten, insbesondere im Zusammenhang mit der Umsetzung der verschiedenen Behandlungswege für solche Abfälle. Insbesondere die Luftreinhalteverordnung (LRV) im Hinblick auf die Bewirtschaftung von Abgasen aus Behandlungsanlagen oder die Verordnung über die Lenkungsabgabe auf flüchtigen organischen Verbindungen (VOCV) im Zusammenhang mit der chemischen Behandlung mit Lösungsmitteln. Ganz allgemein müssen die Anlagen auch die verschiedenen geltenden Anforderungen erfüllen, insbesondere in Bezug auf den Gewässerschutz (Gewässerschutzverordnung - GSchV) oder den Lärmschutz (Lärmschutz-Verordnung - LSV).

2.3 Zusammenfassung des rechtlichen und regulatorischen Rahmens der Nachbarländer

Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Europäische Union (EU) und insbesondere auf Frankreich, Belgien, Italien, Deutschland, Österreich und die Niederlande, indem regulatorische Aspekte auf der Skala der EU und auf nationaler Ebene ermittelt werden.

Im Bereich der Abfallwirtschaft legen europäische Richtlinien und Verordnungen die zu beachtenden allgemeinen Grundsätze fest und überlassen den Mitgliedstaaten einen gewissen Handlungsspielraum. Die wichtigste Rechtsgrundlage für die Entsorgung von bituminösen Abfällen in der Europäischen Union ist die „Richtlinie 2008/98 / EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und die Aufhebung bestimmter Richtlinien“, die am 12. Dezember 2010 in der EU für Mitgliedsstaaten in Kraft getreten ist.

In dieser Richtlinie werden die wichtigsten Ausrichtungen der Abfallbewirtschaftungspolitik (Abfallhierarchie, Verursacherprinzip, Umweltschutz usw.) aufgegriffen und bekräftigt, indem insbesondere das Ziel festgelegt wird, **mindestens 70 Gew.-% der nicht gefährlichen Abfälle aus Rückbau und Abbruch wiederzuverwenden (Artikel 11.2.B), wozu auch bituminöse Abfälle gehören.**

Speziell in Bezug auf PAK definiert die Richtlinie "2003/33/EG: Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäss Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG" definiert die Lagereinrichtungen nach Abfallart. Anhang III der "Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien" definiert die Eigenschaften, die Abfälle gefährlich machen.

Darüber hinaus werden bituminöse oder teerhaltige Abfälle gemäss dem Europäischen Abfallverzeichnis ("2001/118/EG: Entscheidung der Kommission vom 16. Januar 2001 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis") in 3 Kategorien eingeteilt, und zwar nach der gleichen Nummerierung wie im Abfallverzeichnis gemäss der Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA) (die Abfallnummern mit einem Sternchen sind als gefährliche Abfälle eingestuft):

- 17 03 01*: Kohlenteerhaltige Bitumengemische
- 17 03 02*: Bitumengemische mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 03 01 fallen
- 17 03 03*: Kohlenteer und teerhaltige Produkte

Auf dieser Grundlage gelten teerhaltige Abfälle als gefährliche Abfälle und können daher nicht heiss verwertet werden. Die Definition von teerhaltigen bituminösen Gesteinskörnungen ist jedoch von Land zu Land unterschiedlich. Darüber hinaus erlauben einige Länder die Kaltaufbereitung unter bestimmten Bedingungen.

Aus diesen Gründen und auch im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Auslegung bezüglich des Endes der Abfalleigenschaft (allgemeine Grundsätze gemäss Artikel 6 der Europäischen Rahmenrichtlinie, die festlegen, ab wann „bestimmte Abfälle keine Abfälle mehr sind“) für bituminöse Abfälle in den verschiedenen Ländern, **gibt es auf EU-Ebene keine einheitlichen Regelungen bezüglich der zulässigen PAK-Grenzwerte für die verschiedenen Sektoren**, die von den Mitgliedstaaten festgelegt werden.

Anmerkungen zu Methoden zur Quantifizierung des PAK-Gehalts

Es sollte erwähnt werden, dass die in der VVEA angegebenen PAK-Werte auf der von der United States Environmental Protection Agency (EPA) erstellten Liste basieren, in der 16 einzelne PAK-Verbindungen aufgeführt sind, die als prioritäre Umweltschadstoffe eingestuft sind und häufig in Umweltproben als Ersatz für die PAK-Gruppe getestet werden. Dies sind die folgenden PAK-Verbindungen: Acenaphthen,

Acenaphthylen, Anthracen, Benzo[a]anthracen, Ben-zo[a]pyren, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[g,h,i]perylen, Benzo[k]fluoranthren, Chrysen, Dibenzo[a, h]anthracen, Fluoranthren, Fluoren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Naphthalin, Phenanthren und Pyren. Auf dieser Basis wird der PAK-Gehalt eines Feststoffs durch die Addition dieser einzelnen PAK-Verbindungen bestimmt [1]. Es gibt jedoch auch andere Messmethoden, die beispielsweise auf der Summe von 10 PAK oder beispielsweise nur auf der Messung von Benzo[a]pyren basieren. Im weiteren Verlauf des Dokuments werden die Grenzwerte für den PAK-Gehalt angegeben, die auf einer anderen Methode als der Summe der 16 PAK gemäss EPA basieren.

2.3.1 Frankreich

In Frankreich werden seit 1993 keine Teere und seit 2005 keine Kohlenderivate (andere Produkte aus der Destillation von Steinkohle) mehr verwendet. Entgegen den Schweizer Vorschriften unterscheiden die französischen Vorschriften zwischen Kalt- und Warmaufbereitung. Die verschiedenen in Frankreich zugelassenen Entsorgungs- / Verwertungswege sind je nach PAK-Gehalt in Tabelle 2 auf der Grundlage des Beschlusses vom 28. Oktober 2010 über Lagereinrichtungen für inerte Abfälle zusammengefasst. Aus regulatorischer Sicht sind daher die folgenden drei Verwertungswege möglich, bei denen a priori keine Änderung vorgesehen ist: (1) Warmaufbereitung, (2) Kaltaufbereitung, (3) Deponierung.

Zusätzlich zu diesem allgemeinen rechtlichen Rahmen bieten mehrere andere Dokumente und Richtlinien Hinweise für die Erhöhung der Recyclingrate von bituminösen Abfällen, darunter die folgenden:

- Artikel 79 des Gesetzes Nr. 2015-992 vom 17. August 2015 über die Energiewende für umweltverträgliches Wachstum legt Mindestquoten für die Verwendung von wiedergewonnenen Materialien in Deckschichten und Tragschichten fest (siehe Absatz 2.4.2.1).
- Die freiwillige Verpflichtungskonvention: Diese Vereinbarung wurde 2009 von Berufsverbänden (USIRF, SPTF, SYNTEC, FNTF), dem Staat und der Vereinigung der französischen Departemente unterzeichnet. Diese Konvention legt insbesondere das Ziel fest, die Wiederverwendung von Asphaltaggregaten zu erhöhen.
- Das MEEDDM-Rundschreiben vom 9. Februar 2009: In diesem Rundschreiben wird der staatliche Auftraggeber aufgefordert, mindestens 10% der rezyklierten Asphaltaggregate in den Formulierungen zu genehmigen und systematisch Varianten auszuschreiben, in denen ein an die Recyclingquote gekoppeltes Bewertungskriterium festgelegt wird.
- Leitfaden "Recycling von Asphaltaggregaten in bituminösem Heissmischgut" - in Bearbeitung: Behandelt das Recycling für Zugabernaten von bis zu 30 - 40%.

Tabelle 2: Zusammenfassung der in Frankreich zugelassenen Wiederherstellungskanäle (einschliesslich geplanter Änderungen)

PAK-Gehalt *	Aktuelle Vorschriften
< 50 mg/kg	Verwertung für alle Anwendungen Deponie für inerte ISDI-Abfälle
50 - 500 mg/kg	Nur Kaltaufbereitung Deponie für ungefährliche Abfälle ISDND
500 - 1000 mg/kg	Verwertung verboten Deponie für ungefährliche Abfälle ISDND
> 1000 mg/kg	Verwertung verboten Deponie für gefährliche Abfälle ISDD

2.3.2 Belgien

Belgien besteht aus drei Regionen mit eigener Gesetzgebung und Erfahrungen in der Abfallwirtschaft. Dies sind die flämische Region, die wallonische Region und die Region Brüssel-Hauptstadt. Auf der Grundlage der gesammelten Informationen gibt es **keine nationalen Vorschriften, in denen die Verfahren für die Entsorgung / Behandlung / Verwertung von bituminösen Abfällen entsprechend ihrem PAK-Gehalt festgelegt sind**. In den folgenden Abschnitten wird für jede Region ein Auszug aus den für diese Studie interessanten Bestimmungen dargestellt. Generell ist ein Vergleich mit den Schweizer Vorschriften schwierig, da die PAK-Gehalte nicht auf die gleiche Weise gemessen werden.

Flämische Region

Die wichtigsten Rechtsgrundlagen sind die Flämische Vorschriften zur Abfallvermeidung und -bewirtschaftung (VLAREA) und die darauf folgenden Verordnungen (zuletzt geändert am 13. Februar 2009) sowie die Flämische Verordnung über das nachhaltige Management von Materialkreisläufen und Abfallstoffen (VLAREMA), die am 1. Juni 2012 in Kraft trat.

Bei der Entsorgung von bituminösen Abfällen unterscheidet man zwischen Asphaltgranulate (Zuschlagstoffe aus dem Abbruch oder dem Fräsen von Asphaltbelägen) und gesiebttem Asphaltsand (Sand aus der Absiebung, nach dem Brechschutt und nach der Vorsiebung des gesiebten Brechsandes).

1. PAK-haltige Asphaltmaterialien dürfen nur dann als Baustoffe verwendet werden, wenn sie die folgenden Bedingungen erfüllen:
 - Die Menge beträgt mindestens 1'500 Kubikmeter;
 - Der Antrag ist inventarisiert, wobei mindestens die Gemeinde und das Flurstück angegeben werden müssen;
 - Sie werden kalt in Fundamenten verwendet, welche aus Zement aus Asphaltaggregaten bestehen.
2. **Asphaltgranulate** enthalten PAK, wenn der PAK-Sprühtest (PAK-Markersprühtest) eine gelbe Färbung aufweist. ¹.
3. **Zerkleinerter Asphaltsand oder gesiebter Sand** enthalten PAK, wenn der Standard eines der in Tabelle 3 aufgeführten PAK überschritten wird.

¹ Bei Tageslicht tritt die gelbe Färbung des "PAK-Markers" auf, sobald der PAK-Gehalt ungefähr 13'000 mg/kg überschreitet, d.h. ca. 650 mg/kg, reduziert auf den gesamten bituminösen Abfall mit einem Bindemittelgehalt von 5%.

Tabelle 3: PAK-Grenzwert für die Verwendung als Baumaterial (Quelle: VLAREMA Anhang 2.3.2.A)

Parameter	Gesamtkonzentration (3) (mg / kg Trockensubstanz)
Benzo(a)anthracen	35
Benzo(a)pyren	8.5
Benzo(ghi)perylene	35
Benzo(b)fluoranthren	55
Benzo(k)fluoranthren	55
Chrysene	400
Phenanthren	30
Fluoranthren	40
Indeno(1,2,3 cd)pyren	35
Naphthalin	20

Gemäss den oben erwähnten PAK-Nachweisprinzipien können bituminöse Abfälle, die keine PAK enthalten, ohne Bedingungen verwertet werden und solche, die PAK enthalten, nur kaltaufbereitet werden. Nach unserem Kenntnisstand gibt es a priori keine Rechtsgrundlage, die das Deponieren verbietet.

Region Wallonien

Die wichtigsten regulatorischen Grundlagen sind die Verordnung der wallonischen Regierung zur Förderung der Verwertung von bestimmten Abfällen vom 14. Juni 2001 und das Rundschreiben zur Umsetzung des Abschlussberichts Nr. 2018-00762 des ISSeP vom 13. Juli 2018 über die Bestimmung eines Tracers, der die Messung des Teergehalts eines Abfalls ermöglicht, um seine mögliche Verwertung als nicht gefährlicher Abfall oder seine Gefährlichkeit festzustellen. Die Komponente, die zur Festlegung von Grenzwerten für den PAK-Gehalt für die Verwertung herangezogen wird, ist Benzo a)pyren (während die VVEA die Beschränkungen auf der Grundlage der Summe der 16 PAK gemäss EPA definiert).

Die verschiedenen Wege der Verwertung oder Deponierung, die sich aus dieser Richtlinie ergeben, sind in der folgenden Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenfassung der in der belgischen Region Wallonien zugelassenen Verwertungswege

Gehalt an Benzo(a)pyren (PAK)	Verwertungswege
< 8.5 mg/kg	Verwertung ohne Auflagen Deponierung möglich (CET Deponie-Klasse 3 oder 5.3)
8.5 - 50 mg/kg	Kaltaufbereitung Deponierung möglich
> 50 mg/kg	Deponierung (CET Deponie-Klasse 1) oder Behandlung als gefährlicher Abfall

Region Brüssel-Hauptstadt

Die Region Brüssel-Hauptstadt führt derzeit Regeln für die Verwertung von bituminösen Abfällen ein, die auf von Flandern festgelegten Kriterien beruhen. Im Rahmen dieser Studie konnten keine spezifischen Informationen zu diesem Thema gesammelt werden.

2.3.3 Italien

Was die Entsorgung von bituminösen Abfällen in Italien betrifft, so ist die jüngste Verordnung das Dekret Nr. 69 vom 28. März 2018, das den Austritt aus dem Abfallstatus von bituminösen Gesteinskörnungen gemäss Artikel 184-ter, Absatz 2 des Gesetzesdekrets Nr. 152 vom 3. April 2006 regelt und besagt:

Das "Fräsgut" hört auf, Abfall zu sein, wenn es nach einem Umwandlungsprozess zu einem Granulat wird, das die folgenden beiden Bedingungen erfüllt:

1. Es wird wiederverwendbar:
 - zur Herstellung von heissen Bitumenmischungen,
 - zur Herstellung von kalten Bitumenmischungen,
 - zur Herstellung von hydraulisch gebundenen Granulaten (d.h. mit Zement oder Kalk) und ungebunden gemäss Norm UNI EN 13242.
2. Es unterliegt der Kontrolle und muss insbesondere die folgenden PAK-Konzentrationsgrenzwerte einhalten:
 - **100 mg/kg** von PAK (Summe der folgenden 10 PAK: Benzo[a]anthracen, Benzo[a]pyren, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[g,h,i]perylen, Chrysen, Dibenzo[a,e]pyren, Dibenzo[a,l]pyren, Dibenzo[a,i]pyren, Dibenzo[a,h]pyren, Dibenzo[a, h]anthracen)

Aus dem Austausch mit dem Dachverband SITEB (Strade italiane e bitumi) geht hervor, dass alle derzeit in Italien anfallenden bituminösen Abfälle PAK-Werte unter 100 mg/kg aufweisen. Daher gibt es keine speziellen Vorschriften für Strassenabfälle mit höheren PAK-Gehalten. In der Tat hat Italien aufgrund fehlender Kohleminen immer Öl importiert und seine Strassen mit bituminösen Bindemitteln mit sehr geringem PAK-Gehalt gebaut.

Wenn die bituminösen Abfälle nicht verwertet werden können, werden sie auf einer Deponie abgelagert. Bisher sind keine besonderen Änderungen des regulatorischen Rahmens geplant.

Tabelle 5: Zusammenfassung der in Italien zugelassenen Verwertungswege

PAK-Gehalt	Aktuelle Vorschriften
< 100 mg/kg	Verwertung im Strassenbau möglich Deponierung möglich

2.3.4 Deutschland

In Deutschland wird Ausbauasphalt gemäss der «Richtlinie für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Strassenbau (RuVA-StB 01, Fassung 2005)» je nach PAK-Gehalt und Phenolindex im Eluat in die drei folgenden Verwertungskategorien eingeteilt (siehe Tabelle 6):

- A (PAK \leq 25mg/kg und Phenolindex \leq 0.1),
- B (PAK $>$ 25 mg/kg und Phenolindex \leq 0.1)
- C (PAK-Wert anzugeben, Phenolindex $>$ 0.1)

Liegt der PAK-Gehalt nach EPA im Feststoff unter 25 mg/kg (=Verwertungsklasse A) kann das Material gemäss der «RuVA-StB 01» erneut ohne Auflagen in der Asphaltproduktion eingesetzt werden und sowohl zu heissem Neuasphalt verarbeitet als auch ungebunden als Strassenbaustoff eingesetzt werden (siehe Tabelle 7) [3]. Ausbaustoffe mit Gehalten an PAK nach EPA im Feststoff $>$ 25 mg/kg werden gemäss «RuVA-StB 01» als Ausbaustoffe mit teer-/pechtypischen Bestandteilen bezeichnet [4]. In Abhängigkeit von der Höhe des Phenolindex im Eluat werden die Ausbaustoffe mit teer-/pechtypischen Bestandteilen gemäss «RuVA-StB 01» in Verwertungsklassen B oder C eingeteilt. Beide Verwertungsklassen B und C müssen einer umweltverträglichen Verwertung zugeführt werden, wobei folgende Möglichkeiten bestehen:

- Thermische Verwertung [3]
- Aufbereitung im Kaltmischverfahren zu hydraulisch gebundener Tragschicht und Wiedereinbau in den Strassenkörper mit Behördenbeteiligung [3]
- Baustoffliche Verwertung (unter bestimmten Bedingungen der Deponieverordnung) im Deponiebau oder Beseitigung auf einer Deponie [3]

Tabelle 6: Verwertungsklassen in Deutschland gemäss «RuVA-StB 01 (Fassung 2005)», entnommen aus [4]

Verwertungsklasse	Art der Straßenausbaustoffe		Hintergrund ¹⁾	Gesamtgehalt im Feststoff PAK nach EPA mg/kg	Phenolindex im Eluat mg/l
A	Ausbauasphalt		ArS, BS, GS	\leq 25 ²⁾	\leq 0,1 ²⁾
B	Ausbaustoffe mit teer-/pechtypischen Bestandteilen	vorwiegend steinkohlenteertypisch	ArS, BS, GS	$>$ 25	\leq 0,1
C		vorwiegend braunkohlenteertypisch	BS, GS	Wert ist anzugeben	$>$ 0,1

¹⁾ ArS = Arbeitsschutz, BS = Bodenschutz, GS = Gewässerschutz

²⁾ Nachweis kann entfallen, wenn im Einzelfall zweifelsfrei nachgewiesen ist, dass ausschließlich Bitumen oder bitumenhaltige Bindemittel verwendet wurden.

Eine bindende Verwertungsvorgabe für teerhaltigen Asphalt liegt nicht vor. Die Modalitäten liegen in der Verantwortung der betreffenden Gemeinde/Stadt oder auf regionaler Ebene (Bundesland). Die Verwertung von teerhaltigem Ausbauasphalt wird von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich gehandhabt.

Einige Regionen insbesondere im Westen Deutschlands haben beschlossen, dass ab einem bestimmten PAK-Gehalt nur noch die thermische Behandlung erlaubt ist und das Material dementsprechend in die Niederlande transportiert wird, da es in Deutschland keine Anlagen gibt. In anderen Bundesländern insbesondere im Osten Deutschlands wird das Material eher auf Deponien verwertet oder beseitigt. Seltener wird bei Landesstrassen sogar noch der hydraulisch gebundene Einbau von teerhaltigen Materialien in Tragschichten zugelassen.

Zukünftig wird wohl die Verwertung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen (> 25 mg/kg) im Strassenbau wie auch auf der Deponie abnehmen, weil in einem Rundschreiben des Bundesverkehrsministerium aus dem Jahr 2015 an die obersten Strassenbaubehörden der Bundesländer empfohlen wurde, den Einbau teerhaltiger Baustoffgemische ab 2018 nicht mehr zuzulassen und die thermische Verwertung zu bevorzugen [3]. Ein Verbot in absehbarer Zeit wird es wohl aufgrund der Gegenwehr der Deponiebetreiber nicht geben, da Asphaltaufbrüche für viele Deponien insbesondere beim Bau der Deponie ein sehr nützlicher Baustoff sind.

Tabelle 7: Zusammenfassung der zugelassenen Verwertungsmethoden in Deutschland

Klasse	PAK-Gehalt	Aktuelle Regelungen
A	≤ 25 mg/kg	Auflagefreier Einsatz in der Asphaltproduktion möglich, sowohl als heisser Neuasphalt wie auch ungebunden als Strassenbaustoff
B	> 25 mg/kg (≤ 0.1 mg/l Phenol-index im Eluat)	Keine Wiederverwendung in neuem Asphaltmischgut erlaubt. Für die Behandlung existiert keine bindende Verwertungsvorgabe. Die Bundesländer tragen die Verantwortung, welcher der folgenden Verwertungswege umgesetzt wird:
C	> 25 mg/kg (> 0.1 mg/l Phenolindex im Eluat)	<ul style="list-style-type: none"> - thermische Verwertung - Beseitigung oder Verwertung auf Deponie - Aufbereitung im Kaltmischverfahren zu hydraulisch gebundener Tragschicht (sehr selten, bei Bundesstrassen oder Autobahnen generell nicht erlaubt)

2.3.5 Österreich

In Österreich definiert die „Recycling-Baustoffverordnung (RBV)“ die Grundlagen für die Herstellung, die Verwendung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen. Die „Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau (RVS)“ definieren die technischen Anforderungen für die Planung und Ausführung von Strassen. Bei Bundes- und Landesstrassen sind die RVS in Österreich grundsätzlich rechtsverbindlich. Zudem gibt es verschiedene ÖNORMEN, welche die Anforderungen für spezifische Mischguttypen und Einsatzarten regeln.

In Österreich werden Recycling-Baustoffe anhand verschiedener Parameter (unter anderem auch PAK) in unterschiedliche Qualitätsklassen eingeteilt, für welche dann anschliessend die entsprechenden Verwendungsmöglichkeiten definiert sind. Grundsätzlich dürfen nur Recycling-Baustoffe der Qualitätsklassen U-A, U-B, U-E, B-B, B-C, B-D für die Produktion von Asphaltmischgut eingesetzt werden, wobei das recycelte Asphaltgranulat die Anforderungen gemäss «ÖNORM EN 13108-8» erfüllen muss. Zusätzlich gelten für die Produktion von Asphaltmischgut die «RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut» und die «RVS 08.16.01 Anforderungen an Asphalttschichten». Die Qualitätsklassen B-B, B-C, B-D und D mit einem maximalen PAK-Gehalt von 200 mg/kg dürfen de facto nur gebunden eingesetzt werden. Die Qualitätsklassen U-A, U-B und U-E mit einem maximalen PAK-Gehalt von 12 mg/kg bzw. 20 mg/kg können auch als hydraulisch oder bituminös gebundenes sowie ungebundenes Material im Strassenbau oder als Verfüllmaterial eingesetzt werden. Die ÖNORM B 3132 «Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau», die «RVS 08.15.01 Ungebundene Tragschichten» sowie die «RVS 08.17.01 Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten» regeln dabei die Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten. Die zulässigen Einsatzarten sowie maximalen PAK-Gehalte der genannten Qualitätsklassen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Zulässige PAK-Gehalte und Einsatzarten für die verschiedenen Qualitätsklassen in Österreich

Qualitätsklasse	Σ16PAK (EPA)	Gegenwärtige Regelungen der möglichen Anwendungen
U-A	12 mg/kg	ungebunden sowie hydraulisch oder bituminös gebunden
U-B	20 mg/kg	ungebunden sowie hydraulisch oder bituminös gebunden
U-E	12 mg/kg	hydraulisch oder bituminös gebundenen sowie ungebunden als Tragschicht im Trapez des Gleiskörpers
B-B	20 mg/kg	Asphaltmischgut sowie Herstellung einer ungebundenen oberen Tragschicht, wenn der Asphalt durch Fräsen gewonnen wurde (nur Bundesstrassen A und S und Landesstrassen B und L gemäss «RVS 08.15.02»)
B-C	300* mg/kg	
B-D	20 / 300* mg/kg	

* Der Grenzwert von 300 mg/kg gilt für Gesteinskörnungen (insbesondere Ausbauasphalt), die in eingehausten Heissmischanlagen mit Dämpferfassung und -behandlung aus dem Mischprozess eingesetzt werden. Die Dämpferfassung und -behandlung muss die Freisetzung von Schadstoffen, insbesondere TOC, KW und PAK, nach dem Stand der Technik verhindern. Das Asphaltmischgut hat den Grenzwert von 20 mg/kg TM einzuhalten.

2.3.6 Niederlande

Aufgrund des Mangels an natürlichem Gestein in den Niederlanden hat das Recycling von mineralischen Abfällen hohe Priorität. Gleichzeitig hat die niederländische Regierung die Absicht, Teer vollständig aus der Umwelt zu eliminieren. Seit 2001 ist die Verwendung sowie auch der Export aller teerhaltigem Recyclingmaterialien dementsprechend gänzlich verboten. Für teerhaltige Materialien ist die einzige Möglichkeit die thermische Behandlung, bei der teerhaltige Komponenten verbrannt und somit dem Kreislauf entzogen werden.

Der Grenzwert für die Klassifizierung als teerhaltig liegt basierend auf «Besluit Bodemkwaliteit» bei 75 mg/kg PAK-10. Unterhalb dieses Grenzwerts kann das Mischgut erneut in der Asphaltproduktion eingesetzt werden. Die Vermischung von verschiedenen Asphaltgranulat-Chargen zur Verdünnung des PAK-Gehalts und Erreichung dieses Grenzwerts ist verboten. Es gilt zu beachten, dass der niederländische Grenzwert auf einer Messung von 10 PAK basiert und nicht 16 PAK gemäss EPA, wie es in der Schweiz der Fall ist.

Die wichtigsten Richtlinien für Strassenbau und Asphaltrecycling innerhalb der Niederlande sind die folgenden:

- «Besluit Bodemkwaliteit»: Verboten die Wiederverwendung von teerhaltigem Asphalt
- «CROW Standaard RAW Bepalingen 2020»: Standardisierter Vertrag, der von Strassenbehörden in den Niederlanden verwendet wird
- CROW Publication 210 «Richtlijn omgaan met vrijgekomen asfalt - teerhoudendheid, onderzoek en selectieve verwijdering»: Die CROW-Publikation "Richtlijn omgaan met vrijgekomen asfalt" bietet einheitliche Richtlinien für die praktische Umsetzung bestehender Gesetze und Vorschriften. Anhand von sieben Protokollen werden alle notwendigen Schritte aufgelistet, die während der Planung von Bauarbeiten bis hin zur Abnahme des Asphalts bei einer thermischen Aufbereitungsanlage anfallen.
- «Code Milieuverantwoordelijk Wegbeheer»:

Kodex für die umweltverträgliche Verarbeitung von Teerasphalt, welcher von den Mitgliedern der Berufsgruppe «Bitumineuze Werke von Bouwend Nederland» am 13. Dezember 2016 unterzeichnet wurde.

Da die Vorschriften bezüglich teerhaltigem Recyclingmaterial in den Niederlanden bereits sehr streng formuliert sind und die Niederlande im Bereich der thermischen Verwertung eine Vormachtstellung besitzt, sind bezüglich der Verwertungsoptionen in näherer Zukunft keine Änderungen zu erwarten. Da die Niederlande auch in der Anwendung des recycelten Asphalts viel Knowhow besitzt, könnte es sein, dass bisher geltende Restriktionen in Bezug auf die Wiederverwendung von Recyclingasphalt irgendwann gelockert oder aufgehoben werden.

Tabelle 9: Zulässige PAK-Gehalte und Einsatzarten in den Niederlanden

PAK-10 Gehalt	Aktuelle Regelungen
≤ 75 mg/kg	Direkte Wiederverwendung in der Asphaltproduktion
> 75 mg/kg	Thermische Behandlung und anschliessende Wiederverwendung in der Asphaltproduktion oder Betonproduktion

2.3.7 Zusammenfassung

Auf der Grundlage der oben dargestellten Elemente scheint es, dass die Vorschriften für die Entsorgung von bituminösen Abfällen auf EU-Ebene nicht einheitlich sind und je nach Land sehr unterschiedliche Anforderungen und unterschiedliche PAK-Messmethoden bestehen, was einen Vergleich erschwert. Tabelle 10 fasst die zugelassenen Verwertungs-/Beseitigungswege für die verschiedenen betrachteten Länder zusammen.

Tabelle 10: Vergleichende Zusammenfassung der zugelassenen Sektoren für die Schweiz und die EU

	Grenze des PAK-Gehalts für die Heissaufbereitung [mg/kg] (Summe von 16 PAK gemäss EPA)	Grenze des PAK-Gehalts für die Kaltaufbereitung [mg/kg] (Summe von 16 PAK gemäss EPA)	Entsorgung auf der Deponie	Thermische Behandlung
Schweiz	250		PAK > 250 mg / kg: ab 2026 verboten PAK < 250 mg / kg: Verbot in Betracht gezogen	PAK > 250 mg / kg: ab 2026 obligatorisch
Frankreich	50	500	Möglich: nur alternativer Bewertungskanal	Möglich
Belgien (ohne Wallonien)	8.5 (nur Benzo(a)pyren)	50 (nur Benzo(a)pyren)	Möglich	Möglich
Italien	100 (Summe 10 PAK)		Möglich	Nicht geplant
Deutschland	25		Möglich in einigen Bundesländern	PAK > 25 mg / kg: in einigen Bundesländern obligatorisch
Österreich	300 (Produkt darf maximal 20 mg/kg enthalten)	20	Möglich	Möglich
Niederlande	75 (Summe von 10 PAK)		Nicht verfügbar	obligatorisch ab 75 mg/kg PAK (Summe von 10 PAK)

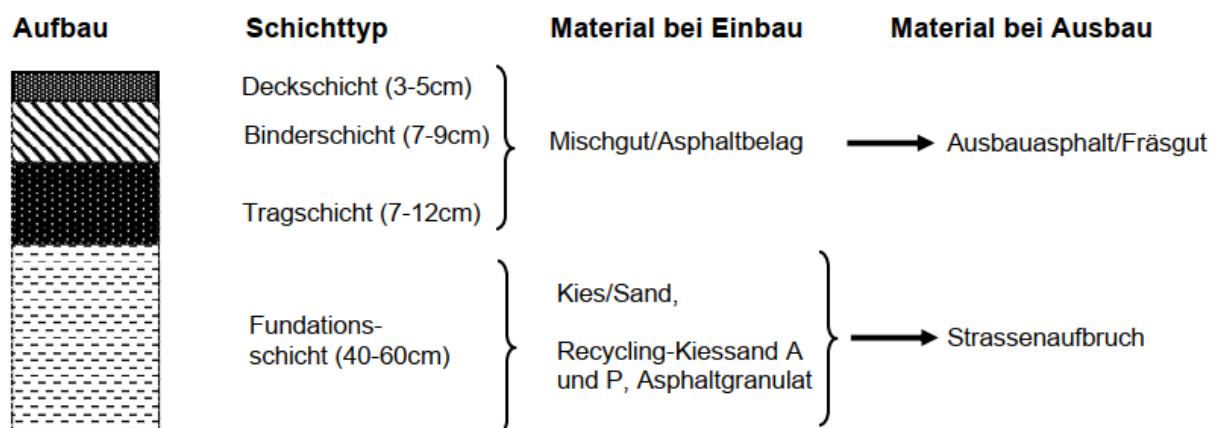
2.4 Maximal zulässiger Gehalt an rezyklierten Bitumengranulaten gemäss Strassenverkehrsnormen und Stand der Technik

2.4.1 Situation in der Schweiz

Derzeit verarbeitet die Strassenbauindustrie nicht alle produzierten rezyklierten Asphaltzuschläge, trotz konkreter Bemühungen in den letzten Jahren, die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen zu fördern. Die ist verbunden mit den normativen Anforderungen, den technischen Beschränkungen in Bezug auf die Konfiguration der Asphaltproduktionsanlagen und bestimmten konservativen Praktiken der Bauakteure.

Aus Sicht der Strassennormen sollten die Möglichkeiten der Verwendung von rezyklierten Zuschlagstoffen speziell gemäss den Anforderungen für die vier verschiedenen Schichten des Strassenaufbaus in Betracht gezogen werden, welche in Abbildung 4 schematisch dargestellt sind:

- Deckschicht
- Binderschicht
- Tragschicht
- Foundationsschicht



Bemerkung: Beim Neubau und bei der Erneuerung von Strassen kann ein Teil der Fundamentschicht durch eine bituminös gebundene Kaltmischfundation (KMF) oder Heissmischfundation (ACF), die aus unterschiedlichen Anteilen an Asphaltgranulaten bestehen kann, ersetzt werden. Bei der späteren Erneuerung wird diese Schicht als Ausbauasphalt ausgebaut.

Abbildung 4: Schematischer Aufbau des Strassenaufbaus (Quelle: Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz, Energie- und Ressourcen-Management GmbH)

In der Schweiz legt die derzeit geltende Norm VSS SN 640 431-1 relativ restriktive Werte für den Gehalt an Ausbauasphalt in den Schichttypen für die Kalt- und Warmzugabe fest, wie in der folgenden Tabelle 11 dargestellt.

Aus Gründen der Bauqualität gelten für diese Schichten unterschiedliche Normen, die die Anforderungen an die gewünschten Eigenschaften festlegen. Für jede dieser Schichten gibt es daher verschiedene Arten von genormtem Asphaltmischgut (AC F, AC T, AC B, AC EME, die spezifische Anforderungen und Eigenschaften erfüllen müssen.

Tabelle 11: Bitumenmischungen, zulässige Mengen von Mischungen sowie von Mischungen nach Schichten, Arten und Arten von Mischungen (SN 640 431-1b-NA)

Asphaltbeton, zulässige Zugabemengen von Ausbauasphalt in Abhängigkeit der Schichten, Mischgutsorten und Mischguttypen <i>Enrobés bitumineux, quantités admissibles d'agrégats d'enrobés en fonction des couches, des sortes et des types d'enrobés</i>		
Mischgutsorten und Mischguttypen für Schichten <i>Sortes et types d'enrobés pour couches</i>	Anteil Ausbauasphalt <i>Teneur en agrégats d'enrobés</i>	
	Kaltzugabe <i>Incorporation à froid</i>	Warmzugabe <i>Incorporation à chaud</i>
	[Masse-%] [% massique]	
Deckschichten / <i>Couches de roulement</i>		
Asphaltbeton für Deckschichten AC S, AC H und AC MR <i>Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC S, AC H et AC MR</i>	0	0
Asphaltbeton für Deckschichten AC N und AC L <i>Enrobés bitumineux pour couches de roulement AC N et AC L</i>	≤ 15	≤ 30
Binderschichten und Hochmodul-Asphaltbeton / <i>Couches de liaison et enrobés bitumineux à module élevé</i>		
Asphaltbeton für Binderschichten AC B, Hochmodul-Asphaltbeton AC EME <i>Enrobés bitumineux pour couches de liaison AC B, enrobés bitumineux à module élevé AC EME</i>	≤ 15	≤ 30
Trag- und Sperrschichten im Gleisbau / <i>Couches de base et d'étanchéité pour voies ferrées</i>		
Asphaltbeton für Tragschichten AC T, Asphaltbeton für Sperrschichten im Gleisbau AC RAIL <i>Enrobés bitumineux pour couches de base AC T, enrobés bitumineux pour couches d'étanchéité pour voies ferrées AC RAIL</i>	≤ 25	≤ 60
Foundationsschichten / <i>Couches de fondation</i>		
Asphaltbeton für Foundationsschichten AC F <i>Enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F</i>	≤ 30	≤ 70

Eine Überarbeitung der Norm VSS SN 640 431 ist in Arbeit und wird voraussichtlich im Jahr 2021 abgeschlossen sein. Derzeit ist kein klarer Trend hinsichtlich der Anpassung der maximalen Anteile für die Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnungen zu erkennen.

Für den Nationalstrassenbau schlägt das ASTRA in seinem Fachhandbuch Trasse / Umwelt für das Jahr 2020 ein typisches Schichtprofil mit einem höheren Anteil an rezyklierten Materialien als im VSS für die Binder- und Tragschicht vor (siehe Tabelle 12).

Im Rahmen des VSS-Forschungspakets "Recycling von Ausbauasphalt in Heissgutmischung" wurden umfangreiche Arbeiten zum Recycling von rezyklierten Gesteinskörnungen durchgeführt, die Gegenstand der folgenden sechs Veröffentlichungen aus dem Jahr 2013 waren:

- VSS 2005/452 EP1: Maximale / optimale Anteile an Ausbauasphalt in verschiedenen Mischgutsorten/-typen in Abhängigkeit der Anwendungen
- VSS 2005/453 EP2: Mehrfachrecycling von bitumenhaltigen Schichten
- VSS 2005/454 EP3: Nachhaltigkeit des Recyclings von Asphalt
- VSS 2005/455 EP4: Dauerhaftigkeit von bitumenhaltigen Schichten mit Ausbauasphalt, Definition und Validierung der Untersuchungsmethoden, Erarbeitung von Bewertungskriterien
- VSS 2005/456 EP5: Mischgutoptimierung und -konzipierung
- VSS 2005/457 VP6: In-Situ Validierung des Verhaltens innovativer Heissasphaltschichten mit Ausbauasphalt

Basierend auf den aktuellen Qualitätsanforderungen ist ein Recyclinggehalt von 0 -50% für die Deckschicht, 30 - 60% für die Binderschicht und 80 - 100% für die Tragschicht und Foundationsschicht möglich.

Die Einschränkungen des maximalen Gehalts an rezyklierten bituminösen Gesteinskörnungen können auch mit der technischen Konfiguration der Asphaltmischanlagen zusammenhängen. Zusammengefasst:

- Bei der Kalteinmischung der rezyklierten Gesteinskörnung direkt in den Mischer ist die Höchstmenge auf 20 - 30% begrenzt
- Bei der Heisseinmischung in einer Paralleltrommel, die es erlaubt, die rezyklierte bituminöse Gesteinskörnung vorher auf eine Temperatur von 130°C zu erhitzen und zu trocknen, kann der maximale Anteil auf 70% erhöht werden.
- Die neueste Gegenstrom-Paralleltrommel-Technologie erlaubt es, die rezyklierte Gesteinskörnung auf eine Temperatur von 165°C zu erhitzen, was der Produktionstemperatur des Asphaltmischguts entspricht und somit die Herstellung von Belägen aus 100% rezyklierter Gesteinskörnung ermöglicht. Derzeit sind in der Schweiz sechs Anlagen dieser Art in Betrieb.

Basierend auf den Informationen von Professor Bueche von der HES Burgdorf wird von einer Arbeitsgruppe des Projekts "Kies für Generationen", an dem acht Kantone und zwei Grossstädte beteiligt sind, ein Leitfaden für die gute Praxis bei der Verwendung von rezyklierten bituminösen Gesteinskörnungen erarbeitet, der Anfang 2021 veröffentlicht werden soll.

Ziel dieser Arbeitsgruppe ist es, den Einsatz von rezyklierten Materialien mit einer globalen Vision von Nachhaltigkeit und der Förderung beispielhafter Leistungen konkret zu steigern, um den Stand der Technik und seine konkrete Anwendung weiter zu entwickeln

Die Arbeit konzentriert sich insbesondere auf Änderungen bei der Herstellung von Asphaltmischungen (z. B. Förderung von Warmmischungen; Festlegung ehrgeizigerer Einsatzwerte für rezyklierte Gesteinskörnungen einschliesslich Mindestwerten als Empfehlung, Definition zusätzlicher technischer Qualitätskriterien, die an den verstärkten Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen angepasst sind; Definition von Gewichtungskriterien im Rahmen öffentlicher Ausschreibungen, um ein Maximum an Recycling zu fördern, ohne Unternehmen, die nicht über die entsprechende Technologie verfügen, von vornherein auszuschliessen).

Die in diesem Leitfaden vorgeschlagenen Werte, die der Schlusspräsentation der Studie vom 19.01.2021 "Best Practice Guideline – Wiederverwendung Ausbauasphalt und Einsatz Niedertemperaturasphalt" entnommen wurden, sind in der untenstehenden Übersichtstabelle aufgeführt und mit den Anforderungen der VSS SN 640 431-1 und dem Handbuch des ASTRA verglichen:

Tabelle 12: Vergleich des maximal zulässigen Gehalts an rezyklierten Bitumenaggregaten gemäss dem VSS-Standard, dem ASTRA-Handbuch und dem zukünftigen Leitfaden «Kies für Generationen», der erstellt wird.

	VSS-Standard SN 640 431-1	ASTRA-Handbuch („Route / Umwelt“, 2020)	Zukünftiger Leitfaden "Kies für Generationen"
Deckschicht (AC S, AC H, AC MR)	0%	0%	0 - 30% à 0 - 50%
Deckschicht (AC N, AC L)	0 - 30%		
Binderschicht und Ausbau- asphalt mit hohem Modul (AC B, AC EME)	0 - 30%	AC 22 EME C1 : 0- 40% AC B 22 H: 0-60%	AC B : 20 - 60% AC EME: 10 - 50%

Tragschicht (AC T)	0 - 60%	AC 22 EME C2 : 0-50% AC T 22 H: 0 - 60%	50 - 90%
Fundationsschicht (AC F)	0 - 70%	0 - 90%	60 - 100%

Der gezielte und bautechnisch begründete Einbau von rezyklierten bituminösen Gesteinskörnungen in Tragschichten stellt ein Aufwertungspotenzial dar, das für künftige Entwicklungsperspektiven sorgfältig berücksichtigt werden muss.

Die Verwertung sollte in gebundener Form in Heissmischfundationsschichten (bewehrte Fundationsschicht AC F 22 oder AC F 32 nach SN 640 430a, was auch eine vom ASTRA empfohlene Option ist) oder auch in kalter Form unter bestimmten Bedingungen in Betracht gezogen werden, welche in den Empfehlungen bestimmter Kantone oder Dachverbände festgelegt sind.

Diese Option erweitert die Möglichkeiten der Verwertung, was sich auf die Abschätzung der Restmenge auswirkt, die in die Behandlungskanäle geleitet werden muss, und könnte einen nicht zu vernachlässigenden quantitativen Abfluss darstellen.

2.4.2 Situation in der Europäischen Union

In der EU werden die Anforderungen an den Gehalt an rezyklierten bituminösen Gesteinskörnungen in Asphaltmischungen durch die EN13108-Reihe definiert, die harmonisierte Normen (Teile 1 bis 7) und nicht harmonisierte Normen (Teile 8, 20 und 21) umfasst, die alle für die CE-Kennzeichnung verschiedener Heissasphaltmischungen für Strassenbeläge verbindlich sind. Diese Normen, die in allen EU-Mitgliedsstaaten verpflichtend sind, legen keine Grenzen für die Verwendung von wiedergewonnenem bituminösem Aggregaten fest.

Der Auszug aus der EN 13108-8 legt fest, dass die Anforderungen an bituminöse Mischungen mit oder ohne Asphaltgranulate gleich sind, daher bestimmt der Grad der Homogenität des Materials die maximale Menge an Asphaltgranulaten, die verwendet werden kann.

Nach diesen Normen erfordert die Verwendung von wiedergewonnenem bituminösem Aggregaten die Bestimmung der Korngrössenverteilung und des Gehalts an zugesetztem Bindemittel. Bei höheren Dosierungen (mehr als 10% für Deckschichten und mehr als 20% für Trag- und Binderschichten) müssen auch die Konsistenz der verwendeten Bindemittel (rezykliertes Bitumen und zugesetztes Bitumen) und die Festigkeitseigenschaften der Mischung bewertet werden.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die verschiedenen in den ausgewählten Ländern (Frankreich, Belgien, Italien, Deutschland, Österreich, Niederlande) geltenden Normen auf der Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten und der geknüpften Kontakte. Es erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit der verschiedenen bestehenden Normen, die für den Strassenbau gelten.

2.4.2.1 Frankreich

Das Gesetz Nr. 2015-992 vom 17. August 2015 über die Energiewende für grünes Wachstum definiert in seinem Artikel 79 Mindestquoten für die Verwendung von wiedergewonnenen Materialien:

- Ab 2017: Bei den im Laufe des Jahres für den Bau und die Instandhaltung von Strassen verwendeten Materialien müssen mindestens 10 Masseprozent der in den Deckschichten verwendeten Materialien und mindestens 20 Masseprozent der in den Tragschichten (Unterschichten) verwendeten Materialien aus der Wiederverwendung oder dem Recycling von Abfällen stammen;
- Ab 2020: Von den Materialien, die im Laufe des Jahres für den Bau und die Instandhaltung von Strassen verwendet werden, müssen **mindestens 20 Masseprozent der in den Deckschichten**

verwendeten Materialien und mindestens 30 Masseprozent der in den Tragschichten verwendeten Materialien aus der Wiederverwendung oder dem Recycling von Abfällen stammen.

In Bezug auf Asphaltmischgut werden die französischen Anpassungen der geltenden europäischen Normen im Technischen Leitfaden Verwendung von Heissmischnormen (Guide d'utilisation des normes enrobés à chaud) (Sétra, 2008) behandelt, der voraussichtlich im Jahr 2021 durch den Technischen Leitfaden für Recycling mit mittlerem und hohem Anteil in Asphalt-Heissmischanlagen (Guide technique sur le recyclage à moyen et fort taux en installation de production d'enrobés à chaud) des IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) ersetzt werden soll (derzeit in Erarbeitung). Nach dem aktuellen Leitfaden hängen die maximalen Mengen an rezyklierten Gesteinskörnungen, die verwendet werden können, von den Eigenschaften der geforderten Materialien (Körnung, Bindemittelgehalt, ...) für die verschiedenen definierten Klassen ab, **belaufen sich aber auf maximal 40 % für die verschiedenen Schichten**, wie in dargestellt.

Im Rahmen der Aktualisierung des technischen Leitfadens ist vorgesehen, die Anforderungen an die zulässigen Gehalte zu erhöhen, aber auch den **maximalen Gehalt in den verschiedenen Schichten auf 60 % anzuheben**.

Tabelle 13: Maximal zulässiger Gehalt an recycelten Zuschlagstoffen in Frankreich

Schicht	Maximaler Inhalt (Heisszugabe) - gemäss aktuellem Leitfaden	Maximaler Inhalt (Heisszugabe) - gemäss geplantem Update
Deckschichten	0 - 40%	0 – 60%
Binderschichten	10 - 40%	
Tragschichten		

2.4.2.2 Belgien

In Belgien müssen Asphaltmischgut-Aggregate (*Sammelbegriff für körnige Materialien, die aus bituminösem Schutt gewonnen werden und nach einer möglichen Behandlung (z. B. Zerkleinern, Sieben usw.) die spezifischen Qualitätsanforderungen für die Verwendung als Aggregate bei der Herstellung von Asphalt erfüllen ≠ bituminöse Abfälle*) die Anforderungen der je nach Region (Flandern, Wallonien, Brüssel-Hauptstadt) geltenden Standardspezifikationen einhalten.

Auf dieser Grundlage lassen sich die maximal zulässigen Gehalte an bituminösen Gesteinskörnungen im Strassenbau für das gesamte Land wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 14: Maximal zulässiger Gehalt an Bitumenaggregaten, die im Strassenbau in Belgien zulässig sind.

Schicht	Maximaler Gehalt (Heisszugabe)
Deckschicht	0%
Binderschichten und Tragschichten	20% - 50% (homogene Aggregate - Sonderfälle)

2.4.2.3 Italien

Zusätzlich zu den europäischen Normen hat Italien eine eigene Referenznorm UNI TS 11688 entwickelt, in der die Eigenschaften und Kriterien für die Verwendung von bituminösen Gesteinskörnungen in Heiss- und Kaltmischungen definiert sind. Trotz der verschiedenen Kontakte konnten im Rahmen dieser Studie keine Informationen zu den zulässigen Höchstwerten gesammelt werden.

2.4.2.4 Deutschland

Wird Ausbauasphalt für die Verwendung von neuem Asphaltmischgut eingesetzt, muss das Asphaltgranulat gemäss dem technischen Regelwerk «Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 09)» klassifiziert werden. Die «TL AG-StB 09» setzen u. a. die Europäische Norm DIN EN 13108 „Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 8: Ausbauasphalt“ in Deutschland um.

Die maximal möglichen Zugabemengen werden durch die «Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07/13)» und das «Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA, Ausgabe 2009)» geregelt. In der «TL Asphalt-StB 07/13» wird die maximale Zugabemenge durch zwei Formeln jeweils für Trag- und Tragdeckschichten sowie Binder- und Deckschichten ermittelt (siehe Abbildung 5). Um die Zugaberate gemäss «TL Asphalt-StB 07/13» berechnen zu können, muss vom Asphaltgranulat pro 500 Tonnen eine Probe genommen werden, insgesamt jedoch mindestens 5 Proben [1]. Je homogener die Messresultate ausfallen, desto höher ist die maximale Zugaberate. In der «M WA» ergibt sich die maximale Zugabemenge durch die Anlagentechnik und die maschinentechnischen Voraussetzungen. Der kleinere der beiden Werten entscheidet schlussendlich über die maximale Zugaberate. Die anzuwenden Formeln bzw. Werte sind in Abbildung 5 dargestellt.

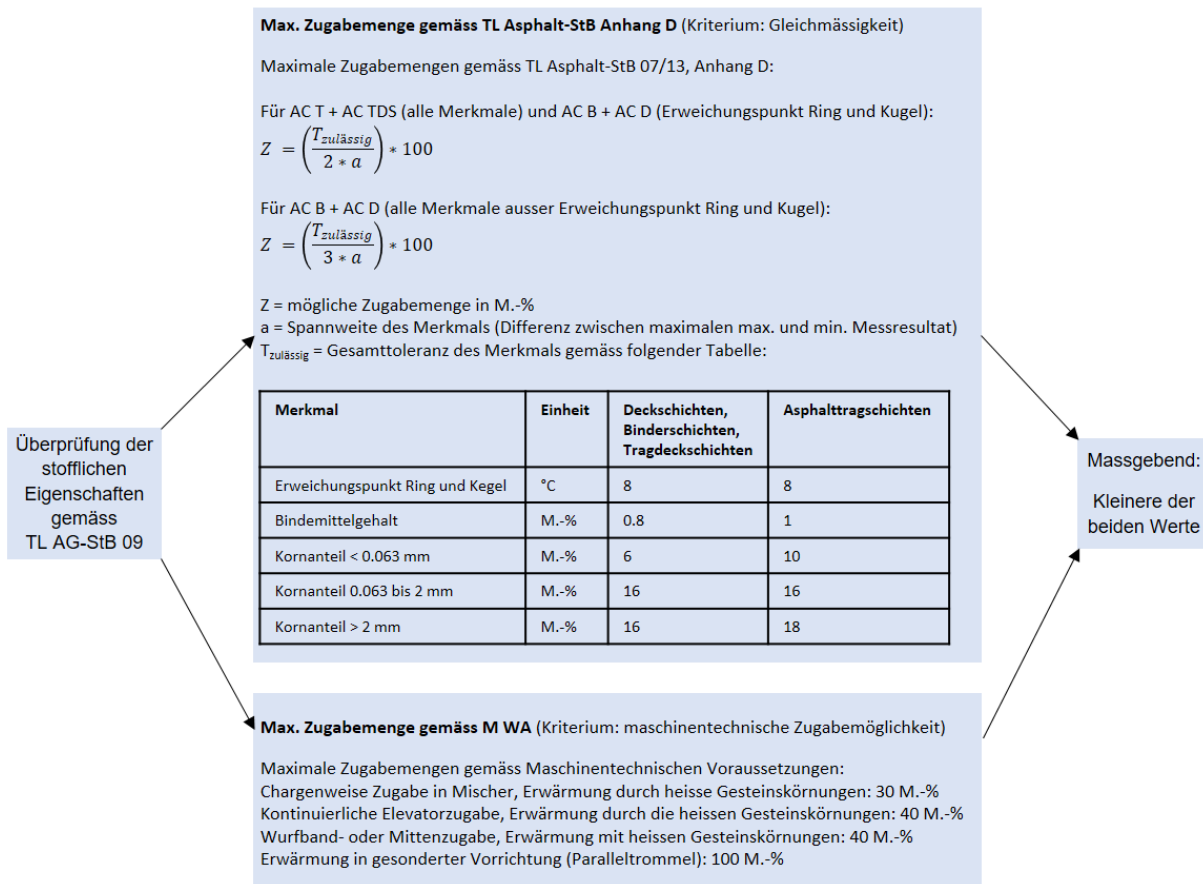


Abbildung 5: Maximal mögliche Zugabemengen an Recyclingasphalt

Tabelle 15: Maximal zulässige Recyclinganteile pro Schicht in Deutschland (entnommen aus [5])

Schicht	Maximaler Recyclinganteil (Heissanwendung)
Deckschicht	20%
Bindeschicht und Tragschicht	20-100%

2.4.2.5 Österreich

Die maximale Zugabemenge wird in der ÖNORM EN13108-8 festgehalten, wobei die Asphaltmischgut-anforderungen für Mischgüter mit und ohne Ausbauasphalt gleich sind. Der Grad der Homogenität und die qualitativen Eigenschaften bestimmen die maximale Zugabemenge.

Wird rezykliertes Asphaltgranulat als ungebundene untere Tragschicht eingesetzt, so darf bei sämtlichen Lastklassen der Anteil an Recycling-Material nicht mehr als 50 Masse-% betragen [6].

2.4.2.6 Niederlande

Der zulässige Gehalt an recyceltem Gestein hängt von den Homogenitätsanforderungen der Materialien ab. Bei Deckschichten sind gemäss der «Standard RAW bepalingen 2020» maximal 30% Recyclinganteil zulässig [7]. Bei Deckschichten aus Splittmastixasphalt (SMA) darf kein (0%) recycelter Asphaltbelag verwendet werden und auch bei der Herstellung von porösem Asphalt gibt es Restriktionen [8]. Die Verwendung von Recyclingasphalt in porösen Deckschichten ist generell nur nach ausführlichen Tests einschliesslich der Installation von Demonstrationsabschnitten zugelassen [8].

NRA Rijkswaterstaat (Abteilung des niederländischen Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft und verantwortlich für Planung, Errichtung, Management und Unterhalt der wichtigsten Infrastruktureinrichtungen in den Niederlanden) will, dass die Asphaltindustrie im Jahr 2030 zu 100 % kreisförmig und vollständig klimaneutral ist [8]. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, dürften gemäss BAM Infra Asphalt innerhalb der nächsten Jahre sämtliche rechtliche Beschränkungen in den Niederlanden in Bezug auf die Wiederverwendung von Recyclingasphalt aufgehoben werden [8].

Tabelle 16: Maximal zulässige Recyclinganteile pro Schicht in den Niederlanden (entnommen aus [5])

Schicht	Maximaler Recyclinganteil (Heissanwendung)
Deckschicht	30% gemäss "CROW Standaard RAW Bepalingen 2020", 0% für SMA, geringere Anteile auch bei porösem Asphalt möglich Gewisse Strassenbehörden haben andere Einschränkungen.
Bindeschicht und Tragschicht	0-80%

2.4.2.7 Zusammenfassung

Tabelle 17: Vergleichende Zusammenfassung des maximal zulässigen Gehalts an recycelten Gesteinskörnungen für die Schweiz und für ausgewählte Länder der EU

	Maximaler Gehalt an recycelten Gesteinskörnungen% (Heisszugabe)			
	Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	Fundationsschicht
Schweiz	30% (15% kalt)	30% (15% kalt)	60% (25% kalt)	80% (30% kalt)
Frankreich	0 - 40 %	10 – 40 (60%)		
Belgien	0%	20% - 50% (homogene Aggregate - Sonderfälle)		
Italien	Information nicht verfügbar			
Deutschland	20%	20-100%		
Österreich	Information nicht verfügbar			
Niederlande	30% (andere Werte möglich)	0-80%		

2.5 Aktueller Stand der Verwertungs-, Behandlungs- und Entsorgungssektoren in der Schweiz und im Ausland

2.5.1 Lage in der Schweiz

In der Schweiz beträgt die Produktion von bituminösen Abfällen im Jahr 2018 rund 2.74 Millionen Tonnen pro Jahr, davon 2.2 Millionen Tonnen mit einem PAK-Gehalt unter 250 mg / kg und 0.54 Millionen Tonnen mit einem PAK-Gehalt über 250 mg / kg gemäss der Studie „Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz, Rubli, 2020“, die auf Daten von Asphaltsuisse basiert.

In der Schweiz werden bituminöse Abfälle auf drei verschiedene Arten behandelt: (1) Verwertung im Strassenbau, (2) Deponie und (3) thermische Behandlung in den Niederlanden. Für das Jahr 2018 beträgt die Verwertungsquote ca. 89 %, ca. 3.8 % werden in den Niederlanden thermisch behandelt und die verbleibenden 7.2 % werden auf Deponien entsorgt. Die Details sind in der folgenden Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Materialbilanz von Ausbauasphalt nach Verwertungssektor (Quelle: Rubli, 2020)

Materialanfall von Ausbauasphalt	Datengrundlagen	Materialmenge in Tonnen	Materialmenge CH ⁽¹⁾ in Tonnen	Anteile in Prozenten
Ausbauasphalt PAK-Gehalt <250ppm	ARV und FSKB	2'060'895	2'205'158	80.4
Ausbauasphalt PAK-Gehalt >250ppm	Sondarabfallstatistik BAFU	539'168	539'168	19.6
Total Materialanfall		2'600'063	2'744'326	100.0
Entsorgungswege und -mengen von Ausbauasphalt/-granulaten				
		in Tonnen	in Tonnen	in Prozenten
Asphaltgranulat lose Einsatzform	ARV und FSKB	399'195	427'139	15.4
Asphaltgranulat im Recycling-Kiessand A	ARV und FSKB	130'087	139'193	5.0
Asphaltgranulat gebundene Einsatzform	ARV und FSKB	1'443'335	1'544'368	55.5
Asphaltgranulat PAK >250ppm in Verwertung in CH	Sondarabfallstatistik BAFU	336'374	336'374	12.1
Materiallageraufbau	ARV und FSKB	123'056	131'670	4.7
Verwertung Ausland PAK >250ppm	Sondarabfallstatistik BAFU	105'533	105'533	3.8
Deponierung Inland PAK >250ppm	Sondarabfallstatistik BAFU	97'261	97'261	3.5
Deponierung Inland PAK <250ppm		nicht bekannt	nicht bekannt	
Total Materialentsorgung		2'634'841	2'781'539	100.0
Differenz Materialanfall - Materialentsorgung		-34'778	-37'213	

(1) Hochgerechnet aus Anteilen der Strassenlängen in den Kantonen AR, BS, GL, NE und TI

Darüber hinaus beträgt die Gesamtmenge des jährlich produzierten Asphaltmischguts nach Angaben von Asphaltsuisse rund 5 Millionen Tonnen (zwischen 4.7 und 5.3 Millionen Tonnen/Jahr zwischen 2010 und 2019).

2.5.2 Lage in der Europäischen Union

Nach Angaben der European Asphalt Pavement Association (EAPA) belief sich die Produktion von Heiss- und Warmasphalt in Europa im Jahr 2018 auf knapp 300 Millionen Tonnen (siehe Abbildung 6). Im Vergleich zum Vorjahr fand nur eine geringe Zunahme der produzierten Menge statt, dennoch stieg die Produktion seit 2014 zum vierten Mal in Folge. Im Vergleich dazu ging die Jahresproduktion zwischen 2008 und 2014 durchschnittlich eher zurück.

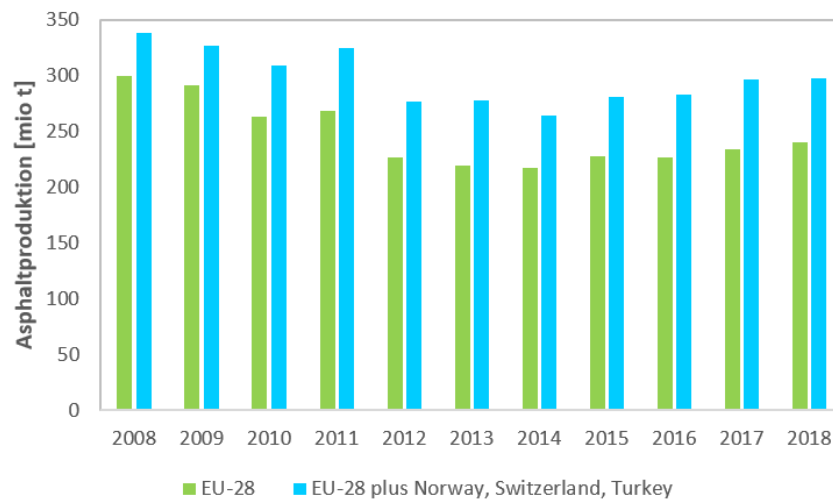


Abbildung 6: Gesamtproduktion von Heiss- und Warmasphalt in der EU-28 und EU-28 plus Norwegen, der Schweiz und der Türkei im Zeitraum 2008-2018 (Daten entnommen aus [9])

Mehr als die Hälfte (60%) der gesamten Produktion an Heiss- und Warmasphalt wurde im Jahr 2018 für die Konstruktion von Deckschichten eingesetzt (siehe Abbildung 7). 21% wurde für Tragschichten verwendet und 19% für Binderschichten [9]. Das zeigt, dass der produzierte Asphalt hauptsächlich für die Erneuerung von Deckschichten eingesetzt wurde und somit für die Erhaltung und nicht den Neubau von Strassen [9].

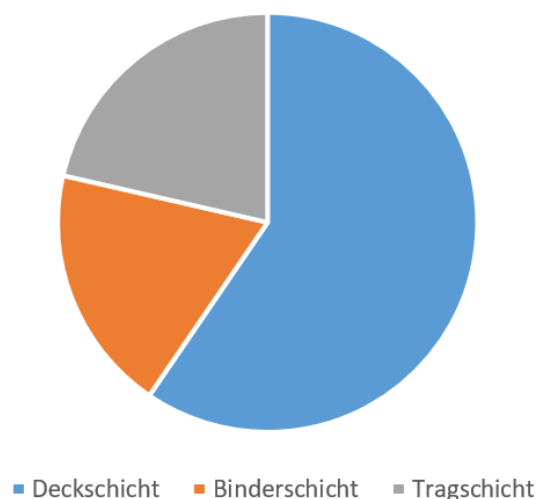


Abbildung 7: Anwendung in Deckschicht, Binderschicht und Tragschicht als Prozentsatz der Gesamtproduktion 2018 (Daten entnommen aus [9])

Betrachtet man die durchschnittliche Jahresproduktion an Heiss- und Warmasphalt in den Nachbarländern im Zeitraum 2008-2018, kann festgestellt werden, dass die grössten Mengen in Deutschland mit 41 Millionen Tonnen, gefolgt von Frankreich mit 35 Millionen Tonnen hergestellt wurden [9].

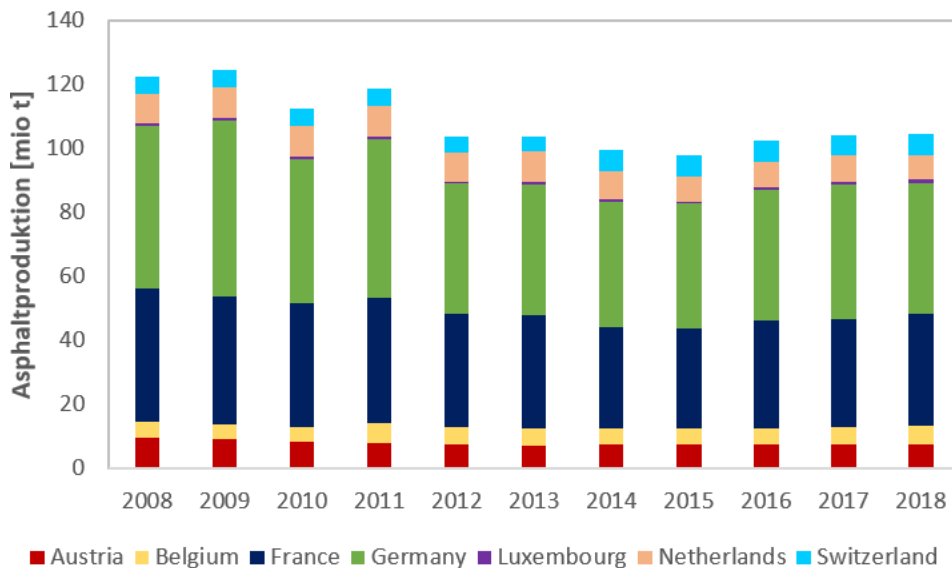


Abbildung 8: Gesamtproduktion von Heiss- und Warmasphalt in der Schweiz und nahegelegenen Ländern im Zeitraum 2008-2018 (Daten entnommen aus [9])

Die europäische Asphaltindustrie hat grosses Potenzial in Bezug auf Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft und ist bereits in verschiedenen Bereichen aktiv, um eine klimaneutrale Zukunft anzustreben [10]. Die Asphaltindustrie arbeitet beispielsweise an der Verringerung der Produktionsemissionen durch den Einsatz von alternativen Brennstoffen oder Niedertemperaturasphalt [10]. Die grösste Wirkung lässt sich jedoch durch die Wiederverwendung und das Recycling von Asphalt aus bestehenden Strassen für den Bau und die Instandhaltung neuer Strassen erzielen. Es wurde bereits nachgewiesen, dass es möglich ist, bestimmte Strassentypen zu 100 % nur mit wiedergewonnenem Material zu bauen [10].

Laut EAPA-Statistiken für das Jahr 2018 beläuft sich die Menge der in Europa produzierten bituminösen Gesteinskörnungen auf ca. 49.5 Mio. t/Jahr, wovon ca. 76 % in der Produktion neuer Asphaltmischungen wiederverwendet wurden, 20 % als ungebundene Gesteinskörnung im Strassenbau oder anderen Anwendungen eingesetzt und die restlichen 4 % in Deponien gelagert wurden [10]. Die Aufschlüsselung nach Sektoren basiert jedoch auf teilweise unvollständigen Daten nach Ländern.

In den folgenden Abschnitten 2.5.2.1 bis 2.5.2.6 werden die verfügbaren Statistiken für die in dieser Studie untersuchten Länder ausführlicher dargestellt.

2.5.2.1 Frankreich

Laut dem Umweltbericht 2018 der Dachorganisation „Routes de France“ wurden in Frankreich im Jahr 2018 insgesamt 36.3 Mio. t Asphaltmischgut produziert, wobei der durchschnittliche Anteil zugefügter Aggregate in Asphaltmischgut (heiss + warm) rund 18.1 % betrug.

Nach Angaben des IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) beliefen sich die in Frankreich produzierten bituminösen Abfälle im Jahr 2018 auf rund 7.8 Millionen Tonnen, von denen rund 83% für die Herstellung von Asphaltmischungen wiederverwendet werden. Die verbleibenden 17 % werden auf Mülldeponien entsorgt.

Das von den Marktakteuren festgelegte Ziel besteht darin, eine 100%ige Wiederverwertung des produzierten Bestandes an wiederverwertbaren bituminösen Gesteinskörnungen zu erreichen. Alle Abfälle mit zu hohen PAK-Grenzwerten werden in geeigneten Lagerstätten entsorgt (Lagerung von nicht gefährlichen oder gefährlichen Abfällen je nach Grenzwert). Es sind keine Aufbereitungsanlagen für diese Art von Abfällen geplant.

Gemäss Informationen von den thermischen Behandlungsanlagen in den Niederlanden scheint ein kleiner Teil der französischen Abfälle zu diesen Anlagen zu gelangen. Es konnte jedoch keine genauen Mengenangaben erfasst werden.

Darüber hinaus befindet sich derzeit ein Sektor in der Entwicklung, der darauf abzielt, vor Ort verschmutzte bituminöse Materialien durch Wiederaufbereitung in Form einer festen Masse wiederzuverwenden, die durch ein Input-Bindemittel, das die Schadstoffe fixiert, versteift wird. Diese Lösung ist jedoch mit der Immobilisierung der Schadstoffe zufrieden und entspricht daher nicht den definierten Bewirtschaftungsgrundsätzen der schweizerischen Gesetzgebung.

Darüber hinaus wird derzeit ein System zur Wiederverwendung von verunreinigtem bituminösem Material in situ entwickelt, wobei die Schadstoffe in einem durch Bindemittel versteiften Bett fixiert werden. Diese Lösung immobilisiert jedoch lediglich die Schadstoffe und entspricht daher nicht den von der Schweizer Gesetzgebung definierten Bewirtschaftungsgrundsätzen.

2.5.2.2 Belgien

Laut der Veröffentlichung „Asphalt in Figures 2018“ der European Asphalt Pavement Association (EAPA) wurden in Belgien im Jahr 2018 rund 5.8 Millionen Tonnen Asphaltmischgut produziert. Die Menge der produzierten bituminösen Gesteinskörnungen beläuft sich auf ca. 1.7 Millionen Tonnen, die alle bei der Herstellung von Asphaltmischungen wiederverwendet werden.

Es scheint jedoch, dass diese Zahlen nur Mengen mit PAK-Gehalten berücksichtigen, die effektiv zurückgewonnen werden können. Nach den von den thermischen Behandlungsanlagen in den Niederlanden übermittelten Informationen wird ein Teil der belgischen bituminösen Abfälle, die mit PAK kontaminiert sind, auch zu diesen Anlagen geschickt. Im Rahmen dieser Studie konnten keine detaillierten Zahlen erhoben werden.

2.5.2.3 Italien

Laut der Veröffentlichung „Asphalt in Figures 2018“ der EAPA hat Italien im Jahr 2018 rund 26 Millionen Tonnen Asphalt produziert. Die produzierte Menge an bituminösen Gesteinskörnungen beläuft sich auf rund 9 Mio. Tonnen pro Jahr. Aufgrund der historisch bedingten fehlenden Verwendung von Teer im Strassenbau haben diese Materialien einen geringen PAK-Gehalt.

Allerdings wurden 2018 nur 20 % aller rückgewonnenen bituminösen Materialien für die Herstellung neuer Asphaltmischungen verwendet, was im Vergleich zu anderen EU-Ländern eine besonders niedrige Rückgewinnungsquote darstellt. Nach Angaben des Dachverbandes SITEB ist dies vor allem darauf zurückzuführen, dass das bis 2018 geltende Gesetz die Wiederverwendung von bituminösen Abfällen nicht gefördert hat. Die Rückgewinnungsrate hat sich 2019 auf 25% erhöht.

Derzeit wird nicht verwerteter Abfall auf Deponien entsorgt, und gemäss unserem Kenntnisstand gibt es keine Bestrebungen, neue Behandlungsanlagen zu entwickeln. Vor allem wegen der fehlenden Probleme im Zusammenhang mit dem PAK-Gehalt besteht die grösste Herausforderung für Italien darin, die Verwertungsquote zu erhöhen und Recyclinganlagen zu entwickeln.

2.5.2.4 Deutschland

Abbildung 9 zeigt die jährliche Asphaltproduktion in Deutschland auf sowie den Anteil an Asphaltgranulat, der dafür wiederverwendet wurde. In Deutschland erreichte die Asphaltproduktion im Jahr 1994 einen Peak mit einer jährlichen Produktion von fast 70 Millionen Tonnen. In den darauffolgenden Jahren bis 2012 sank die Produktion auf 40 Millionen Tonnen pro Jahr. Zwischen 2012 und 2019 hat sich die Produktion mit leichten Schwankungen bei dieser Menge stabilisiert. Der Anteil an wiederverwendetem Asphaltgranulat wuchs zwischen 1982 und 1994 kontinuierlich auf 10 Millionen Tonnen an. Diese Menge änderte bis heute nur geringfügig, wobei ab 2014 ein leicht abnehmender Trend festzustellen

ist. In Deutschland wurde ab 2012 durchschnittlich etwa 20-25% der Primärrohstoffe durch wiederverwendetes Asphaltgranulat substituiert.

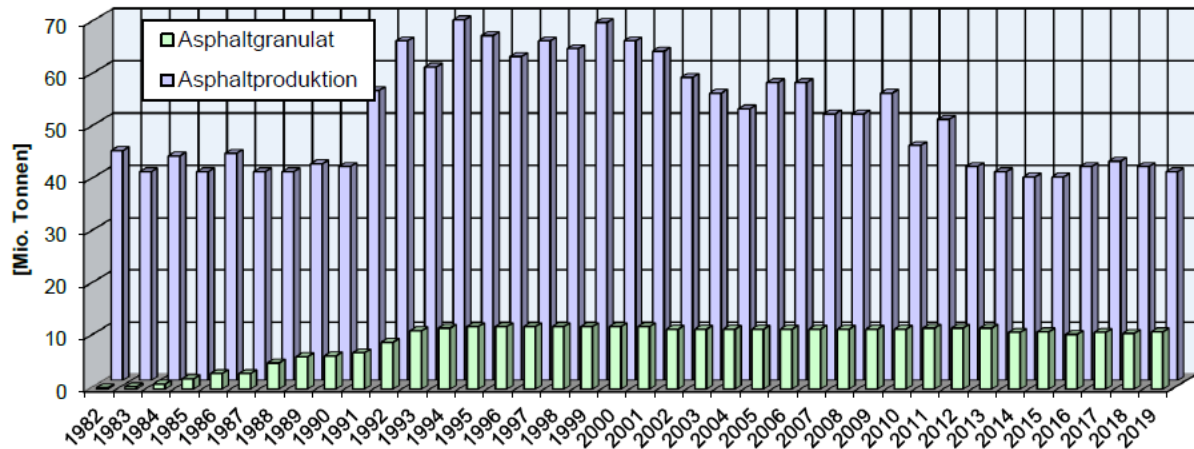


Abbildung 9: Asphaltproduktion und Asphaltwiederverwendung in Deutschland (Deutscher Asphaltverband, 2020)

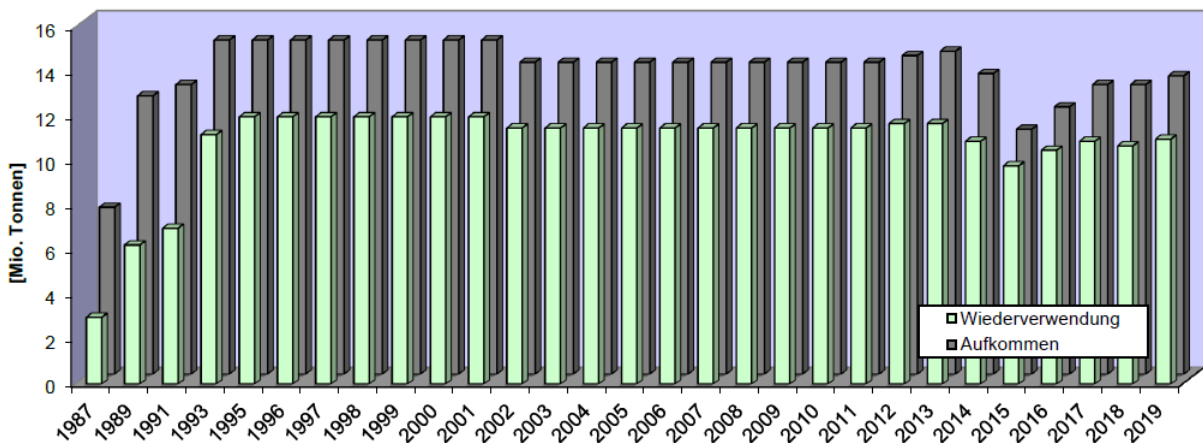


Abbildung 10: Anteil recyceltes Asphaltgranulat in Deutschland (Deutscher Asphaltverband, 2020)

Vom gesamthaft anfallenden Asphaltgranulat (14 Millionen Tonnen im Jahr 2019), dargestellt in Abbildung 10, werden ca. 11.5 Millionen (=82%) erneut für die Produktion von Asphalt eingesetzt [11]; die restlichen ca. 2.5 mio Tonnen (=20%) werden gemäss den unter Kapitel 2.3.4 aufgeführten Punkten entweder einer thermischen Verwertung zugeführt, auf einer Deponie beseitigt oder verwertet oder im Kaltmischverfahren zu hydraulisch gebundenen Tragschichten aufbereitet [3].

Wieviel Asphalt insgesamt aus Deutschland in die Niederlande transportiert wird, konnte der Deutsche Asphaltverband nicht genau quantifizieren. Gemäss Aussagen der vier niederländischen Aufbereitungsfirmen REKO BV, ATM Renewi, Jansen Recycling und Theo Pouw dürften sich die jährlich transportierten Mengen aus Deutschland auf ca. 500'000-600'000 t belaufen. Die Verwendung von teerhaltigem Asphalt in einer hydraulisch gebundenen Tragschicht ist nur sehr selten erlaubt und bei Bundesstrassen oder Autobahnen grundsätzlich ausgeschlossen. Demzufolge ist davon auszugehen, dass die restlichen rund 2 Millionen Tonnen pro Jahr auf eine Deponie gebracht werden.

2.5.2.5 Österreich

In Österreich wurden 2012-2018 jeweils zwischen 7-7.5 Millionen Tonnen Asphalt pro Jahr produziert (siehe Abbildung 8). 2018 belief sich die Menge an verfügbaren Asphaltgranulat auf 1.9 Millionen Tonnen, welches zu 70% in Warm- und Heissasphaltemischgütern und zu 30% in ungebundenen Schichten,

Kaltrecycling oder anderen Anwendungen eingesetzt wurde [9]. Demzufolge beträgt der Anteil an Recycling-Baustoffen im Asphalt ca. 25 %.

Gemäss dem Österreichischen Baustoff-Recycling Verband werden jährlich etwa 50'000 Tonnen Asphalt deponiert und nur geringe Mengen zur thermischen Behandlung in die Niederlande transportiert.

2.5.2.6 Niederlande

Die Asphaltproduktion in den Niederlanden belief sich in den letzten Jahren auf durchschnittlich etwa 8-9 Millionen Tonnen Asphalt pro Jahr, wobei die Produktion seit einem Minimum im Jahr 1985 jährlich stetig leicht zunahm (siehe Abbildung 8 und Abbildung 11). Da es in den Niederlanden praktisch kein Naturgestein gibt, müssen die Niederlande jährlich etwa zwanzig Millionen Tonnen Primärrohstoffe wie Sand und Kies unter anderem für die Asphaltproduktion importieren [12]. Aufgrund der besonderen geologischen Situation hat die niederländische Regierung dem Recycling von mineralischen Abfällen höchste Priorität eingeräumt. 99% aller Abbruchabfälle in den Niederlanden werden recycelt [12]. Zudem werden mineralische Abfälle mit PAK-Kontaminationen aus dem Ausland importiert, in den Niederlanden thermisch aufbereitet und im Anschluss an niederländische Asphalt- oder Betonproduzenten verkauft und wiederverwendet, um fehlendes Primärgestein zu substituieren.

Die Verfügbarkeit von Recyclingasphalt stieg seit 1985 parallel zur Asphaltproduktion auf aktuell ca. 4.5 Millionen Tonnen pro Jahr (siehe Abbildung 11). Dementsprechend wird aktuell etwa 50% des Asphalts in den Niederlanden basierend auf Recyclingasphalt erstellt. In den allermeisten Fällen werden sie als Tragschicht unter Autobahnen eingesetzt [12]. Zunehmend werden Recycling-Baustoffe im Sinne des Cradle-to-Cradle Prinzips auch als hochwertiger Ersatz von Sand, Kies oder Füllmaterial für Asphalt- oder Betonmischwerke verwendet [12].

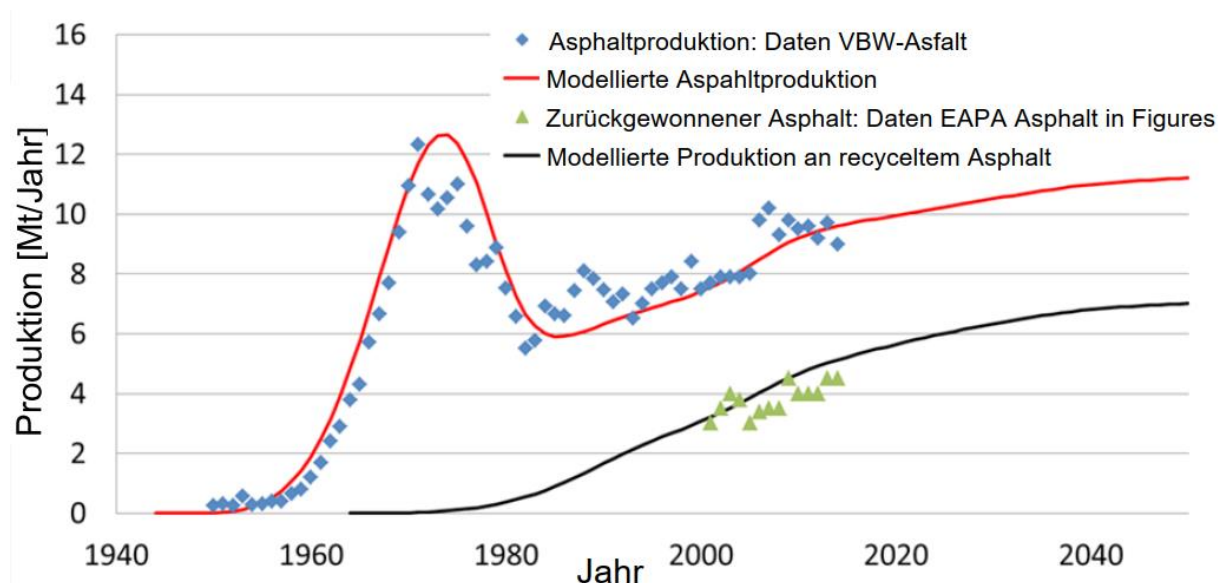


Abbildung 11: Asphaltproduktion in den Niederlanden und die Verfügbarkeit von Recyclingasphalt (entnommen aus [13])

2.5.2.7 Zusammenfassung

Tabelle 19: Zusammenfassung zu den produzierten Asphaltmengen, dem Aufkommen an bituminösen Granulaten und der Verwertungsrate in der Schweiz und ausgesuchten Ländern der EU

Land	Asphaltproduktion [mio Tonnen / Jahr]	Produktion von bituminösen Granulaten [mio Tonnen / Jahr]	Verwertungsrate
Schweiz	5	2.74	89%
Deutschland	40	11.5	82%
Frankreich	36.3	7.8	83%
Belgien	5.8	1.7	100%
Italien	26	9	20%
Niederlande	8.5	4.5	95-99%
Österreich	7.5	1.9	ca. 90%

2.6 Schätzung zukünftiger Mengen an in der Schweiz anfallendem Bitumenabfall und nicht wiedergewonnener Überschüsse

2.6.1 Ergebnisse der Studie "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz"

Die von der Energie- und Ressourcen-Management GmbH (M. Rubli) durchgeführte Studie, die Gegenstand des im August 2020 veröffentlichten Berichts "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz" ist, hat es ermöglicht, eine fundierte Abschätzung der aktuellen und zukünftigen (2018-2035) Mengen an bituminösen Abfällen in der Schweiz zu modellieren und zu erstellen, wie in Abbildung 12 unten dargestellt.

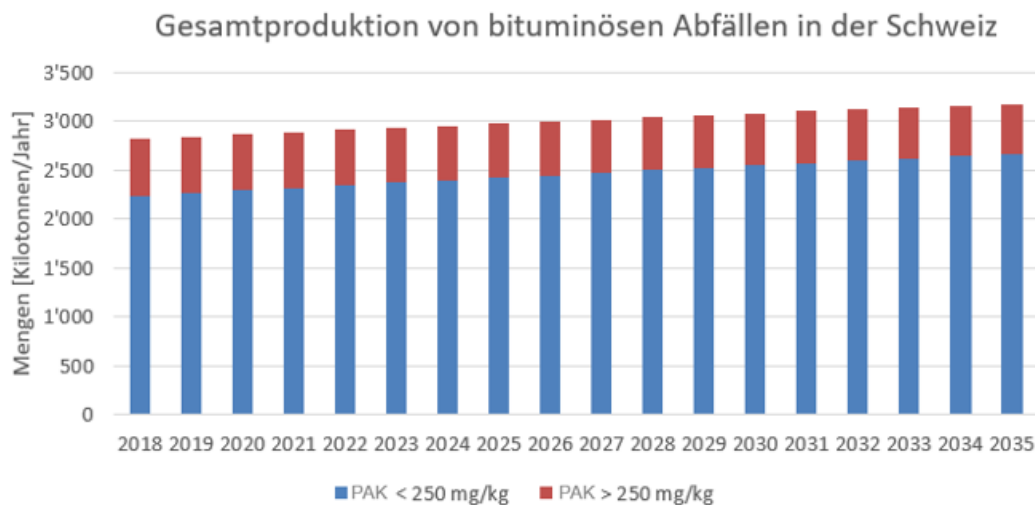


Abbildung 12: Zusammenfassung der in der Schweiz für den Zeitraum 2018-2035 erzeugten bituminösen Abfälle

Auf dieser Grundlage nimmt die Produktion von bituminösen Abfällen bis 2035 nur langsam zu. Für den Zeitraum zwischen 2026 und 2035 beträgt der Anstieg ungefähr 6%. Darüber hinaus bleibt die Verteilung zwischen Abfällen mit einem PAK-Gehalt von mehr und weniger als 250 mg / kg relativ stabil, wobei die Mehrheit der Abfälle einem PAK-Gehalt von weniger als 250 mg / kg aufweist. Tatsächlich steigt der Anteil von PAK-Abfällen <250 mg / kg leicht von 81% im Jahr 2018 auf 85% im Jahr 2035.

Eine der grössten Herausforderungen bei diesen Hochrechnungen ist die Verteilung der Mengen nach dem PAK-Gehalt (unter und über 250 mg / kg). Zur Erinnerung: Hohe PAK-Gehalte werden mit dem Vorhandensein von Teer in Strassen in Verbindung gebracht und die Praxis des "Bitumen-Teer"-Mischens wurde in der Schweiz in den Jahren 1985-1986 verboten.

Die Mengen an bituminösen Materialien mit einem PAK-Gehalt > 250 mg/kg, die zwischen 2014 und 2018 in der Schweiz angefallen sind und als Grundlage für das Modell dienen, werden aus den statistischen Daten für Sonderabfälle des BAFU entnommen. Diese Mengen steigen von rund 305'000 t / Jahr im Jahr 2014 auf rund 540'000 t / Jahr im Jahr 2018. Die Gründe für diesen Anstieg sind unklar und hängen möglicherweise mit der Intensivierung der Sanierung alter Strassen aufgrund der geplanten Deponieverbotes im Rahmen der VVEA-Anpassungen für 2026 zusammen.

Darüber hinaus ist es möglich, dass diese Mengen auch bituminöse Abfallströme mit unbestimmten PAK-Gehalten enthalten und daher der strengsten Abfallkategorie in Bezug auf die Entsorgungsanforderungen zugeordnet werden, obwohl der PAK-Gehalt des bituminösen Abfallstroms >250 mg/kg in Realität niedriger wäre.

Die zeitliche Entwicklung der Bestände und Ströme von bituminösen Abfällen mit einem PAK-Gehalt >250 ppm im Zeitraum 1960-2035 basiert auf den Parametern des Modells der Studie von Dr. S. Rubli 2013, die wiederum auf Daten einer BAFU-Publikation zu Luftschadstoffemissionen auf Baustellen (BAFU, 2001) eigenen Abschätzungen der Anteile der eingesetzten teerhaltigen Bindemittel im Zeitverlauf beruht. Diese Schätzungen basierten insbesondere auf den Ergebnissen umfangreicher Kernbohrungen und Laboranalysekampagnen in den Kantonen der Ostschweiz sowie dem Datenaustausch mit dem ASTRA. Diese Daten wurden dann leicht angepasst, um auf nationaler Ebene repräsentativ zu sein, wobei zu berücksichtigen war, dass das Vorhandensein von PAK-belasteten Belägen in bestimmten Regionen, insbesondere in der französischsprachigen Schweiz, gemäss den Angaben der Studie "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz" sehr begrenzt ist.

Es sollte jedoch erwähnt werden, dass hinsichtlich des tatsächlichen PAK-Gehalts in bituminösen Abfällen noch einige Unsicherheiten bestehen. Die Abgrenzung zwischen den Kategorien ist oft unklar, und bei Belagssanierungsarbeiten können in einigen Fällen verschiedene Kategorien des PAK-Gehalts zusammengefasst werden, wobei die insgesamt anfallende Abfallmenge entsprechend den Anforderungen der am stärksten kontaminierten Kategorie zu entsorgen ist.

Ausgehend von der Abschätzung der jährlich anfallenden Mengen an bituminösen Abfällen für die beiden Kategorien des PAK-Gehalts wurden die Materialflüsse im Rahmen der oben genannten Studie modelliert, wobei die Verwertung von bituminösen Abfällen im Strassenbau unter Berücksichtigung des gesetzlichen Rahmens und des tatsächlichen Bedarfs an Sekundärmaterialien Vorrang hatte, bezogen auf den Gesamtbedarf an bituminösem Belag für die verschiedenen Aufbauschichten (Strassenneubau und Sanierung bestehender Beläge) und die Berücksichtigung verschiedener Szenarien für die Einarbeitung von rezyklierten bituminösen Gesteinskörnungen.

Die vier betrachteten Szenarien sind in der folgenden Tabelle 20 dargestellt, wobei die ersten drei im Bericht "Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz" erwähnt werden und das vierte ein ergänzendes Szenario darstellt, das für die vorliegende Studie betrachtet wurde, um die Auswirkungen der Verwertung von rezyklierten Gesteinskörnungen als heisse Tragschicht (AC F 22 oder AC F 32 gemäss SN 640 340a) - oder möglicherweise kalt unter bestimmten Bedingungen - zu bewerten, die in den Empfehlungen bestimmter Kantone oder Dachverbände gefördert werden.

Tabelle 20: Definition von Szenarien basierend auf unterschiedlichen Annahmen zu Verwertungsraten im Strassenbau

Jahr	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund
	Referenzszenario - Extrapolation der aktuellen Situation auf 2035	Referenzszenario ohne Verwendung von Recycling-Kiessand A und Asphaltaggregaten (ungebundene oder gebundene Form)	Keine Wiederverwendung in Fundationen (Recycling-Kiessand A und Asphaltaggregate) und maximales Recycling in der Asphaltproduktion	Maximales Recycling von RC in der Asphaltproduktion und 15% Verwertung in Fundationen (heisse Fundationschicht)
	Deckschicht – Couche de roulement			
2025/26	5%	5%	30%	30%
2035	5%	5%	30%	30%
	Binderschicht – Couche de liaison			
2025/26	30%	30%	60%	60%
2035	30%	30%	60%	60%
	Tragschicht – Couche de base			
2025/26	60%	60%	80%	80%
2035	60%	60%	80%	80%
	Fundationschicht – Couche de fondation			
2025/26	11%	0%	0%	15%
2035	11%	0%	0%	15%

2.6.2 Zusammenfassung des zu lösenden Problems und der zu behandelnden nicht verwerteten Mengen

Auf der Grundlage der Ergebnisse des Modells und der neuen Bestimmungen der VVEA für die Bewirtschaftung von bituminösen Abfällen mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250 mg/kg (Verbot von Depo- nie und Verwertung) ab dem Jahr 2026 wurde die zukünftige Entwicklung der Mengen überschüssiger bituminöser Gesteinskörnungen zusammengefasst und in der Abbildung 13 für die verschiedenen Szenarien dargestellt.

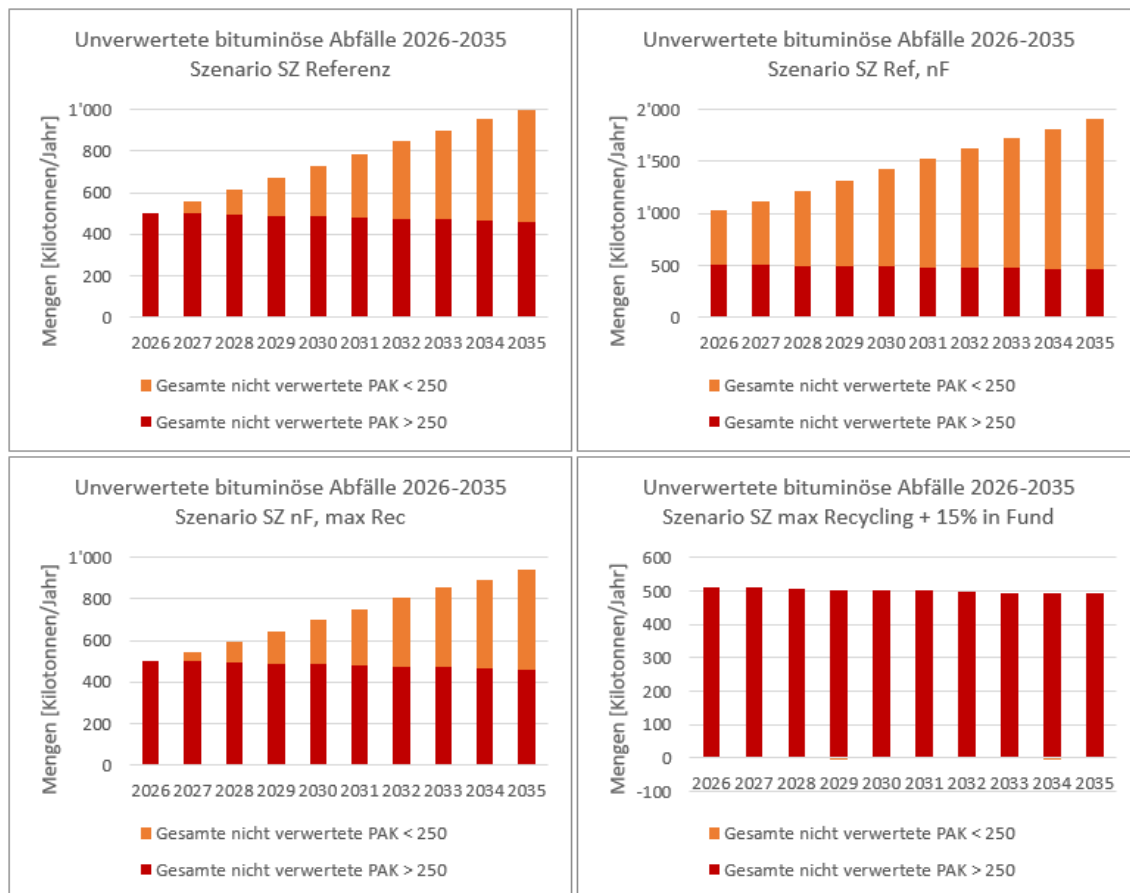


Abbildung 13: Bituminöse Abfälle, die bis 2026-2035 gemäss den verschiedenen Szenarien nicht verwertet werden.

In der folgenden Tabelle 21 sind die Mengen an nicht verwerteten bituminösen Abfällen zusammengefasst, die gemäss den vier berücksichtigten Szenarien für die Jahre 2026, 2030 und 2035 behandelt werden sollen.

Tabelle 21: Zusammenfassung der überschüssigen Mengen, die nicht zur Behandlung zurückgewonnen wurden

Zusammenfassung der Mengen an nicht verwerteten bituminösen Abfällen, die behandelt werden sollen												
Jahr	PAK > 250 mg / kg Zu behandelnde nicht reduzierbare Mengen [t / Jahr]				PAK < 250 mg / kg Zu behandelnde Mengen, Verbot für Deponierung [t / Jahr]				Maximal zu behandelnde Gesamtmenge bei Deponieverbot PAK < 250 mg / kg [t / Jahr]			
	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund	SZ Referenz	SZ Ref, nF	SZ nF, max REC	SZ Max Recycling + 15% Fund
2026	500'000			510'000	0	520'000	0	0	500'000	1'030'000	500'000	510'000
2030	490'000			500'000	240'000	940'000	210'000	0	730'000	1'420'000	700'000	500'000
2035	460'000			490'000	540'000	1'450'000	480'000	0	1'000'000	1'910'000	940'000	490'000

Nach den derzeit festgelegten regulatorischen Grundlagen stellen die **Mengen der PAK-Kategorie >250 mg / kg das unumstössliche Minimum dar, das ab dem Jahr 2026 einer geeigneten Behandlungsanlage zugeführt werden muss.**

Diese Menge wird von den betrachteten Recycling-Szenarien nicht beeinflusst und bleibt über den gesamten betrachteten Zeitraum relativ konstant. Sie wird nach dem Ergebnis der Modellierung auf **500'000 t / Jahr für das Jahr 2026, auf 490'000 t / Jahr für das Jahr 2030 und auf 460'000 t / Jahr für das Jahr 2035 geschätzt.** (Die geringfügig höheren Mengen, die für das Szenario „SZ Max Recycling + 15% Foundation“ erhalten wurden, sind nicht repräsentativ und hängen mit einer Nebenwirkung des Modells zusammen.)

Für die **PAK-Kategorie < 250 mg/kg** variieren die zu behandelnden Mengen je nach dem betrachteten Verwertungsszenario. Sie berücksichtigen auch die Umsetzung des vom BAFU geplanten Deponieverbots ab 2026.

Die günstigsten Szenarien in Bezug auf die Verwertungsquoten im Strassenbau sind dadurch gekennzeichnet, dass keine oder nur relativ geringe zu behandelnde Überschüsse anfallen:

- 2026: Für die beiden Szenarien „SZ nF max Recycling“ und „SZ max Recycling + 15% Foundation“ ist kein Überschuss zu verarbeiten.
- 2030: Überschuss von 210'000 t / Jahr für das Szenario „SZ nF max Recycling“ und kein Überschuss für das Szenario „SZ max Recycling + 15% Foundation“
- Im Jahr 2035: Überschuss von 480'000 t / Jahr für das Szenario „SZ nF max Recycling“ und kein Überschuss für das Szenario „SZ Max Recycling + 15% Foundation“

Es ist also zu erkennen, dass das Szenario "SZ max Recycling + 15% Foundation" Überschüsse der PAK-Kategorie < 250 mg/kg über den gesamten Betrachtungszeitraum (2026-2035) vollständig vermeidet. Nach dem Modell und zusätzlichen Berechnungen würde die vollständige Rückgewinnung von PAK < 250 mg/kg bituminöser Abfälle tatsächlich bereits im Jahr 2035 mit dem Einbau bituminöser Gesteinskörnungen in die Foundationsschichten (bewehrte Tragschicht in gebundener Form) erreicht, was etwa 10 % der insgesamt eingebauten Tragschichtmenge entspricht.

Die Referenzszenarien (SZ Referenz und SZ Referenz nF), die von der Beibehaltung der derzeitigen Verwertungsquoten ausgehen und daher aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcen- und Abfallwirtschaft keine bevorzugte Variante darstellen, zeichnen sich durch deutlich höhere Überschüsse aus, die von 0 bis 520'000 t/Jahr im Jahr 2026 und von 540'000 bis 1'450'000 t/Jahr im Jahr 2035 reichen.

Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der zu favorisierenden Verwertungsszenarien ergibt sich folgende Synthese der insgesamt zu behandelnden Überschussmengen mit allen PAK-Konzentrationen zusammengefasst:

- 2026 : 500'000 t / Jahr
- 2035 : zwischen 490'000 t / Jahr und 940'000 t / Jahr

Die geografische Verteilung der Gesamtmenge an überschüssigen bituminösen Abfällen in der gesamten Schweiz ist ebenfalls ein entscheidender Punkt bei der Beurteilung der Machbarkeit zukünftiger Behandlungsanlagen.

Eine erste Schätzung der Verteilung nach Kantonen wurde auf der Grundlage der Verteilung der Strassenproduktionsströme (Asphaltmasse, 2013) vorgenommen und ist in der Abbildung 14 dargestellt. Die Zahlen nach Kantonen sind in Anhang D für die verschiedenen Szenarien dargestellt.

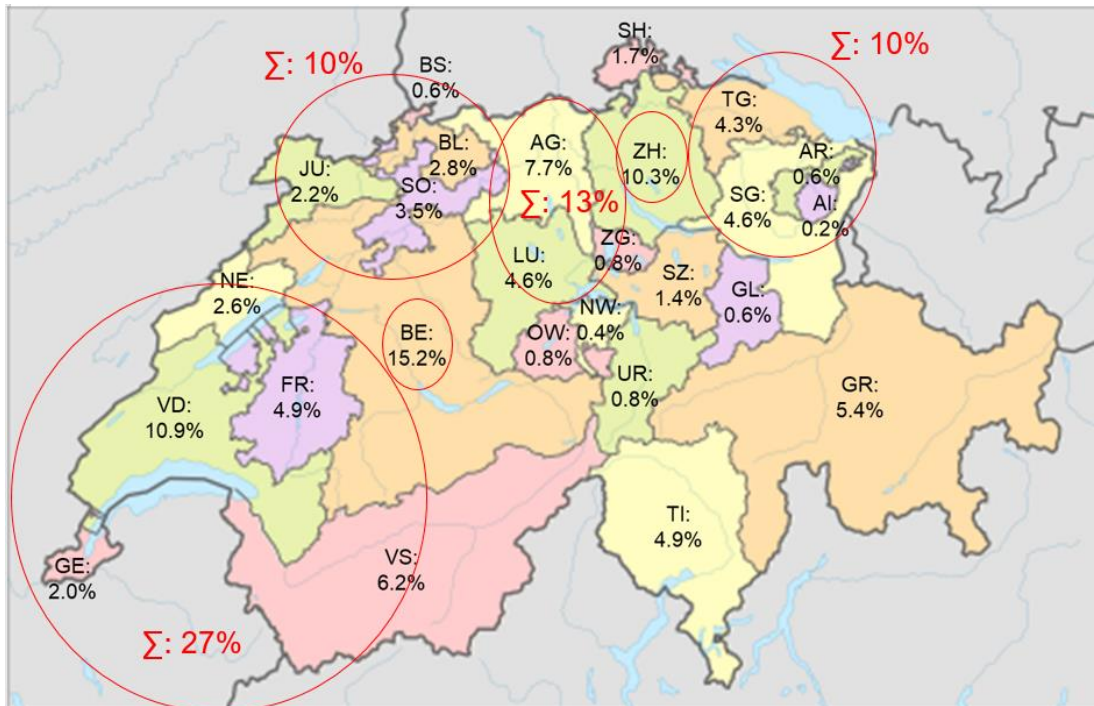


Abbildung 14: Verteilung der zu behandelnden Mengen nach Kantonen (in Prozent) auf der Grundlage des Strassenproduktionsflusses

Darüber hinaus ist die Verteilung der zu behandelnden Mengen pro Schicht und insbesondere die Korngrössenverteilung ein wichtiges Element in Bezug auf die Recyclingmöglichkeiten.

Da genaue Daten zu diesem Thema nicht verfügbar sind, wurde zu Informationszwecken eine vorläufige Schätzung vorgenommen, die auf den folgenden zwei Annahmen beruht:

- durchschnittliche Massenprocentsätze der verschiedenen Korngrössen nach Schichttyp wie in Tabelle 20 unten dargestellt;
- gleichmässige Verteilung der Mengen an produzierten bituminösen Aggregaten, d.h. 1/3 aus Deckschicht, 1/3 aus Binderschicht und 1/3 aus Tragschicht.

Tabelle 22: Vereinfachte Zusammenfassung der Partikelgrössenverteilung der verschiedenen Schichten.

Schichten	Massenprocentsatz [%] grösser als			
	>16 mm	>11 mm	>8 mm	>2 mm
Deckschicht	0 0	0 – 10 3%	0 – 60 10%	40 – 90 70%
Binderschicht	0 – 10 3%	0 – 10 5%	10 – 40 20%	45 – 80 60%
Tragschicht	0 – 40 20%	10 – 40 30%	10 – 70 40%	50 – 80 70%

X – Y:

Variationsbereich

X:

Durchschnittswert für die Bilanz der Ströme in dieser Studie

3 Stand der Technik - Behandlungsanlagen

3.1 Übersicht – Gesamtansicht

Die Stellung und Rolle von Behandlungsanlagen für bituminöse Abfälle muss den Grundsätzen und Zielen der Schweizer Abfallwirtschaft gegenübergestellt werden, die insbesondere in Artikel 30 des Umweltschutzgesetzes definiert sind, mit folgenden Prioritäten:

- a. *Die Erzeugung von Abfällen soll soweit möglich vermieden werden.*
 - ⇒ Bei bituminösen Abfällen soll dieses Ziel durch die Entwicklung von Techniken und Materialien erreicht werden, die die Haltbarkeit der Beläge verbessern und die Erneuerungshäufigkeit der verschiedenen Schichten zeitlich strecken.
- b. *Abfälle müssen soweit möglich verwertet werden.*
 - ⇒ Bei bituminösen Abfällen muss dieses Ziel zunächst durch die Rückgewinnung bituminöser Gesteinskörnungen bei der Herstellung neuer Beläge gemäss den in Kapitel 2.4 beschriebenen Elementen und Grundsätzen erreicht werden, indem Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es ermöglichen, die ehrgeizigsten Szenarien in Bezug auf die Verwertungsquoten aus Kapitel 2.6.1 zu erreichen (Entwicklung des normativen Rahmens und der Praktiken der Fachleute; technologische Entwicklung der Asphaltanlagen und der Bewirtschaftungsmethoden).

Für überschüssige Mengen, die nicht als rezyklierte Gesteinskörnungen zurückgewonnen werden, ist es wichtig, so weit wie möglich die Aufbereitungsverfahren zu bevorzugen, die es ermöglichen, die stoffliche Verwertung der verschiedenen Bestandteile der bituminösen Abfälle nach Durchlaufen der Aufbereitungsanlagen zu optimieren.

Die ökologische Optimierung dieser Prozesse muss aus einer breiteren Perspektive der Nachhaltigkeit angegangen werden, wobei neben Fragen des Ressourcen- und Abfallmanagements auch insbesondere Energie- und Klimafragen berücksichtigt werden müssen.
- c. *Abfälle müssen umweltverträglich und, soweit es möglich und sinnvoll ist, im Inland entsorgt werden.*
 - ⇒ Eine umweltverträgliche Entsorgung ist für diejenigen Mengen oder Fraktionen zu erwarten, die nach dem derzeitigen Stand der Technik und den geplanten zukünftigen Entwicklungen nicht sinnvoll verwertet werden können.

Bei mit PAK verunreinigten Gesteinskörnungen (>250 mg/kg) ist in jedem Fall mit einer Entsorgung des Bindemittels oder der bindemittelreichen Fraktion zu rechnen.

Über die Aufbereitung von bituminösen Gesteinskörnungen für den Strassenbau hinaus beinhalten die verschiedenen Aufbereitungsoptionen, die in diesem Kapitel entwickelt werden, eine Trennung zwischen dem bituminösen Bindemittel oder einer bitumenreichen Mischfraktion einerseits und der mineralischen Fraktion andererseits, wie in der folgenden Abbildung 15 dargestellt.

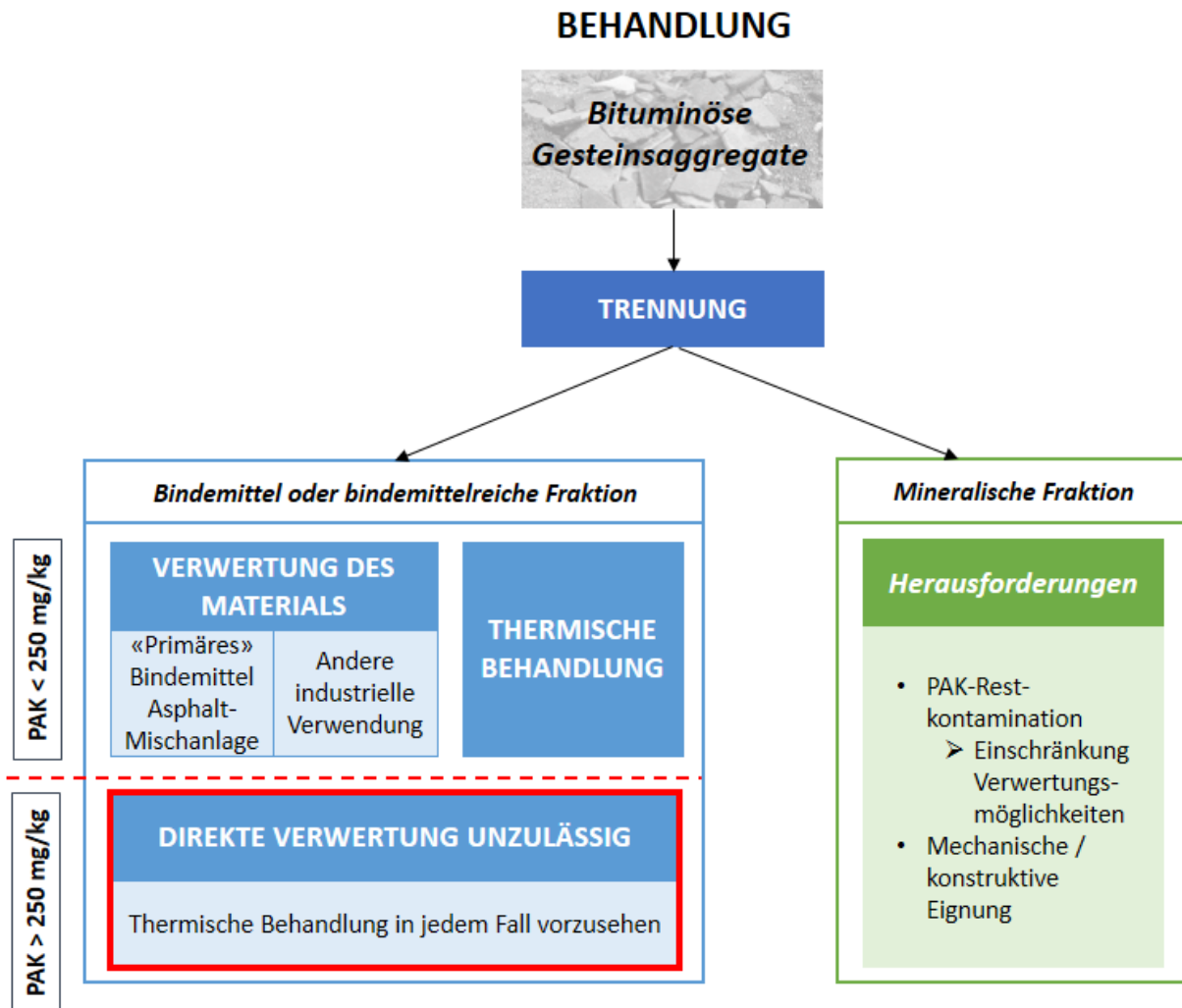


Abbildung 15: Prinzip der Trennung der mineralischen Fraktion vom Bindemittels bzw. der bindemittelreichen Fraktion

Für die Kategorie der bituminösen Abfälle mit einer PAK-Konzentration von mehr als 250 mg/kg ist in jedem Fall eine thermische Behandlung vorzusehen, und zwar entweder als Erstbehandlung des gesamten betroffenen Abfallstroms oder als spezifische Behandlung der bindemittelreichen Fraktion aus einem vorherigen Behandlungsschritt.

Die Beschreibung und Bewertung der verschiedenen Arten von Behandlungen, die in Betracht gezogen werden können, werden in den folgenden Kapiteln 3.2 bis 0 vorgestellt, wobei zwischen den folgenden Behandlungen unterschieden wird:

- Thermische Aufbereitung
- Mechanische Aufbereitung
- Chemisch-physikalische Aufbereitung
- Kombinierte Aufbereitungsverfahren

3.2 Thermische Behandlung

Gemäss VVEA Art. 3 ist die thermische Behandlung von Abfällen definiert als *die Behandlung von Abfällen mit so hoher Temperatur, dass umweltgefährdende Stoffe zerstört oder durch Mineralisierung physikalisch oder chemisch gebunden werden.*

Für die thermische Behandlung von PAK-belastetem Asphalt gibt es folgende Möglichkeiten:

- Thermische Behandlung in einer spezialisierten Anlage für mineralisch kontaminierte Bau- und Abbruchabfälle in den Niederlanden
- Thermische Behandlung in den bestehenden Infrastrukturen der Schweizer Zementindustrie
- Pyrolyse

3.2.1 Thermische Behandlung in einer spezialisierten Anlage

3.2.1.1 Prozessbeschreibung

- Zerkleinerung

Der Asphaltaufbruch wird zunächst auf die korrekte Korngrösse gebrochen, bevor die Materialien thermisch aufbereitet werden. Die Unternehmen wenden dabei unterschiedliche Korngrössenverteilungen an. Wird der Asphaltaufbruch gemeinsam mit organisch kontaminierten Böden thermisch behandelt, wird der Asphalt in eher kleinere Korngrössen < 40 mm zerkleinert. Wird Ausbauasphalt separat in einer Monofraktionsanlage behandelt, wird er ungefähr auf Korngrössen < 100 mm gebrochen.

- Thermische Aufbereitung

Durch die Verbrennung in einer Monofraktionsanlage kann teerhaltiger Ausbauasphalt von organischen Schadstoffen befreit werden und es bleiben die ursprünglich zur Herstellung des Asphalts verwendeten mineralischen Rohstoffe als feste Verbrennungsrückstände übrig. Die mineralischen Abfälle werden in einem Drehrohrofen bei Temperaturen zwischen 850°C bis 1050°C behandelt. Bei diesen Temperaturen werden die organischen Anteile und somit auch PAK beinahe komplett (< 0.5 mg/kg) zerstört [14].

- Kühlung

Nach dem Drehrohrofen haben die mineralischen Rückstände noch eine Temperatur zwischen 500°C bis 750°C. In einem Rostkühler wird das Material von unten mit kühler Luft durchströmt. Die dabei erwärmte Luft wird zur Wärmerückgewinnung der Verbrennung und der Abgasreinigung zugeführt.

- Abgasreinigung

Die Abgase können nach dem Rostkühler noch geringe Anteile an unverbrannten organischen Stoffen beinhalten und passieren daher eine Nachverbrennung. Die organischen Bestandteile werden in der Nachverbrennung bei einer Verweilzeit von mindestens 2 Sekunden bei 850°C vernichtet. Die Abwärme der Nachverbrennung wird über einen Dampferzeuger und eine Turbine in Strom umgewandelt und teilweise auch als Fernwärme genutzt. Nach der Nachverbrennung gelangt die Abluft in einen vierstufigen Reinigungsprozess bestehend aus zwei Gewebefiltern, einer De-NOx-Anlage, in der NOx mit Ammoniak zu N₂ und H₂O reagiert, und einem DeSOx-Gaswäscher, wo zur Entschwefelung durch die Zugabe von Calciumcarbonat und Calciumoxid in einem Gegenstromwäscher Gips produziert wird. Die Abgase werden durch diese vier in Serie durchgeführten

Prozesse so gereinigt, dass die europäischen Emissionsstandards erfüllt werden und die gereinigte Abluft über einen Kamin in die Umgebung abgegeben werden kann.

- Verwertung

Nach der thermischen Behandlung und der Rostkühlung bleiben die mineralischen Bestandteile in Form von Sand, Kies, Gips und Füllstoffen übrig. Durch Windsichten werden die Partikel in unterschiedliche Grössenfraktionen klassiert und können nach anschliessender Siebung an die niederländischen Asphalt- und Betonindustrie verkauft werden. Die chemische Analyse von IMP Baute AG ergab, dass die PAK-Konzentrationen nach der thermischen Reinigung < 0.5 mg/kg liegen und daher sowohl den Schweizer Grenzwert von 250 mg/kg wie auch den Grenzwert der Niederlande von 75 mg/kg PAK-10 problemlos erfüllen [14]. Neben den mineralischen Produkten werden Elektrizität und Wärme produziert, welche ins Strom- bzw. Fernwärmenetz eingespeist und valorisiert werden können [15].

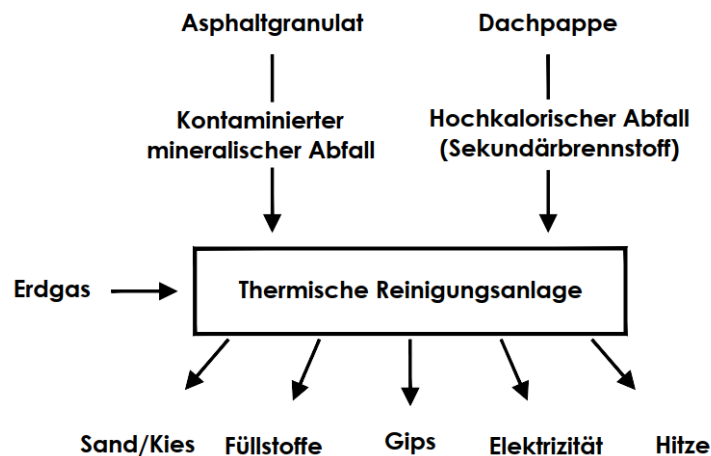


Abbildung 16: Übersicht zu den Inputs und Outputs im thermischen Reinigungsverfahren von REKO

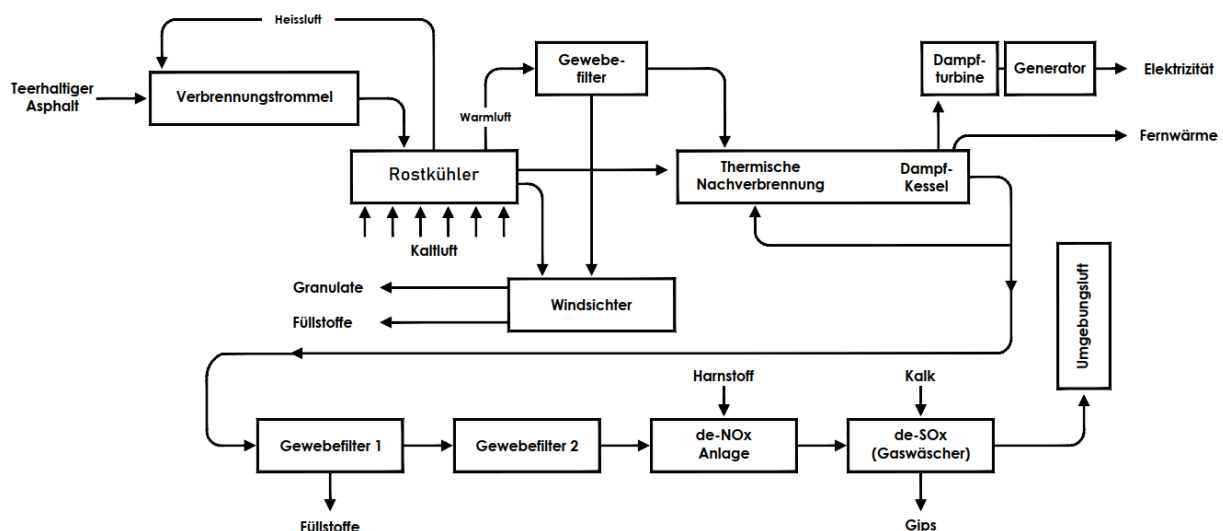


Abbildung 17: Prozessschema der thermischen Reinigung bei REKO B.V.

3.2.1.2 Stand der Technik und Entwicklung

Für die thermische Behandlung von teerhaltigem Asphaltaufbruch gibt es innerhalb von Europa einen grossen Hotspot in den Niederlanden. Insgesamt vier niederländische Unternehmen (REKO B.V., ATM Renewi, Theo Pouw, Jansen Recycling) betreiben bereits seit mehreren Jahren erfolgreich grosstechnische Anlagen zur thermischen Aufbereitung von mineralischen Abfällen. Die vier Unternehmen besitzen zusammen eine Gesamtkapazität von 3'900'000 Tonnen pro Jahr, was die durchschnittlich anfallenden Mengen an teerhaltigem Asphaltaufbruch in den Niederlanden von jährlich rund 1'100'000 Tonnen bei weitem übersteigt [16]. Die restlichen Behandlungskapazitäten werden mit teerhaltigem Asphaltaufbruch aus den umliegenden Ländern gedeckt, wobei Materialien aus Deutschland, Frankreich, der Schweiz, Belgien, Luxemburg, Grossbritannien und Dänemark angenommen werden. Insgesamt werden aus diesen Ländern vermutlich ungefähr 1'000'000 Tonnen Asphalt pro Jahr in die Niederlande transportiert, welcher nach der thermischen Aufbereitung in Form von Kies, Sand, Füllstoffen und Gips an niederländische Asphalt- und Betonproduzenten verkauft werden.

Bei der Firma REKO wird Asphaltaufbruch als Monofraktion thermisch behandelt. Durch die Inbetriebnahme einer zweiten Anlage im Herbst 2020 mit einer Kapazität von 1.2 Millionen Tonnen pro Jahr stieg die Gesamtkapazität von REKO von 0.65 auf 1.85 Millionen Tonnen pro Jahr (siehe Tabelle 23). Bei weiterhin wachsender Nachfrage für die thermische Reinigung von teerhaltigen Asphaltaufbrüchen in Zentraleuropa plant REKO langfristig auch den Bau einer dritten Reinigungsanlage in den Niederlanden oder auch am Standort Deutschland.

Die Anlage der Firma ATM Renewi besitzt eine Kapazität von 1.2 Millionen Tonnen pro Jahr, wobei hier organisch belastete Böden zusammen mit teerhaltigen Asphaltaufbrüchen behandelt werden. Zudem gibt es noch zwei kleinere Anlagen der Firmen Theo Pouw und Jansen Recycling, welche eine Kapazität von 550'000 bzw. 300'000 Tonnen pro Jahr aufweisen (siehe Tabelle 23).

Es gab auch schon in Deutschland und in der Schweiz Bestrebungen, eine solche thermische Aufbereitungsanlage zu realisieren. Gemäss aktuellem Kenntnisstand wurden jedoch sämtliche Anläufe wieder abgebrochen, da sich neben den bereits etablierten niederländischen Reinigungsanlagen keine konkurrenzfähige Lösung abzeichnete.

Tabelle 23: Übersicht zu den thermischen Reinigungsanlagen in den Niederlanden

	REKO BV	ATM Renewi	Theo Pouw	Jansen Recycling	Total
Anzahl Anlagen	2	1	1	1	5
Gesamtkapazität [t/Jahr]	1'850'000	1'200'000 (vorrangig Behandlung von organisch belasteten Böden)	550'000	300'000	3'900'000

3.2.1.3 Materialflüsse

In Abbildung 18 ist das Massenflussdiagramm der thermischen Verwertung auf den Anlagen REKO I und REKO II dargestellt. Für die Verarbeitung von 1 t teerhaltigem Asphaltaufbruch werden je nach Anlage 300 bzw. 320 MJ Erdgas für die Befeuerung benötigt. Zudem werden für die Abgasreinigung 0.5 l Harnstoff, 2.5 kg Kalk und 145 kg Wasser pro behandelte Tonne zur Entfernung der Stickstoff- und Schwefeloxide benötigt. Als Produkte entstehen schlussendlich aus 1 t Asphalt 505 kg Kies, 300 kg Sand, 40 kg Füllstoffe, 5kg Gips, 200 kg Wasserdampf sowie 91 MJ Strom und 90 MJ Abwärme bei

REKO I; bei REKO II können sogar 600 MJ Strom und 650 MJ Abwärme zurückgewonnen werden. Nach dem Prozess bleiben also ungefähr 85 M.% in Form von Kies, Sand, Füllstoffen und Gips übrig. Die restlichen 15 M.% setzen sich zusammen aus Teer (4-7%), der verbrannt wird, und Wasser (5-8%), welches verdampft.

Durch Optimierung des Wärmerückgewinnungskonzepts konnte REKO auf der zweiten Anlage deutliche Fortschritte bei der energetischen Ausbeute erzielen. Bei REKO II wird netto mehr Energie aus dem Prozess gewonnen als zugegeben, da durch die Verbrennung des Teers viel Energie freigesetzt wird und diese im Dampfkessel energieeffizient zurückgewonnen werden kann. Der teerhaltige Asphaltaufbruch besteht zu ca. 5 % aus Teer, welcher einen Heizwert von ca. 40 MJ pro kg aufweist. Der Asphaltaufbruch liefert also einen Heizwert von ca. 2000 MJ pro Tonne Material [17].

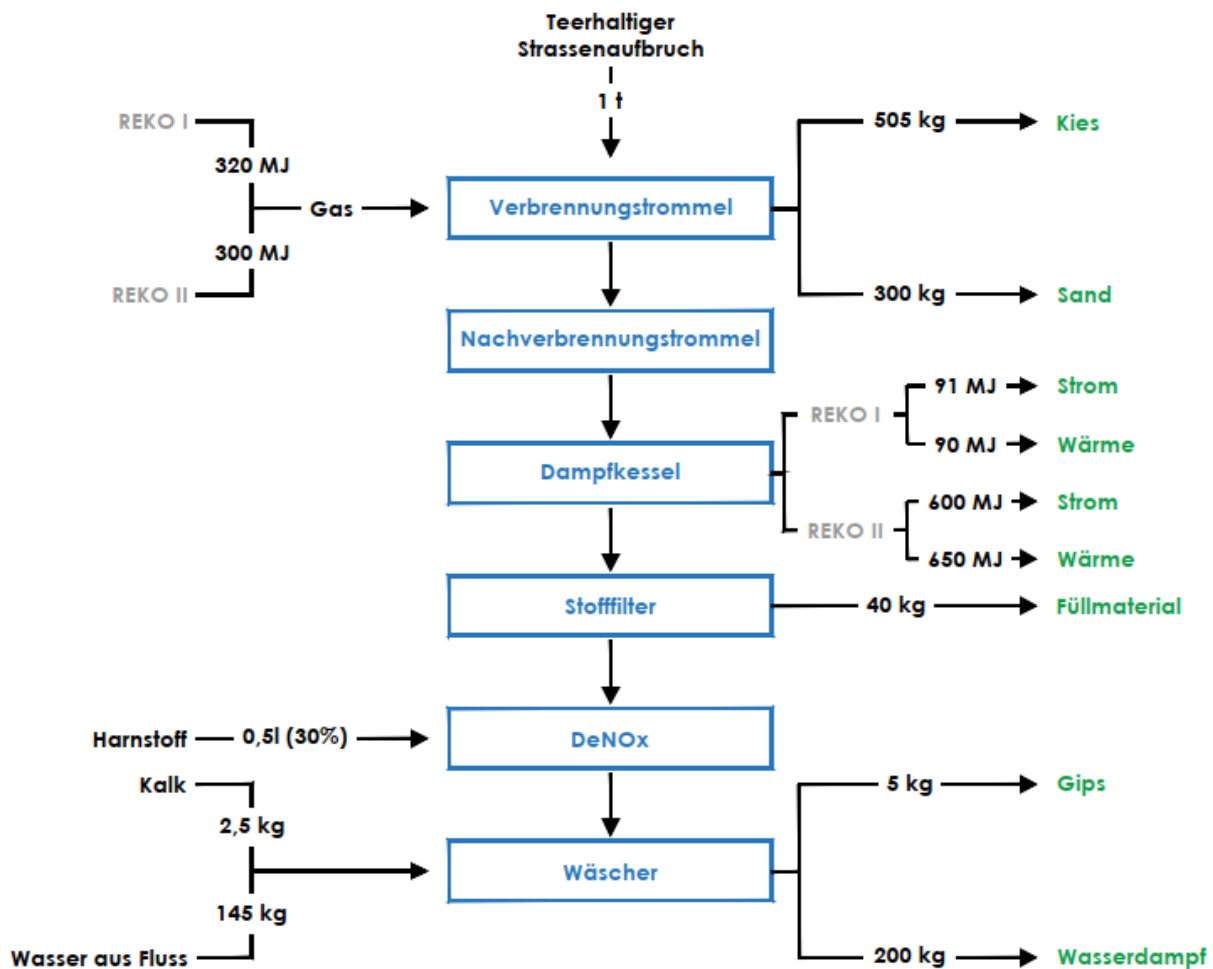


Abbildung 18: Massenflussdiagramm der thermischen Reinigungsverfahren von REKO (entnommen aus [17])

3.2.1.4 Produktqualität

In einer vom BAFU beauftragten Untersuchung von thermisch aufbereitetem Ausbauasphalt wurde festgestellt, dass die Gesteinskörnungen durch eine thermische Verwertung gemäss den angewendeten Verfahren in den Niederlanden erheblich in der Qualität beeinträchtigt werden [14]. Zwar werden die PAK-Konzentrationen beinahe komplett ($< 0.5 \text{ mg/kg}$) zerstört, die resultierenden Gesteins- und Sandprodukte eignen sich aber nicht für einen erneuten Einsatz in der Asphaltproduktion [14]. Das Gesteinsmaterial war nach der thermischen Behandlung teilweise mit Verbrennungsschichten und Reaktionsrändern bedeckt und zerfiel, wenn man es weiterverarbeiten wollte [14]. Gemäss IMP Bautest werden während der thermischen Behandlung vermutlich Mikrorisse in den Gesteinskörnern induziert, die bei

jeder weiteren Bearbeitung des Materials zu einer Korngrössenverkleinerung führen. Insgesamt stieg der Anteil poröser, weicher und somit ungeeigneter Körner massiv an (Zunahme je nach Korngrössenfraktion bis zu 8.1 M-%). Zudem fand durch die hohen Temperaturen eine Umwandlung von gut bindendem Kalzit zu sprödem, schlecht bindendem Kalk statt, welcher als Verbrennungsschicht die Gesteinskörnungen bedeckte. Da Kalk sehr hydrophil ist, war das Haftvermögen nach thermischer Verarbeitung grösser als bei natürlichen Gesteinen. Die IMP Bautest AG stellt als Schlussfolgerung fest, dass die thermisch behandelten Gesteinskörnungen in der Schweiz nicht für Asphaltbeläge geeignet sind, da das Material in praktisch allen wesentlichen Eigenschaften deutlich geschwächt wird. Unter Umständen könnten die Gesteinsprodukte in Foundationsschichten oder im Betonbau zum Einsatz kommen, dies müsste aber weiter überprüft werden [14]. Auf jeden Fall muss das thermisch behandelte Material nicht mehr auf einer Deponie Typ E gelagert werden, sondern erfüllt auch die Anforderungen des Deponie Typs A. Auf jeden Fall können die Gesteinsprodukte in der Schweiz nur für weniger spezifische Anwendungen verkauft werden, wodurch geringere Einnahmen durch den Produktverkauf resultieren.

In den Niederlanden werden die Gesteinsprodukte erneut im Strassenbau eingesetzt; sie erfüllen die Qualitätsanforderungen (CE-Konformität) für den Einsatz sowohl im Strassenbau wie auch im Betonbau. Da als Produkt jedoch ein Mischgut aus Sand und Kies erhalten wird, eignet sich die Mineralik nicht für den Bau von Deckschichten, da die Griffigkeit nicht ausreichend ist.

3.2.1.5 Wirtschaftlichkeit

- Kritische Kapazität

Grundsätzlich gilt für die Rentabilität einer thermischen Aufbereitungsanlage, dass die Behandlung umso rentabler wird, je grösser die Kapazität der Anlage ist. Bezüglich der minimalen Kapazität variieren die Aussagen der niederländischen Anlagenbetreiber zwischen 300'000 t bis 1'200'000 t pro Jahr. In der Schweiz würde das bei den prognostizierten Mengen an Ausbauasphalt mit > 250 mg/kg (500'000 – 1'000'000 t/Jahr abhängig vom gewählten Szenario) auf eine zentralisierte Anlage hinauslaufen, zumal die Investitionskosten in der Schweiz erfahrungsgemäss nochmals höher ausfallen würden als in den Niederlanden.

- Investitionskosten

Die Investitionskosten für eine thermische Verwertungsanlage sind sehr hoch und würden sich in der Schweiz schätzungsweise auf mind. 100-200 Millionen CHF bei einer Anlagenkapazität von 500'000-1'000'000 t/Jahr belaufen. Für die Anlagen von REKO BV beliefen sich die Investitionskosten auf 85 Millionen Euro für die kleinere Anlage REKO I mit einer Kapazität von 650'000 Tonnen pro Jahr bzw. 125 Millionen Euro für die grössere Anlage REKO II mit einer Kapazität von 1.2 mio Tonnen pro Jahr.

- Transportkosten

- LKW-Transport ab Ursprungsort bis Rheinhafen

Der Transport innerhalb der Schweiz zu den Häfen in Basel oder Birsfelden wird fast ausschliesslich per LKW durchgeführt, da der Ursprungsort selten direkt an einer Bahnlinie liegt. Der Transport wird durch regionale Transportfirmen durchgeführt und beläuft sich in der Regel auf 5-15 CHF pro Tonne (Preis bezieht sich auf Region Nordwest Schweiz).

- Schifffahrt ab Basel / Birsfelden bis in die Niederlande

Der Transport von Ausbauasphalt wird per Schiff ab Basel oder Birsfelden durchgeführt. Ein Wasseranschluss ist zwingend notwendig, um das Material kostengünstig per Schiff anliefern zu können. Die Transportkosten per Schiff belaufen sich auf durchschnittlich ca. 15 € pro Tonne Asphalt. Da in der Schweiz mehr importiert als exportiert wird, ist der Asphalttransport für Schweizer Transportunternehmen eine gute Möglichkeit, auch auf dem «Rückweg» nicht mit leeren Schiffen fahren zu müssen. Die Transportpreise für die Schifffahrt sind daher relativ gering, weil die Schiffe sonst leer in Richtung Niederlande fahren würden. Zudem ergeben sich durch die Fliessrichtung des Rheins in Richtung Niederlande Einsparungen beim Dieselverbrauch. Die Preise sind abhängig von der Schiffsgrösse und den Wasserständen während des Transports. Ausschlaggebend für die Berechnung des Transportpreises

sind die Pegelstände in Maximiliansau (Maxau) und Koblenz (Kaub) [18]. Ab einem Wasserpegel von Maxau 4.50m und einem Wasserpegel von Kaub 2.00m gelten die Kleinwasserzuschläge, wobei pro 10 cm Abnahme ca. 10 % Mehrkosten anfallen [18] [19].

In der Nähe des Pegels Kaub ist der Wasserstand im Vergleich zu anderen Pegeln im Ober- und Mittelrhein mit am niedrigsten [20]. Bei Niedrigwasserständen sinkt die nutzbare Tiefe der Fahrrinne und die Schiffe können weniger Frachtmaterial transportieren oder müssen die Fahrtgeschwindigkeit reduzieren. Bis zu einem Pegel Kaub von etwa 250 cm bis 260 cm können die Containerschiffe auf ihre volle Tragfähigkeit abgeladen werden [20]. Die maximale Abladung sinkt danach mit fallendem Pegel kontinuierlich, was in der Abbildung 19 beispielhaft dargestellt ist [20]. Eine behördliche Sperrung der Rheinschifffahrt aufgrund von Kleinwasser gibt es jedoch nicht; solange der Schiffsführer es nautisch verantworten kann, ist eine Fahrt möglich [20].

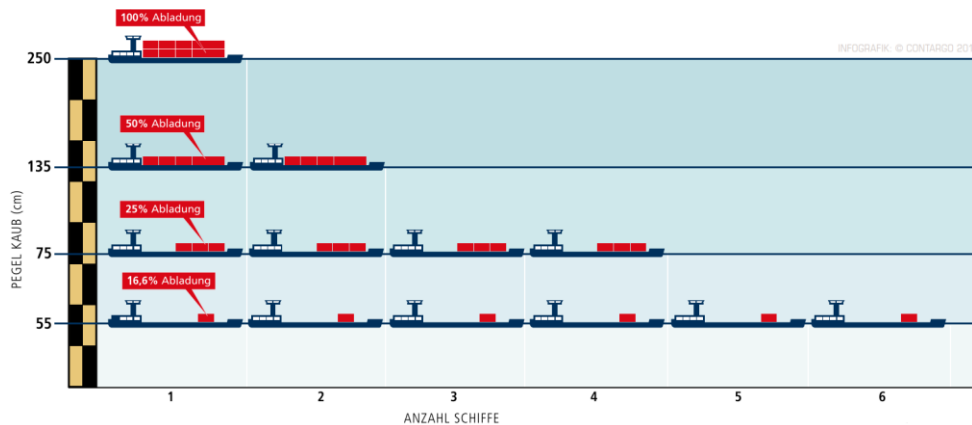


Abbildung 19: Anzahl der Schiffe für den Abtransport der gleichen Tonnage [20]

Seit der Jahrtausendwende war der Wasserspiegel des Rheins insbesondere in den Jahren 2003, 2011, 2015 und 2018 sehr tief (siehe Abbildung 20). Im Jahr 2018 befand sich der Wasserspiegel teilweise 2m unterhalb des normalen Wasserstands [21], sodass die Asphalttransportschiffe teilweise nur mit 1/7 bis 1/8 der üblichen Kapazität fahren konnten, also mit ungefähr 400-600 t anstatt der normalen 2'500-3'000 t [22]. Zudem konnte durch die Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ein Zusammenhang zwischen dem Wasserstand und der Häufigkeit von Havarien feststellen, wobei Havarien grösstenteils bei sehr niedrigen Wasserständen, bei Mittelwasser und bei fallenden Wasserständen auftraten (siehe Abbildung 21).

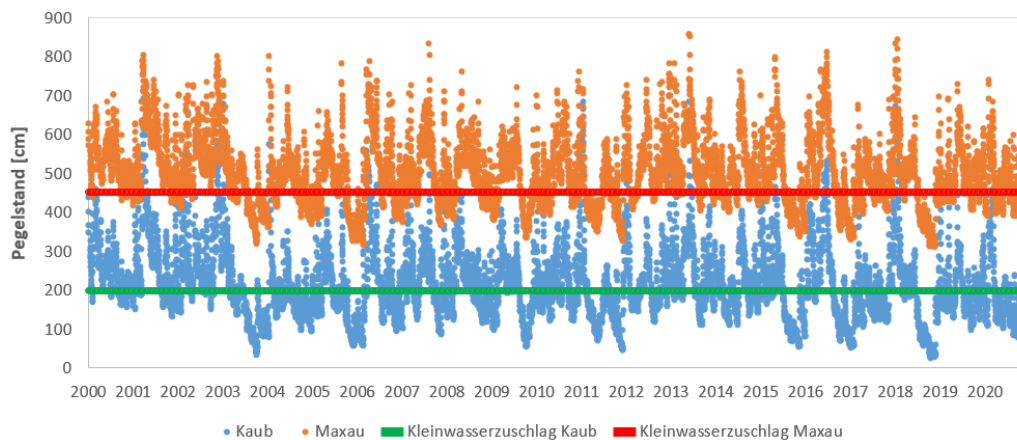


Abbildung 20: Pegelstände Kaub und Maxau (01/2000 bis 11/2020). Ab einem Niveau von 2.0 m (Kaub) und 4.5 m (Maxau) gelten die Kleinwasserzuschläge für Asphalttransport. Datenquelle: Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

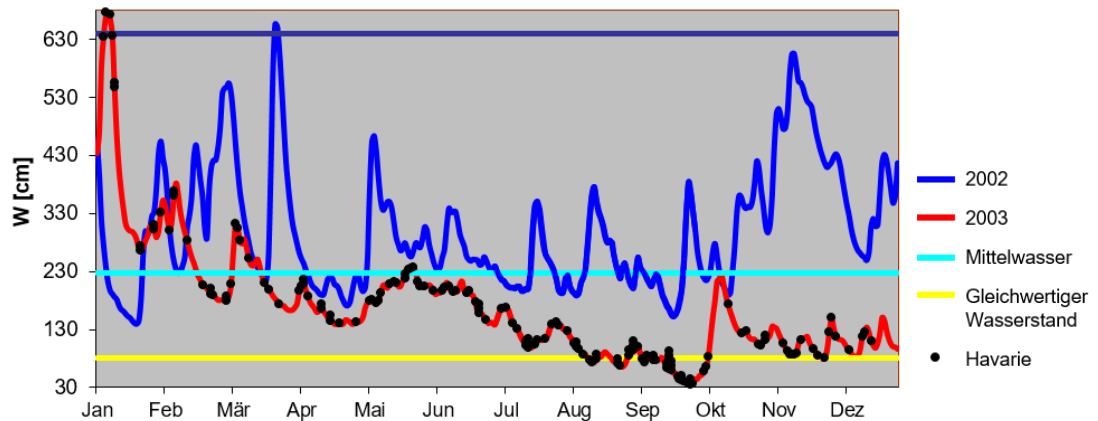


Abbildung 21: Wasserstandsganglinien des Pegels Kaub aus den Jahren 2002 und 2003 mit Havarien. Datenquelle: Wasserstrassen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Insgesamt fielen 20 der 22 wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnungen auf das 21. Jahrhundert (Stand 2018) [23]. Klimaforscher gehen davon aus, dass sich der Trend zu extremer Trockenheit und hohen Temperaturen im Sommer aufgrund der fortschreitenden Erderwärmung fortsetzen wird. Durch die zu Gletscherschmelze in der Schweiz werden die Veränderungen am Rhein im Vergleich zu anderen Flusssystemen bis 2085 wahrscheinlich relativ moderat sein [20].

- Lager- und Umschlagkosten

Die Umschlagskosten in der Schweiz inklusive Lagerung betragen ca. 10-15 CHF pro Tonne.

Die Umschlagskosten in den Niederlanden betragen ca. 3-4 € pro Tonne. Die Lagerkosten in den Niederlanden sind in den Behandlungskosten bereits enthalten.

- Behandlungskosten

Für die Reinigung der gelieferten Bauschutt- und Asphaltmengen werden ab Lieferung zum Kai in den Niederlanden 32-36 € pro Tonne verlangt (Preisniveau 2020). Ein mögliches Verfahren innerhalb der Schweiz muss gegenüber diesen aktuellen Entsorgungspreisen konkurrenzfähig sein.

Die Preise für die thermische Behandlung in den Niederlanden orientieren sich vermutlich stark an den Deponiegebühren, welche eine Benchmark darstellen und es den niederländischen Unternehmen erlauben, ihre effektiven Kosten entsprechend anzupassen und gewisse Prämien zu generieren.

- Einnahmen durch Produkte (vertraulich)

Die Preise für den Verkauf der Produkte in den Niederlanden sind marktabhängig und unterliegen entsprechenden Schwankungen. Die unterschiedlichen Kieskörnungen können die thermischen Aufbereiter zu ca. 9.50 Euro/Tonne verkaufen. Für Steine und Füllstoffe erzielen die Firmen teilweise keinen Erlös, sondern müssen für die weitere Verwertung zahlen. Für die untertägige Verwertung der Rauchgasreinigungsrückstände im Bergwerk müssen bis zu 100 Euro /Tonne bezahlt werden.

Mit dem Prozess der Firma REKO resultieren am Schluss alle Produkte, die valorisiert werden können (Kies, Sand, Füllstoffe, Gips, Strom, Fernwärme). Zu welchem Preis die Produkte in den Niederlanden verkauft werden können, teilte die Firma REKO nicht mit (wettbewerbsrelevante Information).

3.2.1.6 Umweltaspekte

Bei der thermischen Verwertung von Ausbauasphalten in den Niederlanden haben folgende Prozesse relevante Auswirkungen auf den Klimawandel:

- Transport des teerhaltigen Asphaltaufruchs vom Entstehungsort zur thermischen Verwertungsanlage
- Prozess der thermischen Behandlung des Asphaltaufruchs und dessen Umwandlung in einen unbelasteten Sekundärrohstoff
- Gutschriften für die vermiedene Produktion der substituierten Materialien (Kies, Sand, Gips, Füllstoff) und Energie (elektrische Energie und Wärme)
- Gutschriften für den vermiedenen Transport des substituierten Primärgesteins

In einer durch das Fraunhofer Institut erstellten Ökobilanz kam man zum Schluss, dass die thermische Verwertung im Vergleich zu einer Verwertung im Deponiebau bezüglich den zu erwartenden Umweltauswirkungen besser abschneidet. Die Variante REKO I zeigte in sieben von elf Wirkungskategorien bessere Ergebnisse gegenüber der Verwertung im Deponiebau (siehe Abbildung 23), bei der Variante REKO II waren die Resultate in zehn von elf Wirkungskategorien besser [17].

Auch wenn der Transport von Asphaltaufruch in die Niederlande zuerst wenig umweltfreundlich erscheinen mag, können dadurch Sekundärrohstoffe produziert und krebserregende Bestandteile des Teers aus dem Stoffkreislauf entfernt werden. Da in den Niederlanden kaum abbaubare Gesteinsressourcen vorhanden sind, kann man davon ausgehen, dass die produzierten Sekundärrohstoffe tatsächlich Primärrohstoffe ersetzen, welche ansonsten aus dem Ausland importiert werden müssten. Bei der Beseitigung oder Verwertung im Deponiebau werden die Schadstoffe lediglich gesichert, weshalb eine nachträgliche Freisetzung durch Auslaugung oder beim Deponierückbau möglich ist. Durch die thermische Behandlung findet zudem eine energetische Verwertung statt, da der Heizwert des Teers einen Teil des Energiebedarfs der thermischen Behandlung decken kann. Mit der optimierten Anlage REKO II kann sogar mehr elektrische Energie und Wärme zurückgewonnen werden, als an zusätzlichem Brennstoff aufgewendet wird, da die Verbrennung des Teers grosse Energiemengen freisetzt.

Der Transportaufwand des Asphaltaufruchs (LKW und Schiff) vom Entstehungsort in Deutschland zur thermischen Behandlungsanlage in Rotterdam verursacht im best case Szenario (Entstehungsort in Mannheim) ca. 30 kg CO₂-eq und im worst case Szenario (Entstehungsort in Schöna) ca. 73 kg CO₂-eq. Die Gutschrift für den Transport der substituierten Primärrohstoffe beträgt in allen Szenarien ca. 24 kg CO₂-eq. Der thermische Prozess verursacht in der Anlage REKO I ca. 6,2 kg CO₂-eq. und in der Anlage REKO II ca. 4,2 kg CO₂-eq pro Tonne Strassenaufbruch.

Grosse Unterschiede zwischen der thermischen Verwertung und der Ablagerung auf der Deponie sind bei den Prozessgutschriften festzustellen. Die höchste Gutschrift wird bei der Anlage REKO II durch die im Prozess produzierten 600 MJ Strom und 650 MJ Wärme erzielt. Bei der Anlage REKO I fallen die Gutschriften der substituierten Primärrohstoffe niedriger aus. Insgesamt betragen die Gutschriften für die vermiedene Produktion von Material und Energie ca. 41 kg CO₂-eq in REKO I und ca. 246 kg CO₂-eq bei REKO II 2020. In der Kategorie Klimawandel betragen die netto Ergebnisse bei der thermischen Verwertung in den Niederlanden -31 kg CO₂-eq (REKO I) und -236 kg CO₂-eq (REKO II) gegenüber +6 kg CO₂-eq bei einer Verwertung auf einer deutschen Deponie.

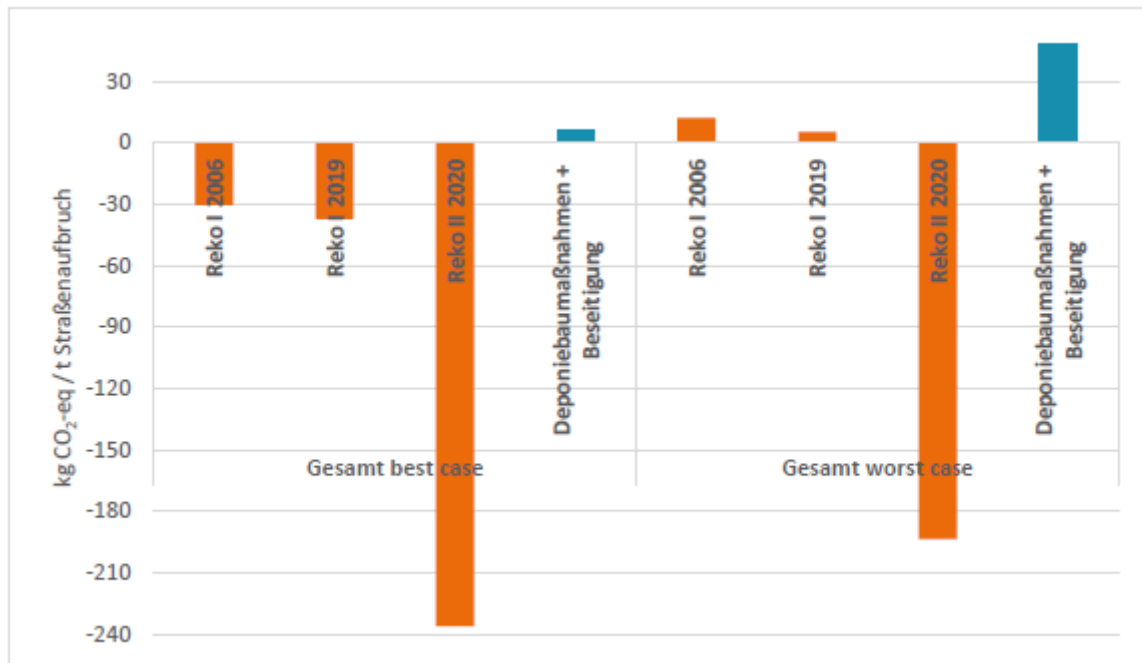


Abbildung 22: Netto Ergebnisse in der Kategorie Klimawandel für den Vergleich der thermischen Verwertung in den Niederlanden (orange) und der Verwertung auf der Deponie in Deutschland (blau) für best case (Entstehungsort in Mannheim) und worst case (Entstehungsort in Schöna) Szenarien. [17]

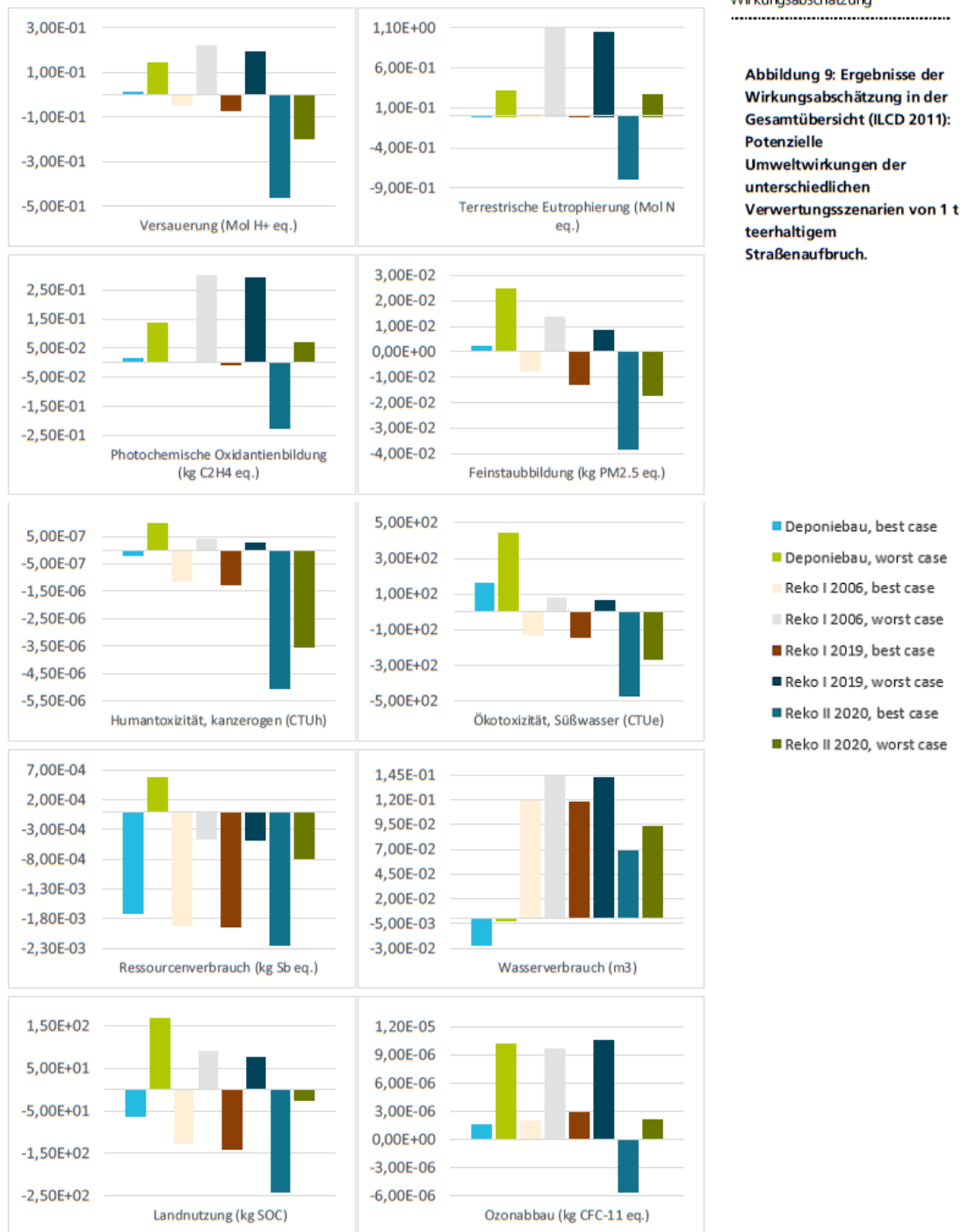


Abbildung 23: Resultate für die weiteren Wirkungskategorien aus der Ökobilanz des Fraunhofer Instituts zur thermischen Verwertung in den Niederlanden gegenüber der Verwertung im Deponiebau in Deutschland. [17]

Ergebnisse einer anderen Ökobilanz des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg kamen zum Schluss, dass die thermische Verwertung in den Niederlanden im Vergleich zur Beseitigung auf einer Deutschen Deponie nur besser abschneidet, wenn maximal 460 km an Transportweg per Schiff zurückgelegt werden [24].

3.2.1.7 Möglichkeiten und Risiken für die zukünftige Behandlung

A. Realisierung einer thermischen Behandlungsanlage in der Schweiz

Um die weiten Transportwege von Asphaltaufbrüchen in die Niederlande zu vermeiden, bestünde die Möglichkeit eine vergleichbare thermische Behandlungsanlage in der Schweiz zu realisieren. Es gibt jedoch verschiedene Faktoren, welche die Realisierung einer solchen Anlage massiv erschweren bzw. verunmöglichen dürften:

- **Kritische Kapazität**

Thermische Aufbereitungsanlagen besitzen hohe kritische Kapazitätsgrössen für einen rentablen Betrieb. Die Aussagen der niederländischen Firmen mit thermischen Aufbereitungsanlagen liegen zwischen einer Kapazität von 300'000 bis 1'200'000 Tonnen pro Jahr. Es ist davon auszugehen, dass eine thermische Aufbereitungsanlage in der Schweiz erst ab einem jährlichen Durchsatz von 500'000 – 1'000'000 t/Jahr rentabel sein würde, was gemäss den Szenarien aus Kapitel 2.6.2 auf eine zentralisierte Anlage für die Behandlung der Asphaltmengen mit > 250 mg PAK/kg herauslaufen würde.

- **Absatzmarkt**

In den Niederlanden ist davon auszugehen, dass die aus der thermischen Behandlung resultierenden Gesteinsprodukte effektiv primäre Gesteinsressourcen ersetzen, die ansonsten aus dem Ausland importiert werden müssten. Grund dafür ist, dass in den Niederlanden praktisch kaum natürliche Gesteinsmaterialien vorhanden sind, weshalb die Niederlande gezwungen sind, jedes Jahr etwa zwanzig Millionen Tonnen Primärrohstoffe wie Sand und Kies zu importieren [12]. Aufgrund der besonderen geologischen Situation hat die Regierung der Niederlande dem Recycling von mineralischen Abfällen hohe Priorität gegeben, weshalb die Produkte der thermischen Behandlung in den Niederlanden effektiv valorisiert werden.

- **Qualitätsanforderungen**

In der Schweiz gelten strengere Qualitätsanforderungen für den Einsatz von Gesteinsmaterialien im Asphaltbereich. Die Produkte der thermischen Behandlung sind in den Niederlanden mit Ausnahme der Deckschicht auf der Grundlage von der Europäischen Normen zugelassen, erfüllen aber gemäss IMP Baustest AG abgesehen von den PAK-Restkonzentrationen die in der Schweiz geltenden Anforderungen an die Gesteinskörnungen für Asphaltbeläge nicht [14]. Da die Qualitätseinbussen hauptsächlich durch die hohen Temperaturen verursacht werden, diese Temperaturen für die Zerstörung der PAK aber notwendig sind, wird es vermutlich nicht möglich sein, die Produktqualität durch Verfahrensanpassungen zu optimieren. Entsprechend ist die Realisierung einer thermischen Anlage in der Schweiz wenig sinnvoll, solange die Produkte hier nur für weniger spezifische Anwendungen zugelassen sind. Das Marktpotenzial ist entsprechend aufgrund der geringeren Wiederverkaufspreise kleiner im Vergleich zu den Niederlanden. Zudem dürfte das Recyclinggranulat in der Schweiz neben den vorhandenen Primärgesteinen generell einen schwereren Stand haben.

- **Infrastruktur und Standortanforderungen**

Die Suche nach einem geeigneten Standort für eine thermische Reinigungsanlage mit mehr als 500'000 Tonnen Durchsatz pro Jahr dürfte sich als äusserst schwierig gestalten. Der Standort muss in einer Industriezone und möglichst zentral liegen, eine grosse Fläche aufweisen und idealerweise per Bahn erschlossen sein. Der Standort muss zudem einen hohen und konstanten Wärmebedarf über das Jahr verteilt aufweisen, damit die erzeugte Energie möglichst gut valorisiert werden kann. Basierend auf der Massenbilanz der neuen Anlage REKO II (siehe Abbildung 18) könnten bei einer Anlage mit 500'000 Tonnen Kapazität pro Jahr 300 mio MJ Strom sowie 325 mio MJ Fernwärme erzeugt werden. Zur Orientierung: Die produzierte Wärme entspricht einer Wohnfläche von 25'000 Haushalten nach Minergie-Standard.

Ausserdem unterliegt die Verarbeitung von bituminösen Gesteinskörnungen keinem Einzugsgebiet und wird nach marktwirtschaftlichen Grundsätzen geführt. Eine adäquate Versorgung der Anlage muss daher auf günstigen wirtschaftlichen und logistischen Bedingungen beruhen. In diesem Zusammenhang könnte die Organisation des Strassenbaus in der Schweiz, die weitgehend dezentral auf kantonaler oder kommunaler Ebene erfolgt, ein zusätzliches Hindernis für die Errichtung einer zentralen Anlage in der Schweiz darstellen.

- **Logistik**

Für eine mögliche Realisierung in der Schweiz wäre die Logistik ein wichtiger zu beachtender Punkt. Die Transportkosten haben einen grossen Einfluss auf die Rentabilität des Verfahrens. Da nur wenige Strassenbaumassnahmen direkt an einer Bahnlinie realisiert werden, müssten oftmals zumindest Teiltransportstrecken mit dem LKW durchgeführt werden. Ideal wäre es, wenn die Materialien an bestimmten in der Schweiz verteilten Sammelbahnstationen aufgegeben werden könnten und so der grösste Teil der Strecke per Bahn erfolgen würde.

Im Vergleich dazu sind die Bedingungen in den Niederlanden mit dem Anschluss an den Rhein ideal. Die Standorte der thermischen Reinigungsanlagen liegen alle direkt am Rhein, wodurch nach der Schifffahrt weitere Transportwege innerhalb der Niederlande vermieden werden können. Da mehr Güter von der Nordsee in Richtung Schweiz transportiert werden, können durch den Asphalttransport Rückfahrten mit leeren Schiffen vermieden werden. Zudem besitzt die Niederlande den Vorteil der Fliessrichtung des Rheins zur Nordsee, wodurch weniger Treibstoff für den Transport benötigt wird als in die entgegengesetzte Richtung. Dadurch werden auch leere Rückfahrten von Schiffen vermieden, die Rohstoffe / Waren vom Hafen Rotterdam nach Basel transportieren. Ein weiterer Vorteil des Standorts in den Niederlanden ist das ausgedehnte Fernwärmenetz am Hafen in Rotterdam, in welches beispielsweise die Firma REKO ihre Abwärme direkt einspeisen kann.

- **Abschätzung der Investitionskosten und Behandlungskosten**

Die Investitionskosten für eine thermische Aufbereitungsanlage sind sehr hoch und mit hohen Risiken (der Abfallinput wird nicht durch Versorgungsbereiche bereitgestellt) und langen Amortisationsdauern verbunden. In der Schweiz würden sich die Kosten schätzungsweise auf mind. 100-200 Millionen CHF bei einer Anlagenkapazität von 500'000-1'000'000 t/Jahr belaufen.

Im Vergleich mit der Verwertung in einer existierenden Anlage in den Niederlanden liessen sich die Transportkosten zu einer zentral gelegenen Anlage in der Schweiz durchschnittlich um eine Grössenordnung von CHF 15/t reduzieren. Andererseits limitieren sich die Verwendungsmöglichkeiten für das thermisch behandelte Material in der Schweiz auf nicht spezifische Anwendungen, was zu einer Erhöhung des Annahmepreises von geschätzt CHF 15-20/t führt. Die Erfahrung zeigt, dass sowohl die Investitions- als auch Betriebskosten in der Schweiz höher sind. Demzufolge ist mit Behandlungskosten von minimal CHF 130/t zu rechnen, unter der Voraussetzung, dass für die produzierte Wärme ebenso gute (ganzjährige) Absatzmöglichkeiten wie für die Anlagen in den Niederlanden bestehen (Anschluss an ein umfangreiches bestehendes Wärmenetz mit ganzjährig erheblichem industriellen Bedarf).

- **Investitionsrisiken**

Es könnte sein, dass die niederländischen Unternehmen auf Konkurrenz im Ausland mit Preisreduktionen reagieren würden, da viele der Anlagen bereits seit mehreren Jahren in Betrieb sind und amortisiert sein dürften. Dementsprechend sind die Investitionen in eine thermische Behandlungsanlage innerhalb der Schweiz mit hohen Risiken verbunden.

- **Bewilligungsverfahren**

Das Bewilligungsverfahren, welches für eine thermische Reinigungsanlage der Grössenordnung 500'000+ Tonnen pro Jahr durchgeführt werden müsste, ist sehr zeit- und kostenintensiv mit nicht unerheblichen Risiken von Opposition und Einsprachen. Diese Aufwände müssen erbracht werden, lange bevor die Anlage rentabel ist und ohne Garantie eines erfolgreichen Abschlusses.

B. Anhaltender Export in ausländische Einrichtungen

Will man weiterhin teerhaltige Asphaltaufbrüche aus der Schweiz in die Niederlande zur thermischen Behandlung exportieren, ist dieser Verwertungsweg mit gewissen Restrisiken verbunden, die jedoch potenziell zu bewältigen sind.

- **Entsorgungssicherheit**

Der Export des Schweizer Asphalts in die Niederlande birgt regulatorische Risiken. Die mittel- bis langfristige Entsorgungssicherheit dieses Verwertungswegs ist jedoch nicht unter allen Umständen gewährleistet, da keine langfristigen Lieferverträge mit den niederländischen Aufbereitungsfirmen bestehen.

Um dieses Risiko zu minimieren, könnte man mittel- bis langfristige Verträge mit den Aufbereitungsfirmen in den Niederlanden eingehen. Da die niederländischen Unternehmen umgekehrt auch vom Import von mineralisch belastetem Material aus dem Ausland abhängen und über grosse Kapazitäten verfügen, wird dieser Entsorgungsweg in näherer Zukunft wohl kaum gefährdet sein, zumal auch mehrere Unternehmen in den Niederlanden vorhanden sind und somit Auswegmöglichkeiten bestünden.

- **Wirtschaftliche Abhängigkeit**

In Bezug auf den Entsorgungspreis ist man abhängig von der verfügbaren Kapazität der Asphaltbehandlung in den Niederlanden und dem zukünftigen anfallenden resp. zu behandelnden Volumina in der EU. Auch in Bezug auf den Entsorgungspreis ist man von den niederländischen Unternehmen abhängig. Da in den Niederlanden vier verschiedene Unternehmen um das Material aus der Schweiz und Europa konkurrieren, ist das Risiko von grossen Preisschwankungen jedoch gering.

- **Transportrisiken**

Auch wenn bei niedrigen Wasserständen vermehrt Havarien auftreten können, ist der Schiffftransport im Vergleich zu anderen Transportmitteln dennoch sehr sicher und günstig. Wie in Kapitel 3.2.1.5 beschrieben, sind aufgrund des Klimawandels innerhalb der nächsten 65 Jahren wahrscheinlich nur moderate Konsequenzen zu erwarten [20]. Der Rhein wird voraussichtlich durch extreme Trockenereignisse vorerst noch weniger betroffen sein, da die hohen Temperaturen gleichzeitig auch mehr Schmelzwasser verursachen [20].

In sehr trockenen Sommern kann es gegebenenfalls zu kurzzeitigen Unterbrüchen der Rheinschifffahrt kommen, insbesondere wenn der Transport aufgrund von zu hohen Kleinwasserzuschlägen nicht mehr rentabel ist. Eine behördliche Sperrung der Rheinschifffahrt aufgrund von Kleinwasser gibt es jedoch nicht [20]. Dementsprechend sind auch im trockenen Sommer 2018 die meisten Asphalttransporteure trotzdem weitergefahren, wenn auch nur mit einem Bruchteil ihrer üblichen Kapazität.

3.2.2 Thermische Behandlung in Zementwerken

In der Schweiz gibt es heute sechs Zementwerke mit Klinkerproduktion, siehe Abbildung 24. Alle Werke setzen alternative Brennstoffe zur teilweisen Substitution von fossilen Brennstoffen ein. Im Jahr 2019 betrug der Substitutionsgrad 68.1%.

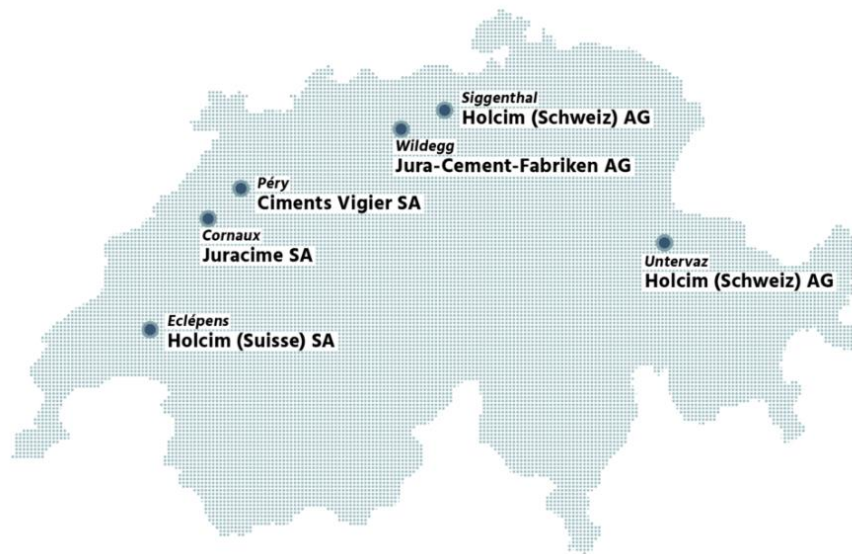


Abbildung 24: Karte der Schweizer Zementwerke [Quelle: Cemsuisse]

Die alternativen Brennstoffe werden im Zementofen entweder am Hauptbrenner, am Einlauf des Drehrohrofens oder (sofern vorhanden) am Vorkalzinator aufgegeben, siehe Abbildung 25. Durch die hohen Verbrennungstemperaturen und langen Verweilzeiten werden organische Stoffe vollständig zerstört.

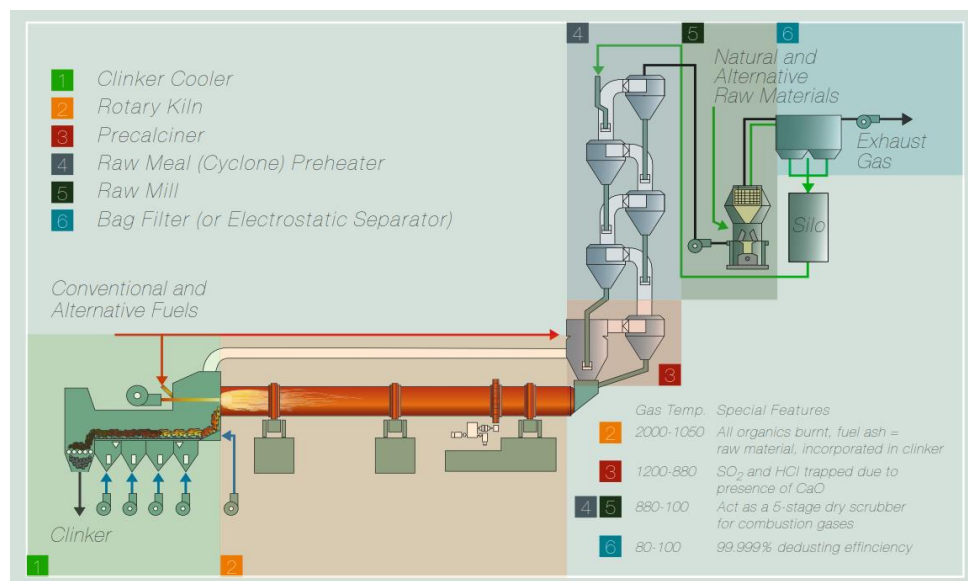


Abbildung 25: Zementklinker Herstellung am Beispiel eines Kalzinatorofens [Quelle: GTZ-Holcim]

Neben alternativen Brennstoffen wie z.B. Altreifen, Plastik oder Tiermehl können im Zementofen unter bestimmten Voraussetzungen auch organisch kontaminierte mineralische Abfälle eingesetzt werden. Diese werden in den Zementklinker eingebunden, d.h. es bleiben keine Rückstände zurück.

Die wesentlichen Voraussetzungen für den Einsatz von Ausbauasphalt im Zementofen sind:

- Um eine adäquate Verbrennung der organischen Bestandteile zu gewährleisten, muss Ausbauasphalt direkt in den Zementofen oder Vorkalzinator aufgegeben werden. Eine Zugabe mit dem Rohmaterial am kalten Ende des Prozesses ist aus Emissionsgründen nicht möglich. Eine Ausnahme besteht, wenn das System der Rauchgasreinigung für eine Nachbehandlung der entstehenden Emissionen ausgerüstet ist.

- Die Mineralik von Ausbauasphalt hat nicht die für die Zementherstellung notwendige chemische Zusammensetzung. Ausserdem ist sie zu grob, um bei der Klinkerherstellung im Ofen mit dem Rohmaterial vollständig zu reagieren. Dies limitiert den Einsatz von Ausbauasphalt im Zementofen. Ein Aufmahlen von Ausbauasphalt zusammen mit dem Rohmaterial in der Rohmehlmühle ist nicht möglich, da der Bitumen zu Verklebungen in der Anlage führen würde.

Aktuell wird kein Ausbauasphalt in Schweizer Zementwerken eingesetzt. Die Zementindustrie ist jedoch in der Lage und interessiert, in Zukunft Lösungen anbieten zu können.

Die einfachste Möglichkeit Ausbauasphalt in der Zementindustrie einzusetzen, ist die oben erwähnte direkte Aufgabe in den Zementofen, also die Nutzung der bestehenden Infrastruktur. Für eine grobe Abschätzung des Potentials der Schweizer Zementöfen wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Aktuelle jährliche Klinkerproduktion in Ofensystemen mit dem besten Einsatzpotential (Wärmetauscher- und Vorkalzinator Öfen): 3 Mio. Tonnen.
(Nicht berücksichtigt ist, dass die Klinkerproduktion in Zukunft durch die immer grössere Substitution im Zement weiter abnehmen wird.)
- Theoretisch maximale Zugabe von Mineralik im Ofensystem bezogen auf Klinker: 2%.
(Nicht berücksichtigt sind lokale limitierende Faktoren wie Chemismus des natürlichen Rohmaterials und bereits bestehender Einsatz von mineralischen Abfällen.)

Mit diesen stark vereinfachenden Annahmen ergibt sich eine theoretisch maximale Einsatzmenge von Ausbauasphalt in den Schweizer Zementöfen von **60'000 t/a**. Diese Kapazität reicht bei weitem nicht aus, um die totale anfallende Menge von PAK belasteten Ausbauasphalt von 500'000 t/a zu verarbeiten.

Betreffend Entsorgungspreis für Ausbauasphalt Feinfraktionen im Zementwerk ist mit Kosten von +/- 100 CHF/t zu rechnen.

Eine Kombination mit der mechanischen Aufbereitung, wo in dezentralen Anlagen Grobfraktionen in die Asphaltproduktion zurückgeführt werden und bindemittelreiche Feinfraktionen dem Zementofen zugeführt werden erscheint sinnvoll. Mit einem solchen Konzept reduziert sich der Transportaufwand.

Auch mit einer Verwertung von Feinfraktionen aus der mechanischen Aufbereitung ist die theoretische Kapazität der Zementöfen von 60'000 t/a nicht für das gesamte anfallende Volumen ausreichend.

Grössere Mengen Ausbauasphalt können in Zementwerken nur verarbeitet werden, wenn der mineralische Anteil getrennt anfällt, also nicht in den Klinker gelangt. Im Ausland gibt es in Zementwerken Anlagen, wo organisch kontaminierte mineralische Stoffe in einem mit dem Abgassystem des Zementofens verbundenen Reaktor behandelt werden. Eine solche Lösung ist auch für Ausbauasphalt denkbar. Sie würde in einem Zementwerk aber signifikante Investitionen im zweistelligen Millionen Bereich bedeuten.

3.2.3 Pyrolyse

3.2.3.1 Prozessbeschreibung

Die Pyrolyse ist ein thermochemischer Prozess, bei dem das Bindemittel bei Temperaturen von ungefähr 500-550°C unter Abwesenheit von Sauerstoff in energetische Gase zersetzt wird. Da der Prozess unter Abwesenheit von Sauerstoff durchgeführt wird, wird das Bitumen nicht verbrannt und der Energiegehalt vom Bitumen kann als Pyrolysegase zur Aufrechterhaltung eines völlig autarken Prozesses verwendet werden. Damit die Pyrolyse ohne zusätzliche Brennstoffe funktionieren kann, muss mindestens 4.6% Bitumen im gefrästen Asphalt enthalten sein [25]. Der energetische Gehalt kann zum Trocknen vom Gestein, zum Vorwärmen vom Asphaltaufbruch oder zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs beim traditionellen Trockner verwendet werden. Neben den energetischen Pyrolysegasen, Ziel dieses Prozess ist gereinigte, PAK-freie Gesteinsmaterialien zu produzieren, welche erneut in der Asphaltproduktion eingesetzt werden können.

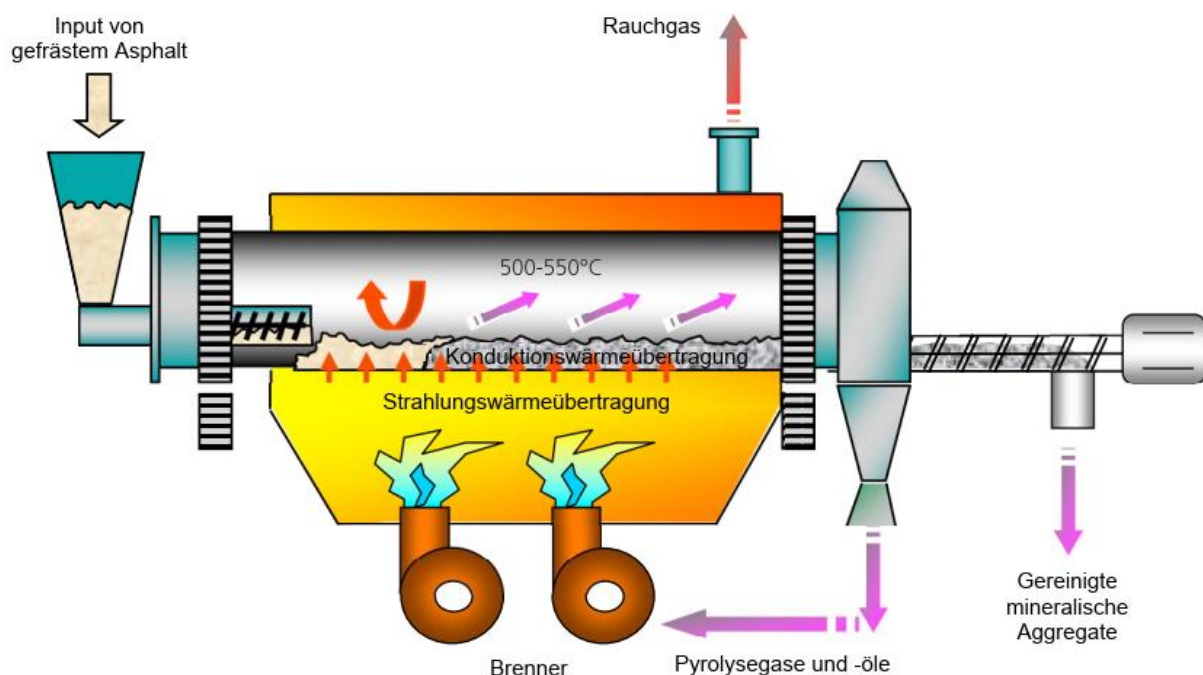


Abbildung 26: Schematische Darstellung einer Pyrolyseanlage

3.2.3.2 Stand der Technik und Entwicklung

In Deutschland wurde bei der Firma Eisenmann, einem Lieferanten von thermischen Sonderanlagen, die Tauglichkeit des Pyrolyseverfahrens zur thermischen Reinigung von teerhaltigem Asphaltaufbruch überprüft [26]. Die Tests haben jedoch gezeigt, dass die Pyrolyse kein geeignetes Verfahren für die Behandlung von teerhaltigem Asphalt ist. Nach der Pyrolyse enthielt das entstandene Mineralgemisch noch Restkohlenstoffverbindungen. Darüber hinaus unterschieden sich die Gesteinsprodukte optisch nicht von dem fast schwarzen Edukt, was bei den Asphaltproduzenten auf keine Akzeptanz stiess [26].

Die Firma Solenia betrieb in Italien eine Pilotanlage mit einem Durchsatz von 100 kg/h, in der die Pyrolyse durch die im Bindemittel enthaltene Energie autark betrieben werden konnte und die organischen Kontaminationen zerstört wurden. Mittlerweile gibt es die Firma nicht mehr. Die Idee von Solenia war es, Asphaltproduzenten eine modular aufgebaute Pyrolyseanlage zu verkaufen, welche parallel zur Asphaltproduktion betrieben werden kann. Die Anlagengrösse sollte entsprechend den Kundenbedürfnissen und der Anlagenkonfiguration angepasst werden können.

3.3 Mechanische Bearbeitung

Der Inhalt dieses Kapitels basiert auf allgemeinen Kenntnissen über diese Art der Behandlung, Daten aus der Literatur, einem Besuch der Anlage BHZ RZO AR Recycling Züri Oberland in Volketswil im September 2020, gefolgt von einer Arbeitssitzung mit GIPO AG – Anlagenbauer und Anlagenplaner - und BHZ (Herr Kunz) sowie einer Telefonkonferenz mit der Firma BAM Infra Nederland im Oktober 2020.

3.3.1 Allgemeine Beschreibung des Prozesses

Die bituminösen Gesteinskörnungen werden in verschiedenen Stufen der Absiebung und des Skalierens mit speziellen Maschinen behandelt, möglichst ohne mechanische Veränderungen oder Zersplitterungen der Gesteinskörnungen zu verursachen, mit dem Ziel, die zwei folgenden Fraktionen zu trennen:

- Möglichst saubere mineralische Fraktion mit möglichst wenig veränderten mechanischen Eigenschaften, damit sie für den Strassenbau verwendet werden kann.
- Fraktion mit möglichst konzentriertem bituminösem Bindemittel, d.h. mit einem Minimum an mineralischem Anteil und möglichst feiner Körnung (Füllstoffe und Sand), die nach Möglichkeit als Bestandteil neuer bituminöser Beläge verwendet oder einer thermischen Behandlung unterzogen werden kann (zwingend erforderlich bei einer Bindemittelkonzentration > 5'000 mg/kg).

3.3.2 Stand der Technik

In der **Schweiz** sind einige Anlagen in Betrieb. Eine der effizientesten ist die Anlage BHZ RZO AR Recycling Züri Oberland in Volketswil.

Die Verarbeitungskette kann wie folgt beschrieben werden:

- Die Gesteinskörnungen werden in Sieb- / Brechereinheiten mit verschiedener Klassierung (22, 16, 11 und gegebenenfalls 8 mm) der Marke GIPO AG gefördert, wo die Körner klassiert werden und dabei die Korn-auf-Korn-Reibung möglichst gering bleibt, um die mit der Zerkleinerung verbundene mechanische Veränderung zu minimieren.
- Im aktuellen Zustand ermöglicht ein zweiter Durchlauf in der Anlage die Gewinnung einer mineralischen Fraktion < 8 mm mit einem Restbindemittelgehalt von weniger als 1%, nachdem diese mit Wasser gewaschen und die Feinanteile abgetrennt und dekantiert wurden.
- Die Fraktion unter 8 mm, die nach Angaben des Anlagenbetreibers etwa 70 % der behandelten Menge ausmacht, wird derzeit je nach Verfügbarkeit und PAK-Gehalt entweder als rezyklierte Gesteinskörnung im Strassenbau wiederverwertet oder deponiert.
- Der PAK-Grenzwert für die Annahme eingehender Abfälle liegt bei 1'000 mg/kg. Es gibt derzeit keine differenzierte Akzeptanz für Konzentrationen über oder unter 250 mg/kg.

Die maximale Verarbeitungsmenge der Anlage beträgt 800 - 1'000 t/Tag. Die mechanische Aufbereitung von bituminösen Abfällen erfordert sehr grosse Mengen an Pufferspeicher (>> 200.000 m³), um die zu behandelnden Abfallströme und Abnehmer für die rezyklierten Materialien ausgleichen und puffern zu können.

Die Lagerung der zu behandelnden bituminösen Aggregate kann im Freien erfolgen. Die Lagerung der verschiedenen Fraktionen, die aus dem Aufbereitungsprozess resultieren, sollte abgedeckt erfolgen, um eine zu hohe Feuchtigkeit zu vermeiden, die schädlich für eine optimale Verwertung ist.

Die Anlage ist am zentralen Standort des Unternehmens BHZ lokalisiert, wo auch eine Asphaltproduktionsanlage vorhanden ist.

Nach Angaben des Unternehmens BHZ und des Anlagenlieferanten GIPO besteht noch erhebliches Potenzial für eine Gesamtanlagenoptimierung.

Die Herausforderung besteht insbesondere darin, den Korngrössenbereich der zurückgewonnenen Mineralfraktion auf einen Wert von 5 mm oder idealerweise sogar 2 mm zu erhöhen. Derzeit gibt es keine Gewissheit, dass dieses Ziel erreicht werden kann, aber der Optimierungsprozess wird fortgesetzt.

Eine Verringerung der minimalen Partikelgrösse der zurückgewonnenen Mineralfraktion auf 2 mm würde es erlauben, einen deutlich höheren Gesteinsanteil zurückzugewinnen. Zudem liesse sich so ein "Bitumenmörtel" gewinnen, der aus einer Mischung aus Bitumen, Füllstoff und Sand besteht, der möglicherweise nach Mischen, Homogenisieren und ggf. Zugabe von Additiven als Grundkomponente in Asphaltmischanlagen verwendet werden könnte.

Bei bituminösen Aggregaten mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250 mg / kg sollte die nicht aufbereitete bindemittelreiche Fraktion (spezifische Konzentration > 5.000 mg / kg) auf jeden Fall ab 2026 einer thermischen Behandlung unterzogen werden .

Auf **europäischer Ebene** ermöglichten verschiedene Untersuchungen die Identifizierung eines mechanischen Behandlungsprozesses, der von der **niederländischen Royal BAM Group** (Unternehmen BAM Infra Nederland), einem der grössten Bauunternehmen in den Niederlanden, eingesetzt wird. Dieses Unternehmen hat ein globales Konzept für die Produktion von Asphaltmischgut entwickelt, welches durch die Integration von Energie- und Klimaschutzaspekten den Anforderungen der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft entspricht. Dieses Konzept wollen sie bis 2030 vollständig umsetzen.

Dieses Projekt mit dem Titel LE2AP (Low Emission Asphalt Pavement - 2 für das doppelte Ziel der Reduzierung von Lärm- und CO₂- Emissionen) umfasst insbesondere die folgenden Komponenten:

- Herstellung eines Belags bei niedrigen Temperaturen < 105°C und einer Lärmreduktion von > 7 dB(A), welcher aus mindestens 80 % Recyclingmaterial besteht: Eine 2.3 km lange Teststrecke mit einem zweischichtigen Belag mit 82 bis 93 % Recyclingmaterialien wurde bei 105°C hergestellt. Mit Qualitätsverbesserung lässt sich LE2AP auch für Deckschichten verwenden.
- Trennung der Gesteinskörnungen vom Bindemittel durch ein mechanisches Trennverfahren: Mit einem Hochfrequenz-Vibrationssieb wird der Bindemittelfilm rund um die Gesteinskörner zum Aufplatzen gebracht, so dass das Bindemittel ohne Erhitzen oder Zugabe von Hilfsstoffen von der mineralischen Fraktion separiert wird. Diese Technik verhindert die Zerkleinerung der Körner und somit eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Gesteinsaggregate. Anschliessend wird die mineralische Fraktion mit Wasser gewaschen. Das Waschwasser wird in einem geschlossenen Kreislauf recycelt.

Der mechanische Behandlungsprozess ermöglicht die Gewinnung folgender Produkte:

- **Verschiedene Mineralkornfraktionen** mit einem Bindemittelgehalt von weniger als 1%. Nach Angaben der Firma BAM ist das Trennverfahren derzeit bis zu einer Partikelgrösse von 5 mm gut entwickelt. Derzeit werden Tests und Optimierungen durchgeführt, um auch den Anteil zwischen 2 und 5 mm zurückzugewinnen. Die Kontaktpersonen der BAM sind relativ zuversichtlich, dass diese Optimierung erfolgreich sein wird.
- Ein **bitumenreicher Sand- und Füllmörtel**, der als Grundkomponente in Asphaltproduktionsanlagen verwendet werden soll. Dafür wird der Bitumenmörtel auf ca. 170°C erhitzt, mit Primärbitumen ("weiches Bitumen") und Additiven ergänzt und durch kontinuierliches Mischen ohne Kontakt mit Flammen oder Luft homogenisiert, um ein geschäumtes Bitumen zu erhalten, das als Qualitätsbitumenbestandteil in Asphaltanlagen verwendet werden kann. Dieses neu zusammengesetzte Bindemittel soll dann mit einer recycelten mineralischen Fraktion, deren Zusammensetzung genau kontrolliert wird, gemischt werden, um einen hochwertigen Belag zu erhalten.

- Eine kleine Menge Schlamm aus der Wäsche der mineralischen Fraktion, die reich an Bindemittel ist und mit Hilfe einer Filterpresse entwässert wird.

In diesem Zusammenhang entwickelt die BAM ein Verfahren zur Asphaltproduktion, indem das geschäumte Bitumen bei reduzierter Temperatur (105 ° C) mit der rezyklierten mineralischen Fraktion vermischt wird. Die durchgeführten Tests zeigen Dauerhaftigkeit und mechanische Leistungen, die denen von Asphaltbelägen aus Primärmaterialien entsprechen.

Der rechtliche Status der zurückgewonnenen mineralischen Fraktion war umstritten und daher Gegenstand eines Rechtsstreits zwischen BAM und Bauunternehmen, der positiv entschieden wurde und die Verwendungsmöglichkeiten im Strassenbau bestätigte.

Das Ziel der BAM ist es, das LE2AP-Gesamtkonzept insbesondere durch grossmassstäbliche Tests schrittweise weiterzuentwickeln, damit es bis 2030 voll einsatzfähig ist.

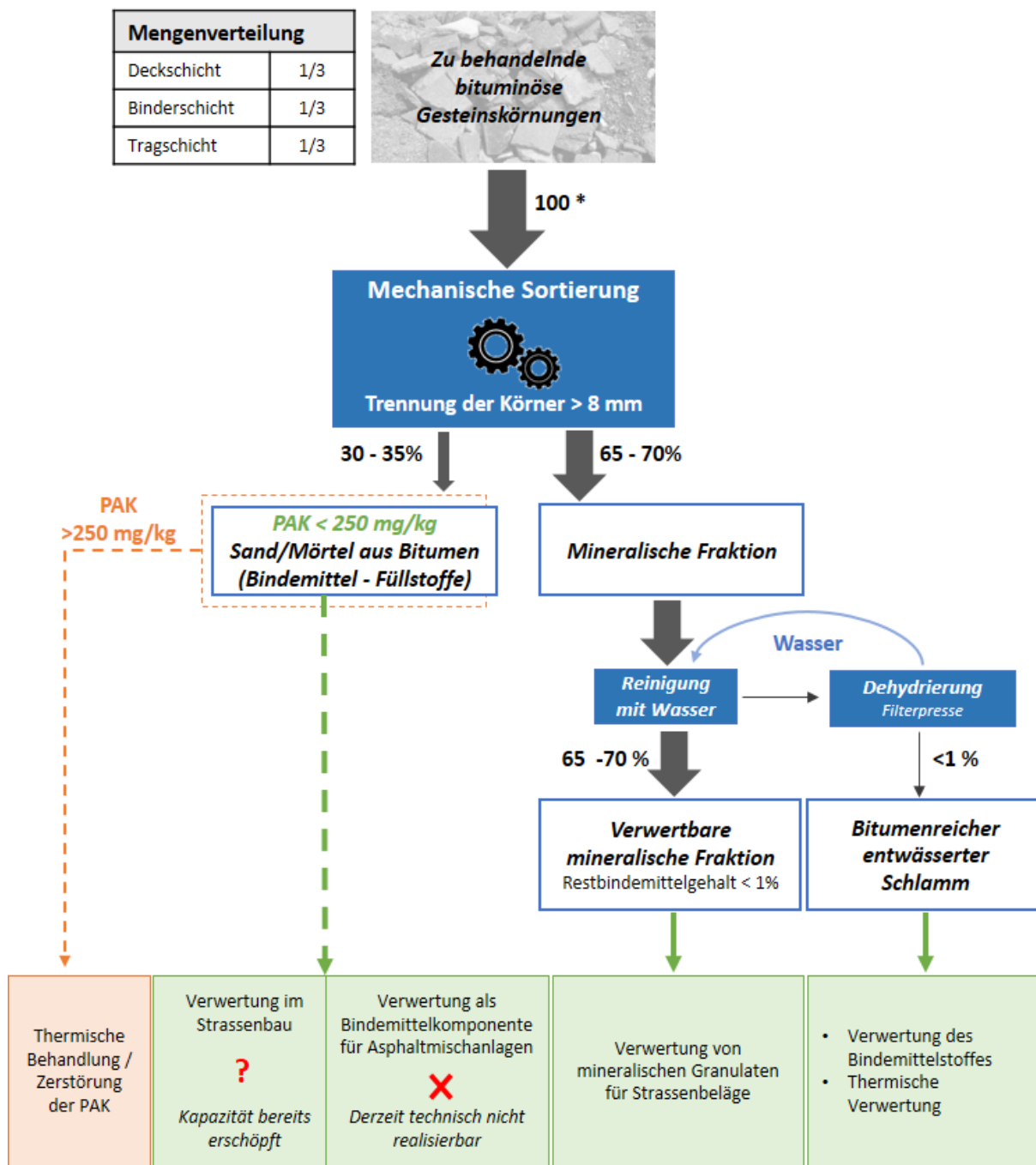
3.3.3 Flussdiagramme und Qualität der aus der Behandlung resultierenden Fraktionen

Wie bereits erwähnt, erzeugt das mechanische Verfahren die folgenden 3 Materialströme:

- a) Möglichst saubere und breite gefächerte Fraktion an mineralischen Gesteinskörnungen am unteren Ende der Sieblinie (kleine Durchmesser), deren mechanische Eigenschaften so wenig wie möglich verändert werden, um im Strassenbau die für primäre Gesteinskörnungen festgelegten Qualitätskriterien einhalten zu können.
- b) Bitumenmörtel, der in möglichst konzentrierter Form die bituminösen Bindemittel, den Füllstoff (<0.125 mm) und Sand in möglichst geringer Korngrösse enthält.
- c) Feinkörniger und bitumenreicher Schlamm, der als Nebenprodukt beim Waschen der Mineralik entsteht und mittels einer Filterpresse getrocknet / entwässert werden soll, wobei das Waschwasser zurückgeführt werden soll.

Die Massenströme hängen von der Feinheit der minimalen Korngrösse ab, die in der mineralischen Fraktion zurückgewonnen werden kann, sowie von der Verteilung der verschiedenen Schichten und spezifischen Belagsarten, die von der Aufbereitungsanlage aufgenommen werden. Letztere hat einen wesentlichen Einfluss auf die Korngrösse der zu behandelnden Materialien.

Nachfolgend sind Fließdiagramme für die beiden unteren Partikelgrössengrenzen der Sieblinie bei 8mm bzw. 2mm dargestellt, die auf der geschätzten mittleren Sieblinie der drei im Kapitel 2.6 dargestellten Belagsschichten (Deckschicht / Binderschicht / Tragschicht) basieren. Es wurde eine gleichmässige Verteilung der behandelten Tonnage auf die drei Schichten angenommen.



* Werte: Gew.-% (Schätzung)

Abbildung 27: Flussdiagramm einer mechanischen Behandlung, die eine Trennung von Körnern > 8mm ermöglicht.

Eine mechanische Sortierung mit einer Mindestpartikelgrösse von 8 mm ermöglicht die Rückgewinnung einer Fraktion von mineralischen Zuschlagstoffen, die 20 bis 25 % der nach den oben genannten Annahmen behandelten Einsatzmenge ausmacht.

Diese Fraktion kann als mineralische Gesteinskörnung aus gebundenen Asphaltmischungen zurückgewonnen werden. Aus Sicht der Schadstoffbelastung liegen die Restbindemittelkonzentrationen nach den Analysen des BHZ in der Grössenordnung von oder unter 1.0 %, was einem Gesamtgehalt an PAK

in der Grössenordnung von 25 bis 30 mg / kg entspricht. Die anderen Schadstoffe weisen keine signifikanten Konzentrationen in Bezug auf die zu berücksichtigenden Grenzwerte auf.

Aus mechanischer Sicht bestätigen die nach VSS-Normen durchgeführten Analysen zur Qualität der Gesteinskörnungen, dass die zurückgewonnenen Aggregate die Anforderungen erfüllen, ohne dass wesentliche Änderungen durch mechanische Beanspruchung aufgetreten sind.

Bei einer Sortierung, die auf einen Mindestdurchmesser von 8 mm begrenzt ist, würde die bitumenreiche Fraktion 75-80 % des Eingangsstroms ausmachen. Diese Fraktion wird derzeit als rezyklierte Gesteinskörnung im Strassenbau wiederverwertet. Eine Deponierung ist aufgrund eines Gehalts an organischen Substanzen von mehr als 5 % nicht durchführbar.

Die Möglichkeiten zur Rückgewinnung dieser Fraktion mit erweiterter Korngrösse über das Jahr 2026 hinaus müssen noch geklärt werden. Soweit das Recyclingpotenzial von bituminösen Gesteinskörnungen ausgeschöpft ist, ist nicht sicher, dass diese Fraktion mit den heutigen und weiter entwickelten Technologien als Grundbestandteil oder als Ersatz für das Bindemittel in Asphaltanlagen wiedergewonnen werden kann.

Bei der mechanischen Behandlung von Aggregaten mit einer PAK-Konzentration von mehr als 250 mg/kg sollte in jedem Fall eine thermische Behandlung vorgesehen werden.

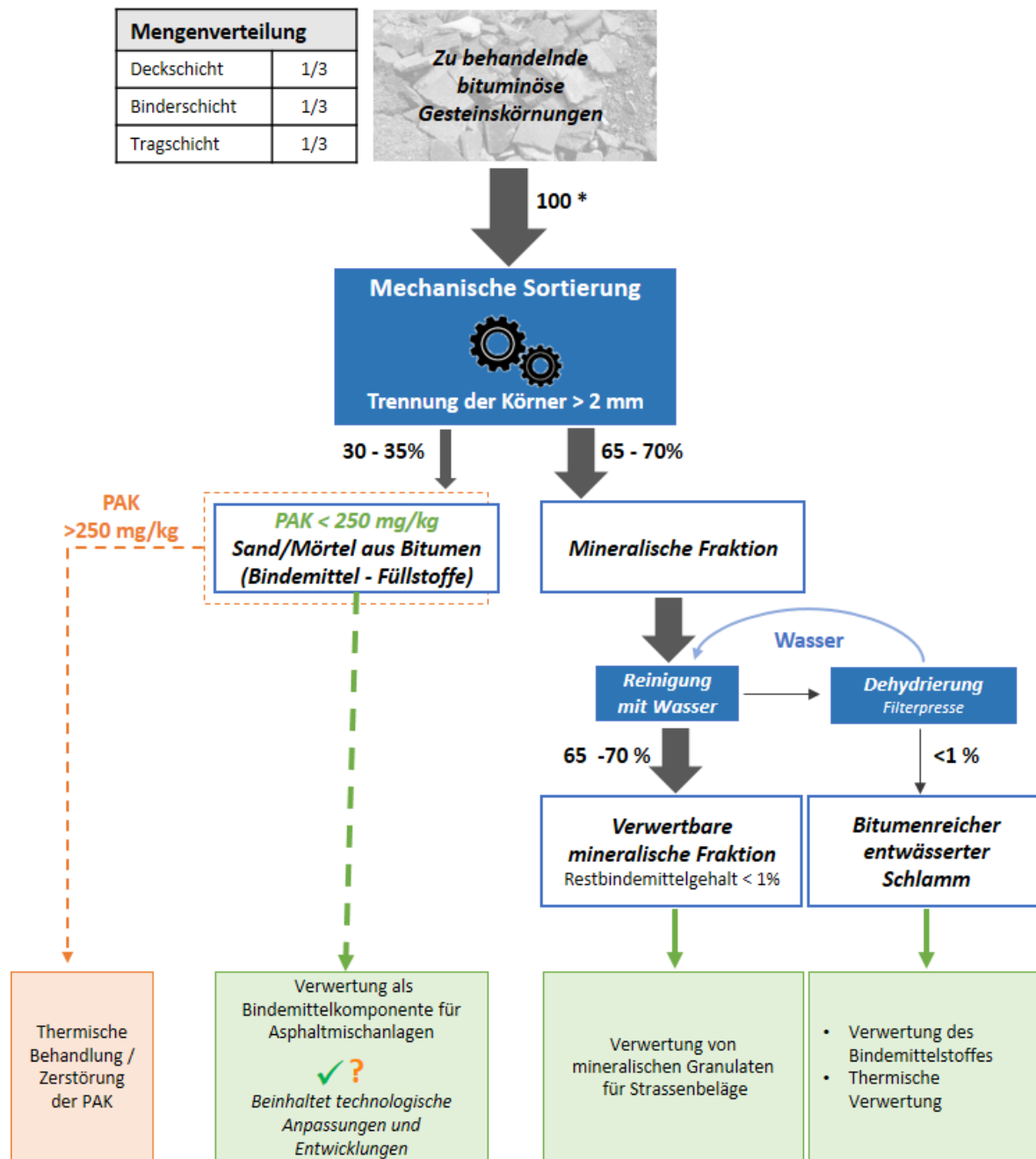
Der beim Waschen entstehende Schlamm macht weniger als 1% der eingehenden Masse aus. Er wird derzeit thermisch behandelt. In Verbindung mit der Verbesserung des Trockengehalts (Entwässerung durch Filterpresse) könnte eine Verwertung dieser bitumenreichen Fraktion ins Auge gefasst werden.

Das Waschwasser wird in einem geschlossenen Kreislaufrecykliert.

Eine Optimierung der mechanischen Aufbereitung mit einer **Absenkung der minimalen Granulometrie auf 2 mm, die als mineralische Fraktion zurückgewonnen wird**, würde es ermöglichen, die mineralische Fraktion auf ungefähr 65 bis 70 % der eingehenden behandelten Menge zu erhöhen, gemäss den betrachteten Annahmen und wie in Abbildung 29 dargestellt.

Die bitumenreiche Fraktion würde dann zwischen 30 und 35 % des Eingangsstroms ausmachen und in Form eines "Bitumenmörtels" vorliegen, der aus einem Gemisch aus Bitumen, Füllstoff und Sand besteht und nach dem Mischen und Homogenisieren möglicherweise als Basiskomponente in Asphaltanlagen verwertet werden könnte.

Diese Möglichkeit erfordert jedoch Anpassungen der Anlagenkonfiguration (z.B. Erhöhung der Anzahl der separaten Trichter und Aufgabetanks) und weitere Untersuchungen zur spezifischen Zusammensetzung des Bindemittels (Mischung mit Primärbitumen; Zugabe von Additiven; Schaumbitumentchnik; ...).



* Werte: Gew.-% (Schätzung)

Abbildung 28: Flussdiagramm einer mechanischen Behandlung, die eine Trennung von Körnern > 2mm ermöglicht.

3.3.4 Wirtschaftliche Aspekte

Die Basisdaten zur wirtschaftlichen Bewertung des mechanischen Behandlungsprozesses lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Infrastrukturen und Einrichtungen:

- Bedarf eines relativ grossen Areals in einem Industriegebiet für Behandlungsbereiche, Lagerung von zu behandelnden Abfällen und produzierten Materialien sowie für den Verkehr. Für eine indikative Kapazität von 200'000 t/Jahr ist eine Gesamtpufferlagerkapazität von 6-9 Monaten zu berücksichtigen, um eine ausreichende Betriebsflexibilität zwischen den Zufuhrsmöglichkeiten von zu behandelnden bituminösen Granulaten einerseits, der Aufbereitungskapazität und den Verwertungsmöglichkeiten andererseits zu haben. Auf dieser Basis kann das benötigte Platzbedarf grob auf eine Größenordnung von 2 bis 3 Hektar² geschätzt werden.
- Lagerabdeckung für die verschiedenen Fraktionen, die bei der Behandlung anfallen.
- Anschluss an das Wasserversorgungsnetz und an das Regenwasserkanalnetz, Waschvorrichtung, Schlammrückgewinnung und Entwässerung (Filterpressen)
- Anschluss an das Stromnetz und Schaltanlage/Verteilernetz
- Waage und Räumlichkeiten für Personal sowie Werkstatt/Wartungseinrichtungen
- Maschinenpark der Aufbereitungsline mit 4-5 Sieb-/Brech-/Skalieranlagen und 3-4 hochbelasteten Baggern/Ladern (Amortisationszeit 8 Jahre)

Die Installation der Aufbereitungsanlage in Synergie mit einer Asphaltproduktionsanlage ermöglicht es, den verfügbaren Platzbedarf (Bündelung der Speichervolumen; ..) zu rationalisieren und die Logistik durch Optimierung der Flüsse und Begrenzung der Transportentfernungen zu vereinfachen.

Mit der obigen Konfiguration können die Investitionskosten ungefähr auf CHF 15 - 18 Millionen geschätzt werden, aufgeteilt wie folgt:

- | | |
|--|-------------------|
| • Maschinen und Anlagen: | 4.0 - 5.0 mio CHF |
| • Ausstattung und Infrastruktur (einschliesslich 6'000 m ² Speicherfläche): | 5.0 – 7.0 mio CHF |
| • Land (3 ha für CHF 200 / m ²): | 6.0 mio CHF |

Diese vorläufige Kostenschätzung bezieht sich auf eine Anlagenkonfiguration, wie sie derzeit in der Schweiz existiert, mit der Möglichkeit, mineralische Zuschlagstoffe mit einem Durchmesser von mehr als 8 mm abzutrennen. Einsparungen sind potenziell denkbar, wenn diese Aufbereitungstätigkeit auf dem Gelände einer Asphaltproduktionsanlage angesiedelt ist.

Dieser Anlagentyp hat keine hohe kritische Kapazität, und ein wirtschaftlich Betrieb ist erst ab einer Mindestmenge von ca. 100.000 t/Jahr möglich.

Genaue Werte für anspruchsvollere Anlagen, wie sie derzeit von der BAM in den Niederlanden mit dem Ziel entwickelt werden, die Korngrösse des zurückgewonnenen Mineralbruches auf 2 mm zu erweitern, sind nicht verfügbar.

Das Erreichen dieses Ziels setzt die Implementierung von anspruchsvolleren Anlagen voraus, die sich derzeit in der Entwicklungs- und Testphase befinden, wodurch sich der Posten "Maschinen und Anlagen" im Vergleich zur oben dargestellten Schätzung deutlich erhöhen dürfte.

² Schätzung basierend auf einer Schüttdichte von ca. 1,7 t/m³ und einer durchschnittlichen Höhe von 4 bis 6 m.

Betriebskosten und Gestehungskosten:

Neben der Amortisation der oben geschätzten Investitionen umfassen die Gestehungskosten Fixkosten (Personal; Wartung und Reparaturen; Sonstiges; Lizenzgebühren;...) und variable Kosten, die im Wesentlichen mit dem Energieverbrauch zusammenhängen.

Auf dieser Grundlage können die Behandlungskosten in der derzeitigen Konfiguration in der Schweiz auf eine Grössenordnung zwischen 15 - 20 CHF / t geschätzt werden, von denen etwa 30 bis 40% mit dem Energieverbrauch zusammenhängen.

Die geschätzten Kosten für eine anspruchsvollere mechanische Aufbereitungsanlage, deren Ziel es ist, die Granulometrie der gewonnenen Mineralfraktion auf bis zu 2 mm zu erweitern, können in diesem Stadium nicht genau abgeschätzt werden.

Unter der Annahme, dass die Kosten für den Posten "Maschinen und Anlagen" im Vergleich zur obigen Schätzung auf CHF 10 bzw. 20 Millionen erhöhten, würden die geschätzten Kosten der Anlage auf eine Grössenordnung von CHF 25-30 bzw. CHF 40-50 pro Tonne steigen.

Die wirtschaftliche Gesamtbilanz dieser Aufbereitungsmethode wird in Kapitel 4.4 geschätzt, indem die Gewinne beim Verkauf der mineralischen Fraktion, die Einsparungen bei der Substitution eines Asphaltmischgutes aus Primärmaterialien und die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der Rückgewinnung oder Aufbereitung der verschiedenen Fraktionen integriert werden.

3.3.5 Umweltschutz

Die mechanische Behandlung ist ein einfacher Prozess, bei dem kein gasbildendes Abwasser entsteht und für den keine Reagenzien oder Einsatzstoffe erforderlich sind, die aus ökologischer oder toxikologischer Sicht problematisch sind.

Die Probleme betreffen die Schadstoff- und CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der Energieversorgung der Anlagen sowie die Staub- und Lärmemissionen während des Betriebs der Anlage.

In diesem Zusammenhang können die folgenden Empfehlungen gegeben werden, um die Einhaltung sicherzustellen und die Umweltbilanz dieser Art von Installation zu optimieren:

- Förderung der Energieversorgung von Maschinen und Anlagen aus dem Stromnetz (durch Bevorzugung erneuerbarer Stromquellen) zu Lasten einer Versorgung durch Dieselmotoren oder Generatoraggregaten mit CO₂- und Schadstoffemissionen (Feinstaubpartikel; Stickoxide;...).
- Begrenzung der Staub- und Geräuschemissionen an der Quelle auf Anlagenebene, die entsprechend der Empfindlichkeit des Aufstellungsortes angepasst werden muss.
- Begrenzung und Optimierung der Transportwege über den gesamten Zyklus "Erzeugung bituminöser Aggregate → Behandlung → Rückgewinnung" durch Nutzung der Synergien zwischen Aufbereitungsanlagen und Asphaltproduktionsanlagen. Förderung des Schienenverkehrs für den Transport der zu verarbeitenden bituminösen Gesteinskörnungen, insbesondere für Transporte über den lokalen Radius hinaus.

3.4 Chemisch-physikalisches Reinigungsverfahren

Die Firma HEMO Recycling AG hat ein chemisch-physikalisches Reinigungsverfahren für Asphaltaubruch und Fräsasphalt entwickelt, welches in der industriellen Teilereinigung bereits seit mehr als 20 Jahren zum Einsatz kommt. Während dem mehrstufigen Reinigungsprozess wird ein auf Kohlenwasserstoffen basierendes Lösungsmittel oberhalb seines Flammpunkts unter Vakuum mit dem klassierten Asphalt in einer Trommel vermisch und umgerührt. Mit dem lösemittelbasierten Reinigungsverfahren können gemäss Anbieter die Bindemittel Bitumen oder Teer schnell aufgelöst und aus dem Sand und Kies entfernt werden [27].

3.4.1 Verfahrensübersicht

Das Verfahren kann in vier Stufen unterteilt werden, wobei bituminöse Gesteinskörnungen mit einem PAK-Gehalt von weniger bzw. mehr als 250 mg/kg differenziert behandelt werden:

- Zerkleinerung und Klassierung
- Chemisch-physikalische Reinigung
- Destillation zur Rückgewinnung des Lösemittels
- Wiederverwendung / Verbrennung

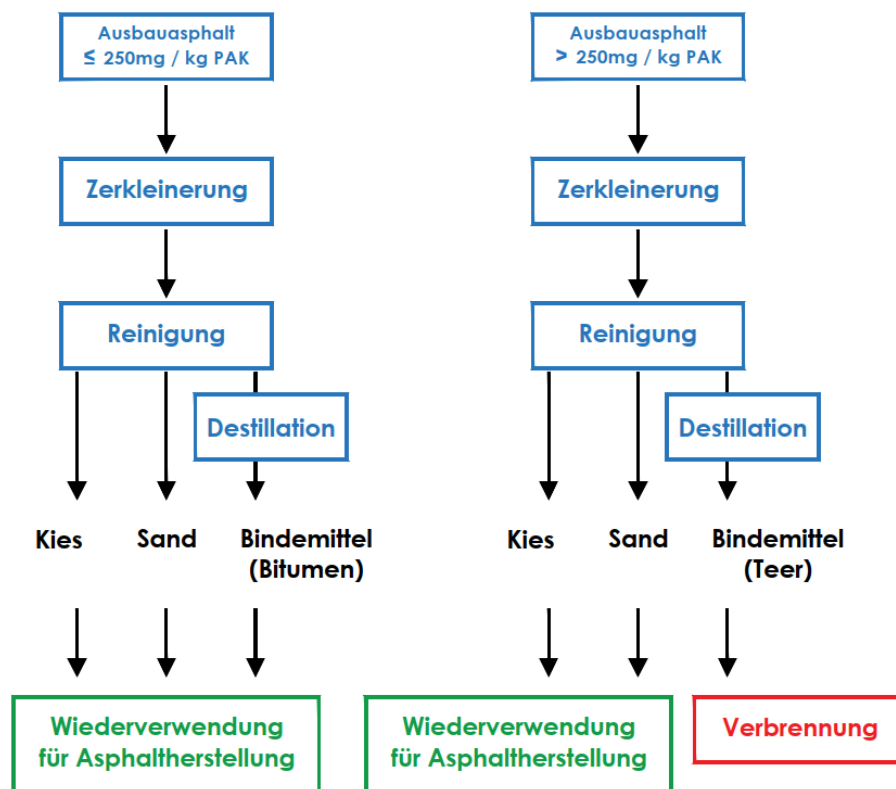


Abbildung 29: Übersicht zum chemischen Reinigungsverfahren von HEMO Recycling

- Zerkleinerung

Ausbauasphalt wird zerkleinert, in die zwei Fraktionen 0/16 und 16/70 mm klassiert und dosiert in eine Behandlungstrommel gegeben. Fräsgut wird ohne weitere Bearbeitung in die Behandlungstrommel gegeben.

- Chemisch-physikalische Reinigung

Während dem Reinigungsprozess wird ein auf verschiedenen Alkanen (n-Alkane, iso-Alkane, cyclische Alkane im Bereich C10-C14) basierendes Lösemittel mit dem Namen ARCA-solv zum Asphaltgranulat dazugegeben und in einer Trommel bei Temperaturen um 90°C und einem Systemdruck von ≤ 100 mbar während rund 60-70 Minuten zusammen mit dem Asphaltgranulat umgewälzt (Chargenbetrieb) [29]. Neben dem chemischen Auflösungsprozess und den Vakuumbedingungen wirkt dieses mechanische Umwälzen unterstützend bei der Reinigungswirkung. Der Waschvorgang findet in drei Stufen statt, wobei zuerst verschmutztes Lösemittel, dann weniger verschmutztes Lösemittel und zuletzt sauberer Lösemitteldampf zur Auflösung des Bindemittels und der Reinigung von Sand und Kies verwendet wird. Die Vorlagentanks und die Verdampfer umfassen ein Volumen von ungefähr $2 \times 3 \text{ m}^3$ bzw. $2 \times 0.7 \text{ m}^3$ (zweistrassiger Anlagenaufbau). Im Anschluss an die chemische Reinigung wird die Trommel auf einen Systemdruck ≤ 10 mbar vakuumisiert, wodurch das Lösemittel verdampft und das Gesteinsmaterial trocknet. Danach wird die Trommel belüftet und bei Erreichen des Umgebungsdrucks geöffnet.

Durch die Reinigung können die PAK-Kontaminationen auf 20-30 mg/kg reduziert werden. Bei hohem Sandanteil kann sich die Behandlungszeit etwas verlängern, um diese Resultate zu erreichen.

Dank der Vakuumbedingungen bedarf die Reinigungsanlage keiner ATEX Zertifizierung. ARCA-solv weist einen Flammpunkt von $> 60^\circ\text{C}$ und eine Wassergefährdungskategorie 1 auf. Es wird oberhalb des Flammpunkts eingesetzt, um die erforderliche Reinigungsleistung zu erzielen. ARCA-solv wird durch Formation aus verschiedenen chemischen, handelsüblichen Lösungsmitteln produziert.

- Mehrstufige Destillation

Das Bindemittel-/Lösemittel-Gemisch wird über eine Multizyklon-Anlage gefördert und durch eine mehrstufige Destillation aufbereitet, welche parallel zum Waschprozess abläuft. Die zwei Destillationsbehälter haben je ein Volumen von ungefähr 0.4 m^3 . Für die Behandlung von einer Charge Ausbauasphalt ($\approx 10 \text{ t}$) werden gut 3'000 Liter eingesetzt, wovon in der nachgeschalteten Destillation jeweils 99.8% zurückgewonnen werden. Eine Alterung des Lösemittels ist gemäss HEMO Recycling AG nicht zu erwarten, unter anderem auch, weil bei jeder Charge erneut maximal 5 Liter Lösemittel zur Kompensation der 0.2% Verluste dazugegeben werden und die Wirksamkeit dadurch erhalten bleibt.

- Wiederverwendung / Verbrennung

Bei PAK-Kontaminationen $\leq 250 \text{ mg/kg}$ wird das Bindemittel zur Wiederverwendung aufbereitet; bei PAK-Konzentrationen $> 250 \text{ mg/kg}$ wird das Bindemittel verbrannt oder entsorgt, wobei die Verwertung über bereits bestehende thermische Infrastrukturen vorgesehen ist.

Der gesamte Ablauf ist im Detail in Abbildung 30 dargestellt, wobei in der linken Spalte das Vorgehen für Ausbauasphalt/Fräsgut mit PAK $\leq 250 \text{ mg/kg}$ und rechts für Ausbauasphalt/Fräsgut mit PAK $> 250 \text{ mg/kg}$ dargestellt ist.

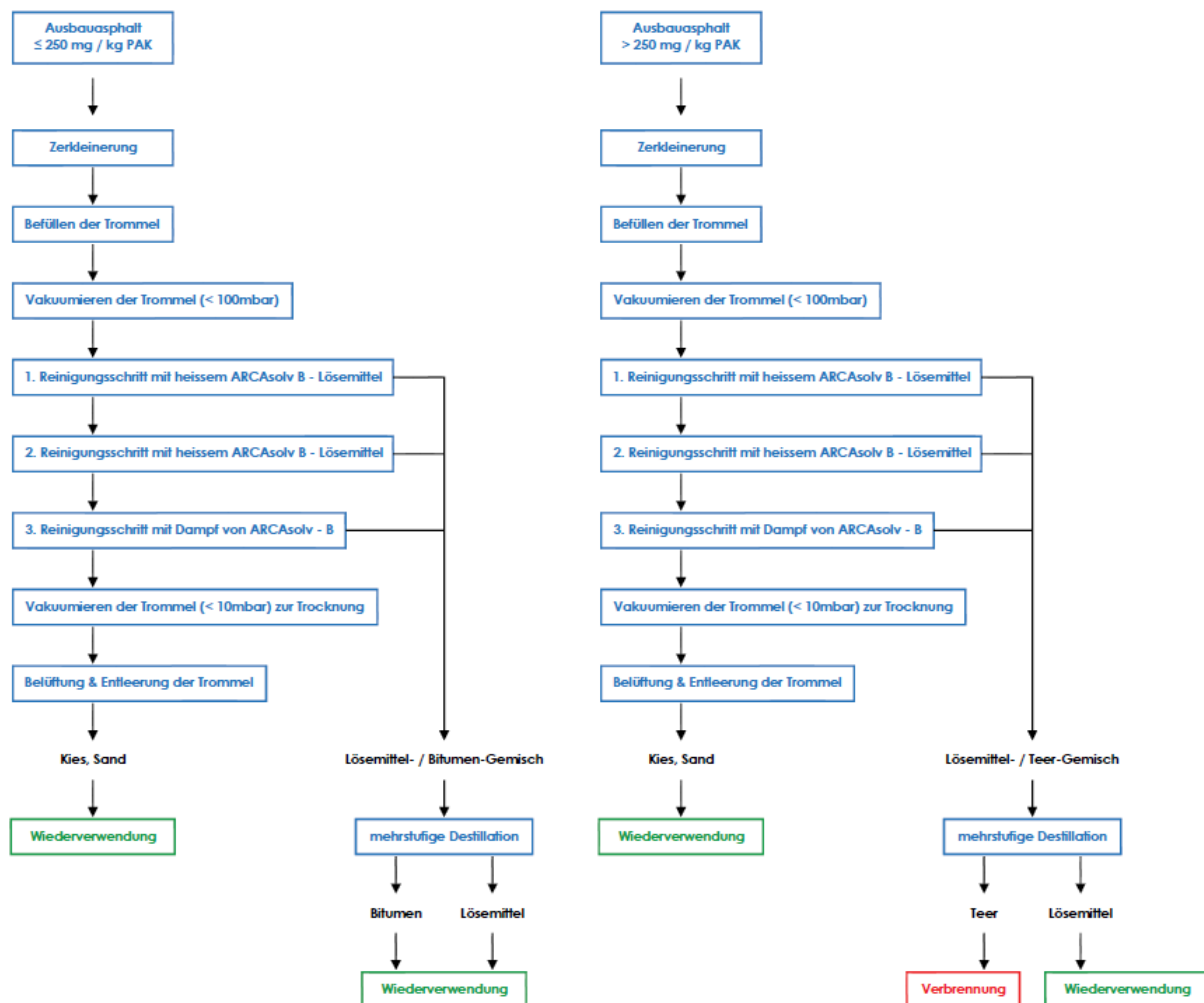


Abbildung 30: Ablauf der chemisch-physikalischen Reinigung von Ausbausphalt und Fräsgut

3.4.2 Stand der Technik

Das angewandte Reinigungsverfahren bewährt sich als solches in der industriellen Teilereinigung bereits seit mehr als 20 Jahren, neu ist hingegen die Anwendung für Asphaltaufrühe in der Baustoff-Branche. Das Reinigungsverfahren ist gemäss HEMO Recycling AG frei skalierbar, da alle Betriebsparameter dem Aufgabematerial angepasst werden können. Die aktuelle Versuchsanlage mit einer Kapazität von 200-300 kg/h verfügt über alle Prozessschritte. Die HEMO Recycling AG hat das Anlagenkonzept der Standardanlage mit interessierten Betreibern bereinigt und das Angebot für eine grosstechnische Realisierung im Jahr 2021 erarbeitet [29]. Dort sollen dann 10-20 t/h respektive 50'000-100'000 Tonnen pro Jahr umgesetzt werden können.

Gemäss HEMO Recycling AG existieren in der Schweiz bereits drei interessierte Kunden, die in eine solche Asphaltreinigungsanlage mit dem Namen ARCAone investieren möchten. Auch aus Deutschland gibt es ein interessiertes Unternehmen, doch gemäss HEMO Recycling AG möchte man als primären Zielmarkt auf die Schweiz setzen, da die Endprodukte Sand, Kies und Bitumen hier einen höheren wirtschaftlichen Nutzen schaffen und eine Anlage dadurch bereits ab etwa 30'000 t/Jahr rentabel ist.

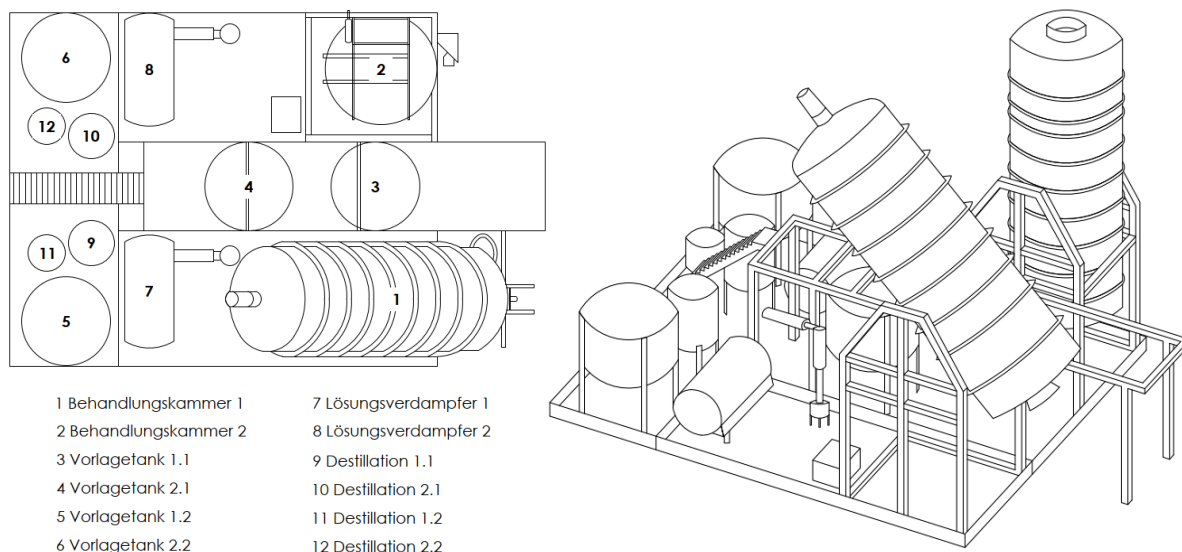


Abbildung 31: Übersicht der ARCA Reinigungsanlage in 2D und 3D. Der Platzbedarf für eine grosstechnische Reinigungsanlage mit 60'000-120'000 t/Jahr soll gemäss HEMO Recycling AG 20 x 30 Meter betragen [29].

3.4.3 Materialflüsse

In Abbildung 32 ist das Massenflussdiagramm der chemisch-physikalischen Verwertung von HEMO Recycling AG dargestellt. Pro 20 Tonnen Ausbau- und Fräsasphalt werden 3000 Liter Lösemittel zur Separation des Bindemittels vom Gestein eingesetzt. In der Destillation können 2995 L davon zurückgewonnen werden, 5 Liter verbleiben im Bindemittel. Aus den ursprünglich 20 Tonnen Ausbau- und Fräsasphalt resultieren schlussendlich etwa 1000 Liter Bindemittel inkl. 5 Liter Lösemittel und 18.8 Tonnen Sand und Kies in der Fraktion 0/22, wobei teilweise auch grössere Stücke der Fraktion 16/32 enthalten sein können. Gemäss HEMO Recycling AG werden maximal 200kg Wasser während der Erwärmung der Behandlungskammer als Dampf entzogen, kondensiert und entsorgt.

Der Energieverbrauch für 20 Tonnen Ausbau- und Fräsasphalt beläuft sich auf 600 kWh, wobei davon nur 250 kWh extern dazugegeben werden müssen.

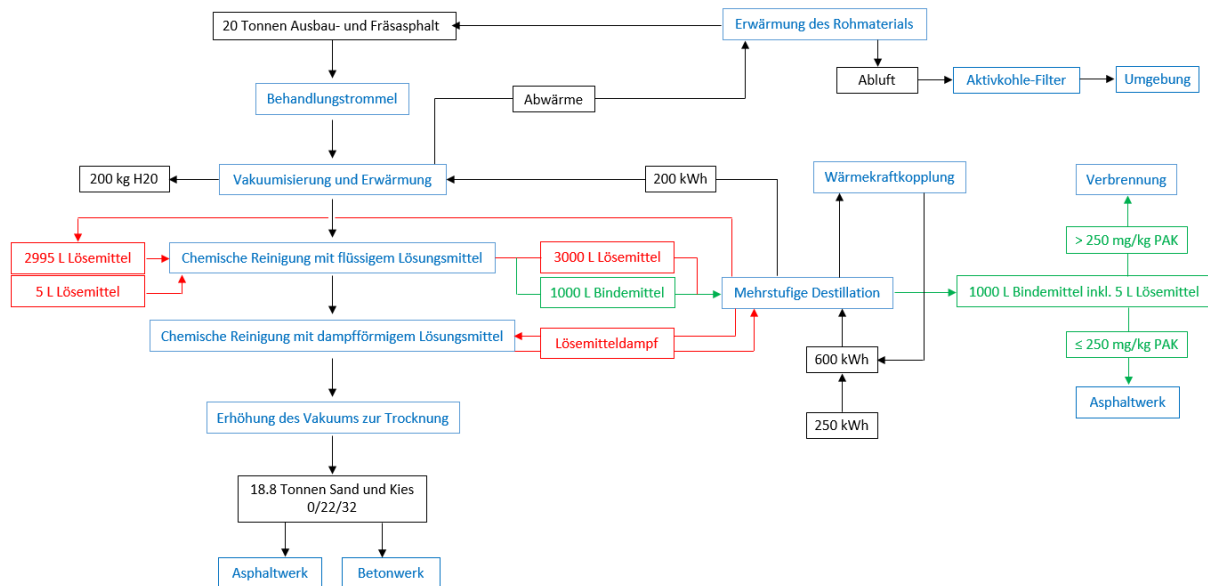


Abbildung 32: Massenflussdiagramm des chemisch-physikalischen Reinigungsverfahrens gemäss HEMO Recycling AG

3.4.4 Produktqualität

Nach der Reinigung resultieren als Endprodukte Sand, Kies und Bindemittel. Die Gesteinsprodukte wirken optisch sauber und zeigen keine Behandlungsrückstände auf (siehe Abbildung 33). Gemäss Aussage von HEMO Recycling AG wurde in verschiedenen Analysen durch akkreditierte Baustofflabore festgestellt, dass die Qualität der Gesteinsprodukte die Anforderungen für die Asphalt- und Betonproduktion erfüllt. Die Resultate dieser Analysen wurden jedoch für die vorliegende Studie nicht zur Verfügung gestellt, da gemäss HEMO Recycling AG mit den Interessenten der Anlage eine gegenseitige Vereinbarung über die Diskretion besteht. Die Endprodukte sind eine Mischung aus gebrochenen und runden Gesteinen, welche sich für den Einsatz in der Fundaments- oder Tragschicht im Strassenbau sowie für die Betonproduktion eignen. Während der Reinigung soll das Asphaltgranulat so schonend behandelt werden, dass es gemäss HEMO Recycling AG nicht zu einer Verkleinerung des Materials kommt.

Nach Angaben der HEMO Recycling AG können die Anforderungen an die PAK-Restbelastung problemlos erfüllt werden. In den bisherigen Versuchen mit stark belastetem Material (50'000-100'000 mg/kg PAK) ergab sich eine durchschnittliche Restmenge an Kohlenwasserstoffen unter 30 mg/kg (0.03 – 0.06% des Inputs).

Das Lösemittel wird im Anschluss an die Reinigung in einer mehrstufigen Destillation vom Bindemittel getrennt. Im Bindemittel sind geringe Mengen an Lösungsmittel ($\leq 0.5\%$) und Gesteinsfüller (Anteil unbekannt) enthalten, wodurch die Qualität des Bindemittels bezüglich der Konsistenz und Festigkeit leicht beeinflusst wird. Die Werte der Ring-/Kugelanalyse können entsprechend leichte Schwankungen zwischen 39-55° erreichen. Der Durchschnittswert der durchgeführten Analysen liegt gemäss HEMO Recycling AG bei 46.8°. Die Ergebnisse wurden für die vorliegende Studie nicht zur Verfügung gestellt.

Gemäss Aussage von HEMO Recycling AG ist das zurückgewonnene Bindemittel für die Aufbereitung mit weiteren Bitumensorten in der Asphaltherstellung geeignet, wenn der PAK-Gehalt bei ≤ 250 mg/kg lag. Bei Ausbausphalt/Fräsgut > 250 mg/kg muss das teerhaltige Bindemittel thermisch behandelt werden. Je nach PAK-Gehalt (\leq / $>$ 250 mg/kg) wird das Bindemittel anschliessend verbrannt oder kann bei guter Qualität und Einhaltung des PAK-Gehalts wiederverwendet werden.



Abbildung 33: Asphaltgranulat 16/70 vor (links) und nach (rechts) der chemischen Reinigung

3.4.5 Wirtschaftlichkeit

- Kritische Kapazität

Für die Rentabilität ist gemäss HEMO Recycling AG eine minimale Kapazität von 30'000 t/Jahr notwendig. Die optimale Kapazität beträgt 80'000-100'000 t/Jahr.

- Investitionskosten

Gemäss HEMO Recycling AG belaufen sich die Investitionskosten für eine Reinigungsanlage des Typs ARCAcore mit der minimalen Beschickungsvariante auf rund 9 mio CHF. Die komplette Reinigungsanlage ARCAone (inklusive Zwischenlager, Endprodukte-Lagersilos, Abluftbehandlung, Einhausung etc.) wird sich auf ungefähr 16 mio CHF belaufen. Gemäss Schätzungen der HEMO Recycling AG wird sich die Payback-Zeit für eine grosstechnische Realisierung in der Schweiz auf unter 5 Jahre belaufen.

- Betriebskosten

Die Betriebskosten werden sich gemäss HEMO Recycling AG auf maximal 10 CHF/t belaufen, siehe Tabelle 24. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Lenkungsabgabe für flüchtige organische Verbindungen (engl. volatile organic compounds, VOC) sowie die Entsorgungskosten für die PAK-kontaminierte Feinfraktion in diesem Preis noch nicht enthalten sind. Die grössten Anteile der Betriebskosten kommen durch den Energieverbrauch für die Destillation sowie den Unterhalt der Anlage zustande. Im Idealfall wird die Anlage kontinuierlich gefahren, da das Ein- und Ausschalten der Anlage mit grossen Temperaturänderungen verbunden ist und viel Energie verbraucht. Die Anlage wird mit Sensoren überwacht und kann autonom ohne permanentes Personal betrieben werden. Die Kosten für das Lösemittel sind mit schätzungsweise 0.20 – 0.30 CHF/t vergleichsweise gering, da bei jeder Charge 99.8% des Lösungsmittels zurückgewonnen und wiederverwendet werden können.

Tabelle 24: Zusammensetzung der Betriebskosten bei der chemischen Reinigung von HEMO Recycling AG

Kostenpunkt	Betriebskosten
Energie	3.50 – 4.60 CHF/t Aufbruchasphalt
Lösemittel*	0.20 – 0.30 CHF/t Aufbruchasphalt *
Unterhalt/Service	3.50 – 5.00 CHF/t Aufbruchasphalt
Total pro Tonne ($\leq 250\text{mg PAK/kg}$)	7.20 – 9.90 CHF/t Aufbruchasphalt (keine Entsorgungskosten für Bindemittel)
VOC Lenkungsabgabe	3 CHF pro kg VOC (Anteil VOC im Lösungsmittel nicht bekannt und eingerechnet)
Entsorgungskosten für PAK-kontaminierte Feinfraktion (Entsorgungskosten schätzungsweise 100 CHF/t kontaminiertes Feinmaterial)	ca. 5.00 CHF/t Aufbruchasphalt** **basierend auf der Annahme gemäss Massenbilanz von 5%-M. Bindemittel-Anteil im Asphalt (Abbildung 32)
Total pro Tonne ($> 250\text{mg PAK/kg}$)	12.20 – 14.90 CHF/t Aufbruchasphalt

Für eine Gesamtkostenbetrachtung werden hier zusätzlich zu den von HEMO Recycling AG angegebenen Betriebskosten Personalkosten für eine Überwachung des Betriebs sowie die Amortisation der Investitionen in Anlagentechnik und bauliche Massnahmen berücksichtigt. Die totalen Gestehungskosten (prix de revient) werden damit vom Verfasser des Berichts grob geschätzt in der Grössenordnung von 50 – 70 CHF/t liegen.

3.4.6 Umweltaspekte

Gemäss HEMO Recycling AG wurde für das Verfahren eine CO₂-Bilanz für die deutschen und österreichischen Umweltbehörden erstellt, die Resultate wurden für die vorliegende Studie nicht zur Verfügung gestellt. Gemäss HEMO Recycling AG fällt nur Abwärme an; die Lärmemissionen würden aufgrund der vorgesehenen Dämmung die Anforderungen der Empfindlichkeitsstufe I gemäss Deutschen Vorschriften erfüllen. Die Abluft aus den Bitumentanks und aus der Vakuumierung der Behandlungstrommel werden über Aktivkohle-Filter gereinigt.

Mögliche umwelt- und gesundheitsschädliche Emissionen durch den Einsatz des auf Kohlenwasserstoffen basierende Lösungsmittel ARCA^{solv} müssen noch genau untersucht werden. Kohlenwasserstoffe machen nach Definition der Weltgesundheitsorganisation WHO den Hauptteil der VOC aus, welche bei Emission als umwelt- und gesundheitsschädigend gelten und in der Schweiz einer Lenkungsabgabe bedürfen [28] [30]. Spätestens im Rahmen des Betriebsgenehmigungsverfahrens, das einer Umweltverträglichkeitsprüfung nach UVPV unterzogen wird, müssen diese Elemente spezifiziert und bestätigt werden, um die Einhaltung der Anforderungen der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) zu überprüfen.

3.4.7 Risiken

Das chemische Reinigungsverfahren liegt noch in keinem grosstechnischen Massstab vor. Gemäss HEMO Recycling AG ist die Anlagenkapazität frei skalierbar, dennoch dürfte die grosstechnische Realisierung gewisse Risiken mit sich bringen.

Das Verfahren basiert auf einem chemischen Lösungsprozess und beinhaltet durch den Einsatz von Kohlenwasserstoffen das Risiko von schädlichen Umweltauswirkungen verursacht durch VOCs.

Die Angaben zu den Betriebskosten sind mit Unsicherheiten behaftet und basieren lediglich auf den Angaben von HEMO Recycling AG. Im grosstechnischen Massstab haben sich diese Betriebskosten noch nicht bestätigt. Insbesondere die Unterhaltskosten müssen sich bei der grosstechnischen Realisierung noch bewahrheiten.

Zudem handelt es sich bei dem chemisch-physikalischen Verfahren um eine komplexe Technologie, welche von der industriellen Teilereinigung auf die Asphaltindustrie übertragen werden soll, wo sonst sehr robuste Prozesse dominieren. Die Kompatibilität muss sich im grosstechnischen Massstab erst noch beweisen.

3.4.8 Zusammenfassung

Das angewendete chemische Reinigungsverfahren hat sich in der industriellen Teilereinigung bereits seit über 20 Jahren etabliert und stellt im Pilotmassstab eine vielversprechende Lösung für die Behandlung von Asphaltaufbrüchen dar. Wenn die Betriebskosten im grosstechnischen Massstab tatsächlich so gering bleiben wie von HEMO Recycling AG angegeben, dürfte das Verfahren sowohl für PAK-belastete Asphaltaufbrüche wie auch für Überschussmaterial mit PAK-Konzentrationen unter 250mg/kg attraktiv sein, da es unabhängig vom PAK-Gehalt eine gute Trennung von Bindemittel und Gesteinsmaterial erlaubt.

Zudem müssen die genauen Untersuchungsergebnisse zu der Qualität der resultierenden Gesteinsprodukte veröffentlicht werden. Optisch sehen die Materialien nicht beschädigt und sehr sauber aus. Die Kohlenwasserstoffe belaufen sich gemäss Anbieter nach der chemischen Reinigung auf durchschnittlich unter 30 mg/kg (=0.03-0.06% des Inputs), womit der gesetzliche Grenzwert von 250 mg/kg problemlos erreicht werden dürfte. Die Affinität des Gesteins wurde gemäss HEMO Recycling AG bereits getestet, wobei die für die Asphaltproduktion geforderten Werte erreicht wurden. Weitere Materialprüfungen zu Rohdichte und Wasseraufnahme, Anteil gebrochener Körner, Los-Angeles Versuch, Polierwiderstand und statischer Lagerung sowie Mineralogie und Petrographie wurden nicht durchgeführt.

Ebenfalls fehlen noch wichtige Informationen zu den Umweltauswirkungen des Verfahrens. Beim Besuch der Versuchsanlage waren geringe Geruchsemissionen festzustellen, die möglicherweise durch VOC verursacht wurden. Diese müssen qualitativ und quantitativ erfasst werden, um deren potentiell schädliche Auswirkungen beurteilen zu können.

Mit Kapazitäten zwischen 50'000-100'000 t/Jahr wäre der Bedarf in der Schweiz gemäss den Szenarien aus Kapitel 2.6.2 schätzungsweise mit 5 bis 10 solcher chemisch-physikalischen Reinigungsanlagen gedeckt. Dementsprechend würde sich dieses Verfahren für eine regionale Lösung anbieten, wodurch auch keine grossen Transportwege entstehen.

3.5 Kombinierte Behandlung

3.5.1 Allgemeine Beschreibung des Prozesses

Während der durchgeführten Untersuchungen konnte ein weiteres Verfahren zur Behandlung von bituminösen Abfällen (PAK > 250mg/kg und PAK < 250mg/kg) identifiziert werden, das in der französischsprachigen Schweiz entwickelt wird. Es handelt sich um ein Verfahren, das auf der Verwendung eines nicht giftigen und umweltfreundlichen Bio-Lösungsmittels basiert. Zum Konzept gehört auch eine Pyrolyse-Einheit zur thermischen Behandlung der beim Prozess anfallenden bindemittelreichen Feinfraktion. Die technischen Details dieses Prozesses sind vertraulicher Natur.

Das Verfahren beinhaltet die mechanische Zerkleinerung der bituminösen Aggregate und die anschließende Verwendung eines Bio-Lösungsmittels. Durch die polaren Eigenschaften des Lösungsmittels und der PAK-Verbindungen wird ein Mechanismus erzeugt, durch den das in den Aggregaten enthaltene Bindemittel aufgelöst und ohne chemische Veränderungen von der mineralischen Fraktion getrennt werden kann. Um die Effizienz des Prozesses zu verbessern, kann die Mischung leicht erwärmt werden.

Dieser Prozess erzeugt eine saubere mineralische Fraktion und eine Flüssigkeit, die mit gelösten Bindemittelrückständen beladen ist. Diese mit Bitumenrückständen beladene Flüssigkeit wird anschließend destilliert, um die Bindemittelrückstände vom Bio-Lösungsmittel zu trennen. Einmal regeneriert, kann es dann als Teil des Aufbereitungsprozesses wiederverwendet und das Bindemittel für weitere Verwertungen zurückgewonnen werden.

Dieses Konzept wird aktuell in Pilotanlagen getestet und ist als Patent angemeldet. Die Entwickler dieses Konzepts planen, in naher Zukunft eine Pilotanlage zu realisieren.

3.5.2 Stand der Technik

Dieses Verfahren wurde bisher nur im Rahmen von Pilotversuchen entwickelt, deren Ergebnisse vertraulich sind.

Die betriebliche Machbarkeit im Massstab einer Pilotanlage, die sich der finalen Betriebskapazität annähert, muss noch bestätigt werden.

4 Zukunftsszenarien für die Bewirtschaftung und Behandlung von Ausbaupavement in der Schweiz

4.1 Übersicht zu den anfallenden Mengen und Verwertungsmöglichkeiten pro Kategorie

Um die verschiedenen Szenarien für die Bewirtschaftung und Behandlung von Ausbaupavement in der Schweiz über das Jahr 2026 hinaus unter Verwendung der in Kapitel 3 beschriebenen verschiedenen potenziell geplanten Behandlungsoptionen zu definieren, ist es sinnvoll, sich die Schätzungen der Gesamtmengen der zwischen 2026 und 2035 zu behandelnden Abfälle und ihre Verteilung auf die beiden Kategorien von PAK-Gehalten unter und über 250 mg/kg in Erinnerung zu rufen (siehe Abbildung 34).

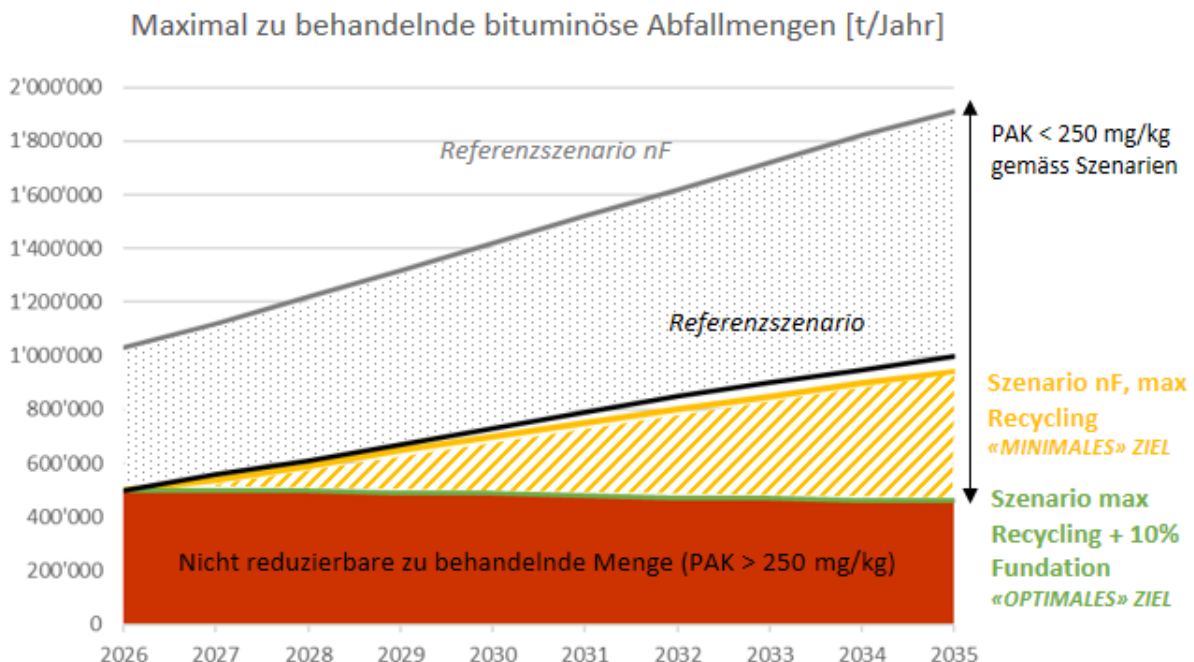


Abbildung 34: Maximale Mengen an Ausbaupavement, die gemäss den verschiedenen Szenarien behandelt werden sollen.

Die Ausarbeitung der Szenarien muss daher unterscheiden zwischen:

- Kategorie der bituminösen Abfälle mit PAK-Gehalten > 250 mg/kg:**
 Stabile Menge von etwa 500'000 t/Jahr im Jahr 2026, die bis 2035 leicht abnimmt auf 460'000 t/Jahr. Diese Abfälle stellen die nicht reduzierbare Mengen dar, die einer thermischen Behandlung unterzogen werden müssen. Diese Behandlung kann entweder direkt oder nach einer Vorbehandlung zur Reduzierung der zu behandelnden Menge durchgeführt werden, sofern sie umweltverträglich und wirtschaftlich attraktiv ist.
- Kategorie der bituminösen Abfälle mit PAK-Gehalten < 250 mg/kg:**
 Eine Menge, die als rezyklierte Granulate zurückgewonnen werden kann und deren Quantität zwischen den verschiedenen Szenarien stark variiert. Im Szenario der maximalen Verwertung ohne Verwendung in den Fundamenten „nF, Max-Recycling“ ist die zu behandelnde Überschussmenge im Jahr 2026 gleich Null, sie beträgt im Jahr 2030 ca. 200'000 t/Jahr und im Jahr 2035 ca. 500'000 t/Jahr. Diese Überschussmenge könnte bis 2035 auf Null gehalten werden,

indem man 10 % in den Fundamenten in gebundener Form verwertet. Für das Referenzszenario, bei dem die derzeitige Verwertungsquote (ohne Verwendung in Fundamenten) beibehalten wird, würden die verbleibenden nicht bewerteten Mengen bei etwa 500'000 t/Jahr im Jahr 2026 und 1'000'000 t/Jahr im Jahr 2035 liegen.

Ausserdem müssen bei der Realisierung der verschiedenen Szenarien die Unsicherheiten in Bezug auf die folgenden Elemente berücksichtigt werden:

- Daten zur Verteilung auf die 2 Kategorien von PAK-Gehalten (< und > 250 mg/kg): Zum jetzigen Zeitpunkt ist es wahrscheinlich, dass ein Teil der Abfälle mit unbestimmten oder gemischten Gehalten in die Kategorie der am stärksten kontaminierten Abfälle aufgenommen wird, was zu einer Überschätzung der Kategorie PAK > 250 mg/kg führt. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich die Rückverfolgbarkeit der PAK-Gehalte in Zukunft verbessern wird. Diese Fraktionen müssen bis 2026 im Zusammenhang mit den restriktiveren Bestimmungen der VVEA und den höheren Kosten, die für die Kategorie PAK > 250 mg/kg gelten werden, konsequenter sortiert werden.
- Daten zur Granulometrie der im bituminösen Abfall enthaltenen Mineralien: Dieser Parameter beeinflusst die Rückgewinnungsströme und -potenziale, insbesondere bei allen nicht-thermischen Behandlungen oder Vorbehandlungen.

4.2 Bituminöse Abfälle mit PAK-Gehalten > 250 mg / kg

Bituminöse Abfälle, die mit mehr als 250 mg/kg PAK kontaminiert sind, machen etwa 500'000 t/Jahr aus. Sie müssen einer thermischen Behandlung unterzogen werden. Die zu behandelnden Mengen könnten jedoch durch Vorbehandlung (mechanische, gemischte oder chemische Behandlung) reduziert werden. Diese Vorbehandlungsmöglichkeiten werden im folgenden Abschnitt 4.2.5 beschrieben.

Gemäss der Analyse im Kapitel 3.2 ist der Bau einer (oder mehrerer) speziellen thermischen Behandlungsanlage(n) in der Schweiz keine konkrete Option, da die Mindestkriterien der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit nicht erfüllt sind.

Auf dieser Grundlage können die folgenden drei thermischen Verfahren potenziell in Betracht gezogen werden, entweder für die bituminöse Gesteinskörnung als Ganzes oder für die aus der Vorbehandlung der bindemittelreichen Fraktion:

- Behandlung in einer spezialisierten thermischen Anlage im Ausland (Niederlande)
- Behandlung in einer oder mehreren neuen thermischen Behandlungsanlage in der Schweiz
- Behandlung in einem Zementwerk in der Schweiz
- Behandlung in einer oder mehreren zu errichtenden Pyrolyseanlagen in der Schweiz

Die konkreten Umsetzungsmöglichkeiten dieser Kanäle nach dem Stand der Technik und unter Berücksichtigung der zu klärenden Risiken, Grenzen und sonstiger möglicher Punkte werden in den folgenden Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.5 zusammengefasst.

4.2.1 Behandlung in einer speziellen thermischen Anlage im Ausland (Niederlande)

In den Niederlanden gibt es derzeit vier thermische Behandlungsanlagen für bituminöse Abfälle oder andere mineralische Materialien ähnlicher Zusammensetzung mit einer derzeitigen Kapazität von 4 Millionen Tonnen pro Jahr, von denen drei Viertel für die Behandlung von Abfällen aus dem Ausland genutzt werden.

Die allgemeine langfristige Nachhaltigkeit dieser Tätigkeit mit einem überwiegenden Anteil behandelter Abfälle aus dem Ausland scheint aufgrund der besonderen Rahmenbedingungen in den Niederlanden grundsätzlich gegeben zu sein (Notwendigkeit des Imports von Gestein aus dem Ausland, da praktisch

keine natürlichen Sand- und Sandvorkommen vorhanden sind, sowie das vorhandene industrielle System der Region Rotterdam, das eine optimale Nutzung von Energie und anderen Nebenprodukten ermöglicht in Kombination mit attraktiven Preisen für den Flusstransport in Verbindung mit dem Rücktransport von Waren).

Die Kosten für die Behandlung (einschliesslich des Schifftransports) liegen am derzeitigen Standort Basel bei ca. 70 bis 80 CHF pro Tonne und können an anderen, weit vom Rhein entfernten Standorten in der Schweiz bis zu 120 CHF pro Tonne betragen.

Dennoch ist eine Abhängigkeit von Anlagen im Ausland, die von privaten Unternehmen betrieben werden, immer mit einer Reihe von möglichen Risiken verbunden.

In diesem Fall können die finanziellen Risiken als begrenzt angesehen werden, sie sind abhängig von Schwankungen des Behandlungspreises, die nach dem Gesetz von Angebot und Nachfrage festgelegt werden. Darüber hinaus sind auch institutionelle Risiken begrenzt, können jedoch nicht ausgeschlossen werden, beispielsweise in Form eines Beschlusses der Europäischen Union, den Zugang zu diesem Sektor mit begrenzter Behandlungskapazität den Mitgliedsstaaten vorzubehalten.

Die mit dem Transport auf dem Rhein verbundenen Risiken sind ebenfalls begrenzt (Asphalttransporteure konnten auch in trockenen Sommern operieren, allerdings verbunden mit niedrigeren Frachtraten und damit höheren Transportkosten), wobei sich das Problem der Wasserstände trotz des zu erwarteten Klimawandels bis 2085 voraussichtlich nicht negativ entwickeln wird (grösseres Aufkommen von Schmelzwasser).

Auf dieser Grundlage ist die Behandlung von bituminösen Abfällen mit einer PAK-Konzentration von mehr als 250 mg / kg in einer speziellen Aufbereitungsanlage in den Niederlanden eine Option, die für den hier betrachteten Zeitraum 2026-2035 beibehalten werden sollte. Um das Abhängigkeitsrisiko zu begrenzen, ist es dennoch ratsam, einerseits parallel dazu Verwertungswege für bituminöse Abfälle in der Schweiz zu entwickeln und andererseits Massnahmen festzulegen, mit denen die vertragliche und institutionelle Sicherheit gegebenenfalls verbessert werden könnte (z.B. durch langfristige Verträge mit den betreffenden Unternehmen).

4.2.2 Behandlung in einer oder mehreren neuen thermischen Verwertungsanlagen in der Schweiz

Auf die Machbarkeit der Realisierung einer oder mehrerer thermischen Verwertungsanlagen für Asphaltausbruch wurde in Kapitel 3.2.1.7 eingegangen. Folgende limitierende Faktoren und Hindernisse wurden dabei aufgezeigt:

- Eine Anlage müsste für einen wirtschaftlichen Betrieb auf eine Kapazität von ca. 500'000 bis 1'000'000 t/Jahr ausgelegt werden. Dies würde bedeuten, dass eine zentrale Anlage realisiert würde.
- Durch die thermische Behandlung verändern sich die Eigenschaften des mineralischen Anteils des Ausbruchasphalts. Sie erfüllen die Anforderungen nicht für die Produktion bituminöser Beläge. Das bedeutet, dass thermisch behandeltes Material nur für Anwendungen mit geringeren Anforderungen verwendet werden kann, was zu einem wesentlich geringeren Verkaufspreis führt.
- Die Realisierung bedürfte eines sehr grossen Industrieareals, möglichst zentral gelegen, mit Bahnanschluss und einem kombinierten Strassen-/Schienen-Transportkonzept. Um die produzierte Wärme möglichst während dem ganzen Jahr nutzen zu können, müssten entsprechende Abnehmer in der näheren Umgebung vorhanden sein.

- Eine Anlage würde sich nur mit sehr grossen Investitionssummen realisieren lassen (geschätzt mindestens CHF 100 Mio für eine Anlage mit 500'000 t Jahreskapazität). Zudem sind die Investitionskosten mit langen Amortisationszeiten und hohen Risiken verbunden, da die Zuführung von Abfällen nicht durch Einzugsgebiete gewährleistet ist.
- Die Behandlungskosten können grob auf CHF 130 pro Tonne geschätzt werden, unter der Annahme, dass die Abwärme ebenso effizient genutzt werden kann wie in den Niederlanden. Diese Kosten sind höher als aktuelle Behandlungskosten und solche von zukünftigen Lösungen.

Auf dieser Basis ergibt sich für die Realisierung einer thermischen Verwertungsanlage für bituminöse Abfälle in der Schweiz keine Option, die in Betracht zu ziehen ist.

4.2.3 Behandlung in einem Zementwerk in der Schweiz

Die thermische Behandlung von Ausbauasphalt (insbesondere der bindemittelreichen Feinfraktionen) in Schweizer Zementwerken ist eine interessante Alternative zur thermischen Verwertung im Ausland. Die Schweizer Zementindustrie verwendet heute noch keine bituminösen Gesteinskörnungen, untersucht aber technische Lösungen für diesen Zweck.

Der thermischen Behandlung im Zementofen selber ist durch die Qualitätsanforderungen an den Zement begrenzt. Das theoretische Gesamtpotenzial aller Schweizer Anlagen beträgt nur etwa 60'000 t/a. Entsorgungskosten in der Grössenordnung von CHF 100/t sind als erste Annäherung für diesen Verwertungsweg zu betrachten.

Die Übernahme grösserer Mengen bituminöser Gesteinskörnungen durch Zementwerke kommt nur dann in Betracht, wenn die Gesteinskörnungen nicht mit Zementklinker vermischt werden. Einige ausländische Zementwerke haben bereits einen thermischen Reaktor parallel zum Zementofen zur thermischen Behandlung organisch belasteter mineralischer Abfälle installiert. Die von diesem speziellen Reaktor erzeugten Gasströme werden in der Rauchgasreinigungsanlage des Zementwerks behandelt während der mineralische Anteil vom Zementklinker getrennt anfällt.

Die mögliche Kapazität eines solchen Reaktors hängt stark von den Eigenschaften des Zementofens ab, zu dem sie parallel installiert werden sollen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine Reaktorgrösse sinnvoll, die keine wesentliche Adaptation des Zementofensystems erfordert. Um die gesamte Menge an kontaminierten bituminösen Gesteinskörnungen oder auch nur deren Feinanteil zu behandeln, müssten wahrscheinlich mehrere Zementwerke mit solchen Reaktoren ausgestattet werden. Ob dies ökonomisch sinnvoll ist, hängt stark von der Entwicklung der Entsorgungspreise im Ausland und von den Preisen für die Behandlung anderer Abfälle ab, die ebenfalls in Zementwerken behandelt werden. Die Entsorgungskosten für diesen Prozess sollten in erster Näherung ebenfalls in der Grössenordnung von 100 CHF pro Tonne liegen.

Um diese und andere mögliche Optionen für die Verarbeitung bituminöser Gesteinskörnungen in der Zementindustrie zu prüfen, sollten zukünftige Rahmenbedingungen definiert werden, insbesondere um die Planungssicherheit dieser Investitionen in zweistelliger Millionenhöhe zu erhöhen. Die Zementindustrie bestätigt jedoch, dass es prinzipiell möglich ist, technische Lösungen in grossem Umfang bis 2026 umzusetzen.

4.2.4 Pyrolyse in der Schweiz

Die Pyrolyse ist ein thermochemisches Verfahren, das häufig als Alternative zur Verbrennung für die Abfallbehandlung in Betracht gezogen wird, sich jedoch unabhängig vom betrachteten Abfall nie vollständig als umweltverträgliches Verfahren in grossem Massstab etabliert hat. Im Gegensatz zur Verbrennung entsteht bei der Pyrolyse ein brennbares Gas, das in einem nachgeschalteten Prozess ver-

wendet werden kann. Ausserdem wird das Rohmaterial nicht verbrannt, sondern es resultiert ein Restmaterial, das für andere Zwecke benützt werden kann. Ein Beispiel ist die Pyrolyse von Holz zu Holzkohle.

Die Pyrolyse-Technologie ist gut entwickelt. Das Verfahren wurde von einem renommierten Hersteller von speziellen thermischen Aufbereitungsanlagen für bituminöse Gesteinskörnungen getestet. Es wurde festgestellt, dass die mineralische Fraktion nicht ausreichend vom Bindemittel und den darin enthaltenen Kohlenwasserstoffen gereinigt wurde. Nachfolgende Entwicklungen wurden unterbrochen. Eine Firma in Italien, die dieses Verfahren im Pilotversuchsstadium untersucht hat, existiert heute nicht mehr. Es gibt daher keine Erfahrungen mit der Anwendung dieses Verfahrens im betrieblichen Massstab bei der Aufbereitung von bituminösen Gesteinskörnungen.

Sollte sich die Machbarkeit der Pyrolyse für die Aufbereitung von bituminösen Gesteinskörnungen bestätigen, könnten Anlagen mit einer grossen Bandbreite an Kapazitäten ins Auge gefasst werden. Die Investitions- und Betriebskosten wären wahrscheinlich höher als bei einer Verbrennungsanlage mit der gleichen Kapazität, da die Pyrolysetechnik komplexer ist. Eine fundierte Kostenabschätzung ist derzeit nicht möglich, da es keine erprobten technologischen Lösungen im Betriebsmassstab gibt.

Unter ökologischen und technischen Gesichtspunkten ist insbesondere das Pyrolysegas von Bedeutung. Der sichere und umweltfreundliche Umgang mit brennbarem Pyrolysegas muss ausreichend kontrolliert werden, um die Sicherheit der Anlage zu gewährleisten.

4.2.5 Mögliche Vorbehandlungen zur Trennung des Bindmittels vom mineralischen Anteil

Mögliche Vorbehandlungen für die Abtrennung der mineralischen Fraktion, damit nur das Bindemittel oder die bitumenreichen Feinfraktion thermisch behandelt werden müssen, sind die in Kapitel 3 beschriebenen chemisch-physikalischen, kombinierten und mechanischen Behandlungen.

Bei der mechanischen Vorbehandlung hängt der Anteil der zurückgewonnenen Gesteinskörnung und damit der verbleibenden Feinfraktion, die thermisch behandelt werden muss, von der minimalen Korngrösse ab, die abgeschieden werden kann. Mit einer Vorbehandlung zur Gewinnung der mineralischen Fraktion mit einem Durchmesser grösser als 2 mm (noch in Entwicklung) würde die thermisch zu behandelnde Menge um 65 bis 70 % abnehmen und damit auf eine geschätzte Menge zwischen 150'000 bis 175'000 t/Jahr reduziert werden (entsprechend den Annahmen zur Korngrössenverteilung aus Kapitel 3.3).

Wenn nur Gesteinskörnungen mit einem Durchmesser von mehr als 8 mm gewonnen werden könnten (Leistung der bestehenden Anlagen), würde sich die Verringerung des Durchsatzes auf 25 % beschränken, wodurch sich eine Menge von ca. 350'000 bis 380'000 t/Jahr ergeben würde, die noch thermisch behandelt werden muss.

Bei der chemisch-physikalischen Behandlung mit einem Lösungsmittel können die Gesteinskörnungen nahezu vollständig vom Bindemittel getrennt werden, wodurch die thermisch zu behandelnde Menge um Faktor 15 bis 20 auf insgesamt 25.000 bis 35.000 t/Jahr abnehmen würde.

Durch eine kombinierte Behandlung mit Vorwaschen durch ein Bio-Lösungsmittel und anschliessender Pyrolyse sollte es möglich sein, den thermisch zu behandelnden Anteil auf 15 bis 25 % zu reduzieren (abhängig von der Menge des mit dem Bindemittel gemischten Füllstoffs).

4.3 Potenziell verwertbare bituminöse Abfälle mit PAK-Gehalten < 250 mg / kg

Für diese Kategorie bituminöser Abfälle besteht die Priorität darin, so viel wie möglich als rezyklierte Gesteinskörnung wiederzugewinnen, mit dem Ziel einer vollständigen Verwertung. Gemäss USG und VVEA ist die Materialrückgewinnung zu begünstigen und stellt eine günstige wirtschaftliche Verwertung dar.

Aus dieser Perspektive ist das Szenario „maximales Recycling, nF“ mit keinem Überschuss im Jahr 2026 und einer Menge von ca. 200'000 t/Jahr im Jahr 2030 und 500'000 t/Jahr im Jahr 2035 ein realistisch zu erreichendes Ziel. Wie in Kapitel 2.6.2 hervorgehoben, würde eine leichte Erhöhung der Recyclingraten in den drei Deckschichten oder eine gebundene Verwertung in den Fundamenten gemäss dem Szenario "max Recycling + 10% Fundament" das Erreichen einer vollständigen Verwertung dieser Fraktion ermöglichen.

In einem zweiten Schritt und parallel zu diesen Überlegungen könnten die drei in Kapitel 3 präsentierten Behandlungsmethoden, abgesehen von der thermischen Behandlung, wie nachfolgend beschriebenen in Betracht gezogen werden. Diese drei Techniken befinden sich in unterschiedlichen Reifegraden, beinhalten aber alle noch Entwicklungs- oder Optimierungspotenzial.

Mechanische Bearbeitung

Die derzeitige mechanische Behandlung ermöglicht die Rückgewinnung von mineralischen Granulaten, die grösser als 8 mm sind, d.h. ca. 25 % der gesamten zu behandelnden Menge, abhängig von den Annahmen der granulometrischen Verteilung in den verschiedenen Schichten. Mit dieser Konfiguration ist die mechanische Aufbereitung eine interessante Ergänzung zur Verwertung von Gesteinskörnungen im Strassenbau. Sie erlaubt es aber nicht, einen Absatz für die bindemittelreiche Feinfraktion (< 8mm) zu gewährleisten, die 75 % des zu behandelnden Stroms ausmacht (für den Fall, dass die Optimierungsmöglichkeiten der Anlage bereits ausgeschöpft sind).

Eine optimierte mechanische Aufbereitung mit einer Technik, die derzeit von der BAM in den Niederlanden entwickelt wird, würde die Rückgewinnung mineralischer Fraktionen bis zu einer Korngrösse von 2 mm erlauben, was zwischen 65 bis 70 % der Inputmenge ausmachen würde. Der Rest könnte in Form eines Bitumenmörtels (>2mm) erneut in der Asphaltproduktion verwertet werden. Die Entwicklung dieser Technik impliziert jedoch einerseits zusätzliche Entwicklungen in Bezug auf die Sortiertechnik und andererseits die Möglichkeit, den gewonnenen Bitumenmörtel gegebenenfalls durch Zugabe von Primärbitumen und Additiven aufzuwerten.

Was die zurückgewonnene mineralische Fraktion betrifft, so liegt ihr Restbindemittelgehalt unter 1 %, so dass eine Verwertung in gebundener Form (zur Herstellung neuer bituminöser Beläge) oder in ungebundener Form unter einem wasserdichten Belag unter Berücksichtigung der Bestimmungen gemäss der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle in Betracht gezogen werden kann.

Diese Behandlung kann in dezentralen Einrichtungen von etwa 100'000-200'000 t / Jahr durchgeführt werden. Die Kosten für die derzeitige Behandlung (> 8 mm) liegen bei etwa 20 CHF / t. Die Kosten für die optimierte Behandlung (> 2 mm) müssen noch ermittelt werden, sollten jedoch in der Grössenordnung von 50 CHF / t bleiben.

Chemische Behandlung

Die Implementierung einer lösungsmittelbasierten chemischen Behandlung erfordert die Entwicklung einer industriellen Anlage mit einer Mindestkapazität von 50'000 t / Jahr - mit einer optimalen Auslastung zwischen 80'000 und 100'000 t / Jahr. Diese Behandlung ermöglicht es, gewaschene Gesteinskörnungen und ein Bindemittel zu erhalten, welches entweder wiederverwertet werden kann (<250 mg/kg) oder thermisch behandelt werden muss (> 250 mg/kg).

Die Restkontamination durch Bindemittel in den zurückgewonnenen Gesteinskörnungen sollte mit den Ergebnissen der mechanischen Behandlung (<1%) vergleichbar oder sogar niedriger sein. Die tatsächliche Kontamination der resultierenden Produkte muss jedoch noch genauer spezifiziert werden, liegt durchschnittlich aber unter 30 mg/kg. Nach vorläufiger Einschätzung liegt der Gesamtkostenpreis zwischen 50 und 70 CHF / t.

Diese Art der Behandlung existiert derzeit nur im Pilotmassstab und muss noch im industriellen Massstab entwickelt werden. Ein konkretes Projekt ist für eine Installation von 50'000 t / Jahr geplant. Die "sehr ausgefeilte" Natur des Verfahrens und die Freisetzung von Lösemittelgerüchen scheinen jedoch wichtige Themen für die Behandlung von bituminösen Abfällen im industriellen Massstab zu sein.

Kombinierte Behandlung

Diese Behandlung basiert auf dem Waschen von bituminösen Abfällen mit einem Bio-Lösungsmittel, das bei niedriger Temperatur erhitzt wird, um die mineralische Fraktion (> 2mm) vom Bindemittel zu trennen. Der resultierende Bitumenmörtel kann als Bestandteil eines "neuen" Bindemittels in Asphaltmischanlagen wiederverwendet und/oder einer Pyrolyse unterzogen werden, um den Energiebedarf für das Erhitzen des Bio-Lösungsmittels sicherzustellen.

Diese Behandlung ist als Patent angemeldet und wird erst in einer Pilotanlage mit sehr geringer Kapazität umgesetzt. Darüber hinaus waren die Pyrolyseexperimente, die jedoch auf die Gesamtheit der bituminösen Gesteinskörnungen angewendet wurden, offenbar noch nie erfolgreich gewesen.

Um diese Art der Behandlung umsetzen zu können, müssen die Rahmenbedingungen festgelegt und gegebenenfalls die Entwicklung einer Anlage im industriellen Massstab gefördert werden.

Die geschätzten Kosten sollten in derselben Grössenordnung liegen wie die für die chemische Behandlung (schätzungsweise zwischen 50 und 70 CHF / t).

4.4 Zusammenfassung - bevorzugte Szenarien

4.4.1 Allgemeine Aspekte

Aus den verschiedenen in den vorhergehenden Absätzen entwickelten Elementen können die Elemente und Grundsätze einer globalen Strategie für die Bewirtschaftung und Behandlung von bituminösen Abfällen unter Einbeziehung der ab 2026 geplanten regulatorischen Änderungen wie folgt angegeben werden:

Als **erste Priorität** wird angestrebt, die Rückgewinnung der PAK-Kategorie < 250 mg/kg als rezyklierte Gesteinskörnung in den gebundenen Schichten von Strassen so weit wie möglich zu fördern. Das Szenario "max recycling, nF", das die Verwertung der gesamten Kategorie im Jahr 2026 ermöglicht und einen geschätzten Überschuss von 500'000 t/Jahr im Jahr 2035 aufweist, ist ein realistisch zu erreichendes Ziel. Wie in Abschnitt 2.6.2 hervorgehoben, würde eine leichte Erhöhung der Recyclingraten in den drei Deckschichten oder eine Verwertung in gebundener Form in den Fundamenten gemäss dem Szenario "max Recycling + 10% Fundament" das vollständige Recycling dieser Fraktion ermöglichen.

Diese Art der Verwertung entspricht den Prioritäten des USG und der VVEA und ist wirtschaftlich betrachtet rentabel, wie in Abbildung 35 dargestellt.

Die **zweite Priorität besteht in der Entwicklung spezifischer Behandlungskanäle auf nationaler Ebene**, so dass bituminöse Abfälle mit PAK-Gehalten > 250 mg / kg und gegebenenfalls überschüssige Fraktionen mit PAK-Gehalten < 250 mg / kg in der Schweiz behandelt werden könnten. Diese Optionen, von denen die meisten die Behandlung beider PAK-Kategorien ermöglichen, sind in der zusammenfassenden Tabelle 26 zusammen mit der Option der thermischen Behandlung in den Niederlanden dargestellt.

Die Verwertungswege, von denen die meisten beide PAK-Kategorien differenziert behandeln können, sind in der folgenden Übersichtstabelle (siehe Tabelle 26) zusammen mit der Option der thermischen Behandlung in den Niederlanden dargestellt.

4.4.2 Wirtschaftliche Aspekte

Die vergleichende Analyse der wirtschaftlichen und finanziellen Aspekte ist in Abbildung 35 dargestellt. Für jede der betrachteten Behandlungsoptionen und als Vergleich zur Deponierung werden die Kosten für die Behandlung und die Einsparungen, falls vorhanden, durch die Rückgewinnung von rezyklierten Materialien im Vergleich zu den Kosten für die Herstellung des gleichen Materials aus Primärrohstoffen dargestellt.

Die wichtigsten Grundlagen und Annahmen, die für diese Berechnungen berücksichtigt wurden, sind im Folgenden zusammengefasst. Es können die folgenden drei Kostenelemente bzw. Einsparkomponenten unterschieden werden:

A. Kosten im Zusammenhang mit der Behandlungsanlage

- Die Schätzung der Baukosten für jeden betrachteten Verwertungsweg erfolgt auf der Grundlage der in Kapitel 3 genannten Elemente, wobei die Behandlungskapazität zu berücksichtigen ist.
- Die Kosten für die Behandlung, ausgedrückt pro Tonne des behandelten Materials, werden unter Einbeziehung von Amortisationen, fixen und variablen Kosten geschätzt.

Die angegebenen Werte sind als Anhaltspunkt zu betrachten, sie müssen im Rahmen der späteren Realisierungsphasen der verschiedenen Verwertungswege präzisiert und bestätigt werden. Insbesondere die Daten für Verfahren, die noch nicht im industriellen Massstab realisiert sind (z. B. verbesserte optimierte mechanische Aufbereitung; kombiniertes Verfahren mit Bio-Lösungsmittel etc.), sind mit grosser Unsicherheit behaftet und sollten nur als plausible Grössenordnungen betrachtet werden.

B. Kosten im Zusammenhang mit der Aufbereitung, Behandlung und Entsorgung resultierender Fraktionen

Diese Komponente berücksichtigt die Kosten, die zusätzlich zur Behandlungsanlage zu berücksichtigen sind, um entweder die zu verwertenden Fraktionen aufzubereiten oder die nicht verwertbaren Fraktionen zu entsorgen. Die entsprechenden Kosten müssen in den Gesamtkosten im Verhältnis zum Massenanteil der betreffenden Fraktion pro Tonne enthalten sein.

Diese Kosten beziehen sich insbesondere auf :

- Thermische Behandlung/Entsorgung von bindemittelreichen Feinfraktionen und Schlämmen: 100 - 120 CHF/t
- Übernahme von bindemittelreichen Feinfraktionen aus der mechanischen Aufbereitung zur Wiederverwertung in einer Asphaltmischanlage, inkl. Amortisation der spezifischen Anlagen: 3 - 5 CHF/t

C. Umsatzerlöse aus dem Verkauf von Sekundärmaterialien / der Substitution von Primärmaterialien

Diese Komponente berücksichtigt die Erlöse aus dem Verkauf von Sekundärmaterialien und/oder die Einsparungen, die durch die Substitution entsprechender Primärmaterialien erzielt werden.

Die entsprechenden Erlöse sollten in der wirtschaftlichen Gesamtbilanz im Verhältnis zum Massenanteil der jeweiligen verwerteten Fraktion pro Tonne des verarbeiteten Inputs enthalten sein.

Diese Substitutionserlöse bzw. -einsparungen wurden auf der folgenden Grundlage geschätzt, wobei Spannen in Bezug auf mögliche Qualitätsschwankungen der erzeugten Fraktionen und Unsicherheiten in Bezug auf das tatsächliche Verwertungspotenzial für bestimmte spezifische Verwendungszwecke (z.B. regeneriertes Bindemittel in Asphaltmischanlagen) berücksichtigt wurden:

- Wert eines Asphaltmischguts aus Primärmaterialien: ca. 70 CHF pro Tonne (95% mineralische Gesteinskörnung zu 40 CHF pro Tonne und 5% bituminöses Bindemittel zu 600-800 CHF pro Tonne) [30]
- Wert der mineralischen Gesteinskörnung: Basis 40 CHF pro Tonne, reduziert auf 25 -30 CHF pro Tonne, um einen möglichen Wertverlust in Verbindung mit einer leichten Veränderung der mechanischen Eigenschaften in Verbindung mit Restverschmutzung (< 1 % Bindemittel) zu berücksichtigen.
- Wert des Bindemittels bzw. des bindemittelreichen Anteils: Basis 600 CHF pro Tonne, abzüglich bis zu 200 CHF pro Tonne, entsprechend den o.g. Unsicherheiten in der vorgenannten Anlagen oder bis zu 40 CHF pro Tonne entsprechend dem Energiewert

Die angegebenen Werte sind als Anhaltspunkt zu betrachten, sie müssen im Rahmen der späteren Konkretisierungsschritte der verschiedenen Verwertungswege präzisiert und bestätigt werden. Insbesondere die Angaben zu Verfahren, die noch nicht im industriellen Massstab realisiert sind (z.B. verbesserte optimierte mechanische Aufbereitung; Behandlung mit Bio-Lösungsmittel etc.).

Diese verschiedenen Kosten- und Einsparelemente im Zusammenhang mit der Substitution von Primärmaterialien ermöglichen es, eine wirtschaftliche Gesamtbilanz der verschiedenen Behandlungsverfahren zu erstellen, ausgedrückt in CHF pro Tonne mit entsprechenden Bandbreiten, um die verschiedenen genannten Unsicherheiten berücksichtigen.

Die gesamten Aufbereitungskosten, d.h. die Summe der Kosten für die Behandlungsanlagen (A) und die Aufbereitung / Behandlung / Entsorgung (B) sind für die verschiedenen Kanäle in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Zusammenfassung zu den geschätzten Behandlungskosten für die verschiedenen Verwertungswege

Verwertungsweg	PAK < 250 mg/kg	PAK > 250 mg/kg <i>(in allen Fällen einschliesslich der thermischen Behandlung für die bindemittelreiche Feinfraktion)</i>
Verwertung im Strassenbau	30 CHF / t	Nicht erlaubt ab 2026
Deponierung	60 CHF / t (DTB)	120 CHF / t (DTE)
Aktuelle mechanische Behandlung	35 CHF / t	80 – 110 CHF / t
Optimierte mechanische Behandlung ⁽¹⁾	40 – 60 CHF / t	70 – 100 CHF / t
Chemische Behandlung mit Lösungsmitteln ⁽¹⁾	50 – 70 CHF / t	55 – 95 CHF / t
Chemische Behandlung mit Bio-Lösungsmittel (1)	50 – 70 CHF / t	55 – 95 CHF / t
Thermische Behandlung NL	80 – 120 CHF / t ⁽²⁾	80 – 120 CHF / t ⁽²⁾
Thermische Behandlung CH (Zementindustrie o- der Pyrolyse ⁽¹⁾)	≥100 CHF / t	≥100 CHF / t

⁽¹⁾ Betriebliche Machbarkeit und Konkretisierung müssen bestätigt werden

⁽²⁾ Preisspanne bezogen auf die Transportentfernung nach Basel

4.4.3 Zusammenfassung

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass mechanische und chemische Behandlungen die bevorzugten Optionen sind, sowohl für die vollständige Behandlung von bituminösen Abfällen der PAK-Kategorie < 250 mg/kg als auch für die Vorbehandlung der PAK-Kategorie > 250 mg/kg, da sie eine günstigere technische und wirtschaftliche Bewertung aufweisen als die vollständige thermische Behandlung für diese zweite Kategorie, die den Grossteil der im zukünftigen Zustand zu behandelnden Abfälle ausmachen dürfte.

Die mechanischen und chemischen Aufbereitungsverfahren erfordern keine sehr hohe kritische Behandlungskapazität und könnten daher nach dem Prinzip der 10-Jahres-Anlagen mit einer Mindestkapazität von etwa 50'000 bis 100'000 t/Jahr pro Anlage realisiert werden.

Die Entwicklung solcher mechanischen und chemischen Verfahren würde somit eine Alternative zum Export von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten > 250 mg/kg in eine spezialisierte Aufbereitungsanlage in den Niederlanden bieten. Der Export in die Niederlande bleibt zwar weiterhin eine mögliche Verwertung, die für die zukünftige Bewirtschaftung in Betracht gezogen werden sollte; eine vollständige Abhängigkeit sollte jedoch vermieden werden.

Die thermische Behandlung in Zementwerken hat in der derzeitigen Konfiguration der Anlagen eine sehr begrenzte Kapazität (ca. 60'000 t/Jahr für die gesamte Schweiz), und das Interesse für die Realisierung paralleler Reaktoren speziell für PAK-kontaminierte Abfälle muss noch ermittelt werden, insbesondere da die geschätzten Behandlungskosten wahrscheinlich höher sind als die Kosten für die mechanischen und chemischen Behandlungsverfahren.

Die Behandlung in Zementwerken bleibt jedoch eine interessante Option für die thermische Behandlung des Bindemittels bzw. der bindemittelreichen Feinfraktion der PAK-Kategorie > 250 mg/kg aus der mechanischen und chemischen Vorbehandlung, deren Menge je nach Effizienz und Eigenschaften der Vorbehandlung auf 30'000 bis 170'000 t/Jahr geschätzt wird.

Die mechanischen und chemischen Behandlungsprozesse befinden sich jedoch noch in der Entwicklung oder Optimierung. Die Zeit, die bis zum Inkrafttreten der von der VVEA geplanten Änderungen im Jahr 2026 zur Verfügung steht, kann es ermöglichen, die Machbarkeit dieser Methoden im industriellen Massstab zu bestätigen und die Prozesse sowie die Verwertungsmöglichkeiten der verschiedenen aus der Behandlung resultierenden Fraktionen zu optimieren.

Für die **mechanische Aufbereitung** soll geprüft werden, ob der derzeitige Stand der Technik zur Trennung von mineralischen Gesteinskörnungen bis zu einem Mindestdurchmesser von 8 mm durch eine Absenkung der Mindestkorngösse auf 2 mm optimiert werden kann, um die Möglichkeiten zur Aufwertung der bindemittelreichen Feinfraktion als Bestandteil eines neu gebildeten Bindemittels durch technologische Anpassungen zu erweitern.

Für die **chemisch-physikalisch oder kombinierte Behandlung**, die derzeit im Forschungsstadium oder in Pilotanlagen mit geringer Kapazität entwickelt werden, ist das Ziel, sie in einer Pilotanlage im industriellen Massstab umzusetzen. Dadurch wird es eventuell möglich, die betriebliche und wirtschaftliche Durchführbarkeit zu bestätigen, die technische und ökologische Qualität der resultierenden Produkte zu validieren und die Einhaltung der Umweltvorschriften zu bewerten.

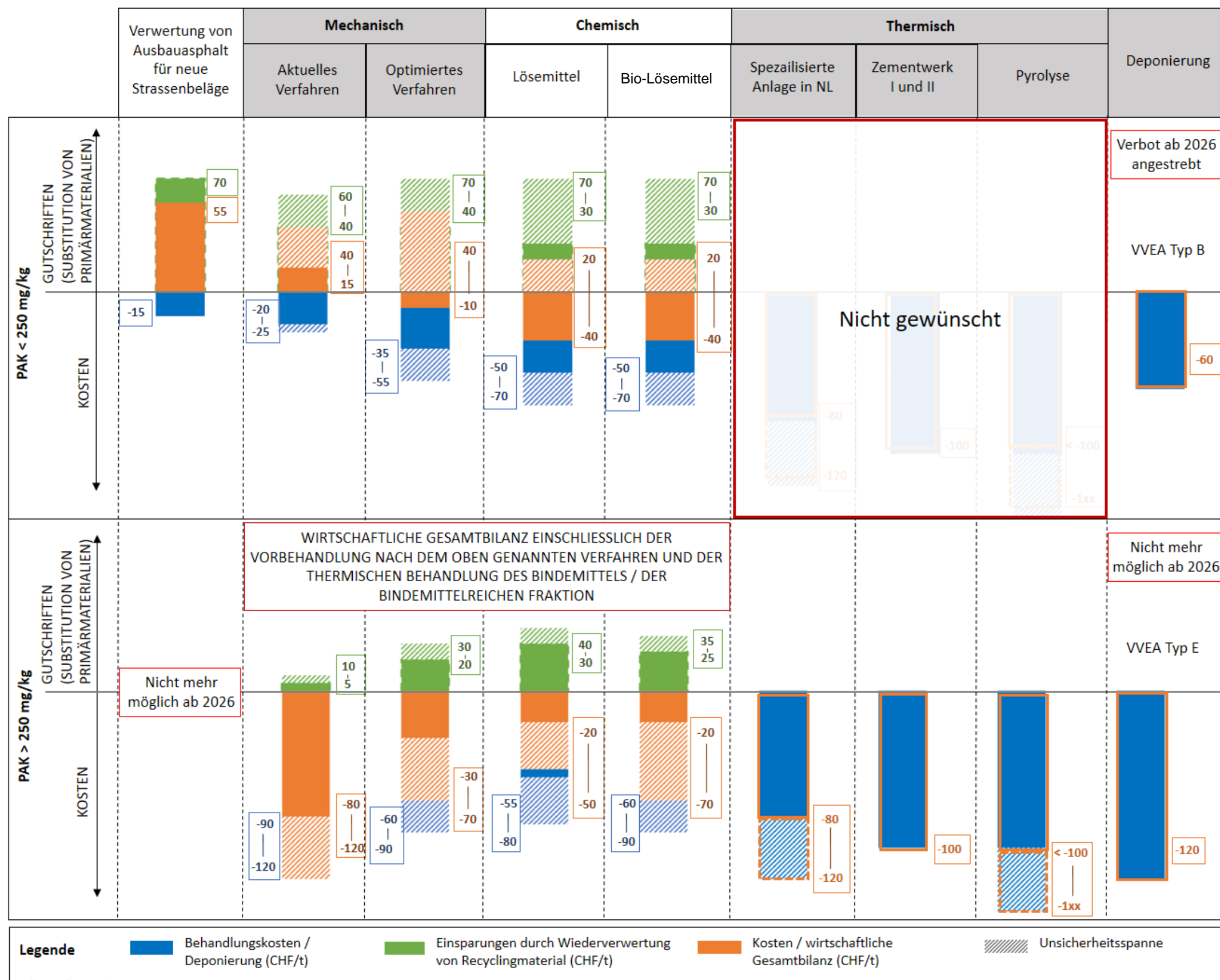


Abbildung 35: Zusammenfassung der wirtschaftlichen Bewertungen der verschiedenen Behandlungssektoren

Tabelle 26: Zusammenfassung zu den Eigenschaften der verschiedenen Behandlungskanäle

Verfahren		MECHANISCH		CHEMISCH-PHYSIKALISCH / KOMBINIERT		THERMISCH				
		Aktuelles Verfahren	Optimiertes Verfahren	Reinigung mit Lösungsmittel	Reinigung mit Bio-Lösungsmittel	Behandlung in einer spezialisierten Anlage in den Niederlanden	Behandlung in einem Zementwerk in der Schweiz		Pyrolyse	
							Aktuelle Konfiguration	Paralleler Reaktor		
Auswertung Kriterien										
Beschreibung		Mechanische Behandlung zur Trennung von Gesteinskörnungen > 8 mm von der bindemittelreichen Feinfraktion < 8 mm	Optimierte mechanische Behandlung (Hochfrequenz-Vibrationssieb) zur Abtrennung von Gesteinskörnungen > 2mm vom Bitumenmörtel < 2mm	Waschen mit Lösungsmitteln zur Trennung des Bindemittels von den Gesteinskörnungen	Waschen mit erhitztem Bio-Lösungsmittel (Pflanzenöl), um saubere Gesteinskörnungen >2mm, eine Feinfraktion und füllstoffbeladenes Bitumen zu erhalten	Thermische Behandlung (T>850°C) mit Zerstörung des Bindemittels und Rückgewinnung der mineralischen Gesteinskörnungen	Direkte Einführung in den Zementofen	Erstellung eines spezifischen Behandlungsreaktors	Thermische Behandlung in Abwesenheit von Sauerstoff (T>500°C) zur Zerstörung des PAK-haltigen Bindemittel	
Stand der Technik		✓ Industrielle Anlage - unter Optimierung	? Pilotanlage in Entwicklung (NL) - industrielle Machbarkeit muss bestätigt werden	? Pilotanlage (0.2-0.3 t/h) - industrielle Machbarkeit muss bestätigt werden	? Patent und Pilotanlage (1t/h)	✓ Industrielle Anlagen in Betrieb	? Vorhandene Anlagen - begrenzte Kapazität	? Spezifische noch zu erstellende Installation	?? Pilotanlage bisher erfolglos bei bituminösen Abfällen angewandt	
Kritische Kapazität der Anlage		50'000 - 100'000 t/ Jahr	~ 100'000 t/ Jahr	60'000 - 80'000 t/ Jahr	~50'000 t/ Jahr ? Noch festzulegen	> 500'000 t/ Jahr	Begrenzte Gesamtkapazität (~60'000 t/ Jahr für die gesamte Schweiz)	~100'000 t/ Jahr Noch festzulegen	Min. 10'000 t/ Jahr Noch festzulegen	
Geschätzte Gesteungskosten		~20 CHF/t	30 - 50 CHF/t Noch festzulegen	~ 50 - 70 CHF/t ? Noch festzulegen	~ 40 - 70 CHF/t ? Noch festzulegen	80 - 120 CHF/t	~ 100 CHF/t? Noch festzulegen		> 100 CHF/t? Noch festzulegen	
Fähigkeit, verschiedene PAK-Gehalte zu verarbeiten.	Gemeinsame Bearbeitung beider Kategorien	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	
	PAK > 250 mg/kg	Vorbehandlung vor der thermischen Behandlung				Vorbehandlung vor der thermischen Behandlung (durch integrierte Pyrolyse)	Verarbeitungskapazität prinzipiell langfristig verfügbar. Zu definierende Alternativen und Begleitmassnahmen zur Vermeidung einer ausschliesslichen Abhängigkeit	Thermische Behandlung begrenzt auf 60'000 t (Gesamtsumme) - mineralische Fraktion in Klinker eingearbeitet	Thermische Behandlung mit verändertem Mineralienanteil - mechanische Eigenschaften zu spezifizieren	Wertvolle Mineralienfraktion, mechanische Eigenschaften zu prüfen
		↙ ~ 25% Mineralische Granulate > 8mm (1% Bindemittel) VERWERTBAR ?✓	↘ ~ 75% Bindemittelreiche Fraktion < 8mm THERMISCHE BEHANDLUNG ✓	↙ ~ 65-70% Mineralische Granulate (1% Bindemittel) > 2mm VERWERTBAR ?✓	↘ ~ 30-35% Bindemittelreiche Fraktion < 2mm THERMISCHE BEHANDLUNG ✓	↙ ~ 95% Mineralische Granulate (1% Bindemittel) VERWERTBAR ?✓				
	PAK < 250 mg/kg	↙ ~ 25% Mineralische Granulate > 8mm (1% Bindemittel) VERWERTBAR ?✓	↘ ~ 75% Begrenzte Verwertung, wenn Recycling-potenzial bereits ausgeschöpft ??	↙ ~ 65-70% Mineralische Granulate >2mm VERWERTBAR ?✓	↘ ~ 30-35% Aufbereitung für die Herstellung von neuem Bindemittel (Asphaltanlagen) ??	↙ ~ 95% Mineralische Granulate (1% Bindemittel) VERWERTBAR ?✓	↘ ~ 5% Aufbereitung für Herstellung von neuem Bindemittel (Asphaltanlage) ??	↙ ~ 70-90% Mineralische Granulate > 2mm (unverändert) ✓	↘ ~ 10-30% Aufbereitung für die Herstellung von neuem Bindemittel (Asphaltanlage) ??	Nicht angebracht (ausser evtl. in Kombination mit Waschen mit Pflanzenöl)
						Nicht angebracht				

Legende	Verfahren		Verwertung der resultierenden Fraktionen	
	✓	Nachgewiesene Machbarkeit im industriellen Massstab	Derzeit etabliert	
	?	Machbarkeit im Pilotanlagenmassstab nachgewiesen / Technik in Entwicklung - Industrielle Machbarkeit muss bestätigt werden	Etabliert vorbehaltlich der Klärung bestimmter Punkte	
	??	Verfahren im Labor-/Patentstadium entwickelt - Machbarkeit im Massstab einer Pilot- und dann industriellen Anlage muss noch bestätigt werden	Durchführbar - technische Entwicklung erforderlich	

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen einer globalen Reflexion über die Bewirtschaftung bituminöser Abfälle und um auf die Entwicklung eines Kreislaufwirtschaftsmodells hinzuwirken, ist es notwendig, neue Verwertungs-/ Behandlungswege für bituminöse Abfälle einzurichten, insbesondere in Verbindung mit den beiden folgenden geplanten Entwicklungen der rechtlichen Grundlagen:

- Ab dem 1. Januar 2026 können bituminöse Abfälle mit einer PAK-Konzentration von mehr als 250 mg / kg laut VVEA nicht mehr direkt im Strassenbau verwertet oder auf Deponien gelagert werden.
- Aufgrund des Mangels an Deponievolumen in mehreren Kantonen und um das Prinzip der Kreislaufwirtschaft zu entwickeln, plant das BAFU die Deponierung von bituminösen Abfällen ab 1. Januar 2026 generell zu verbieten unabhängig von ihrem PAK-Gehalt.

Derzeit ist die einzig mögliche Behandlungsoption für Abfälle mit einem hohen PAK-Gehalt (> 1.000 mg/kg nach den derzeitigen Vorschriften; > 250 mg/kg ab 2026) die Behandlung in einer spezialisierten thermischen Anlage in den Niederlanden, um das Bindemittel und die darin enthaltenen PAK zu zerstören und die mineralischen Fraktionen zurückzugewinnen. Um nicht von einem einzigen Entsorgungsweg abhängig zu sein, muss die Thematik der Behandlung teerhaltiger Abfälle auf nationaler Ebene angegangen werden.

Bei Abfällen mit einem PAK-Gehalt unter 250 mg / kg ist das Verfahren zur Rückgewinnung von bituminösen Granulaten für den Strassenbau bereits gut etabliert, erlaubt es aber derzeit nicht, die Gesamtmenge der anfallenden Abfälle zu absorbieren (Anforderungen der Strassennormen; Technologie der Asphaltproduktionsanlagen; Praktiken und Gewohnheiten der verschiedenen Akteure im Bauwesen usw.).

Die Schätzung der zukünftigen Mengen an bituminösen Abfällen, die über den Horizont 2026 hinaus behandelt werden sollen, basiert auf den Ergebnissen der im August 2020 veröffentlichten Studie Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz“ des Büros Energie- und Ressourcen-Management GmbH. Die Ergebnissen davon sind in der folgenden Abbildung 36 dargestellt.

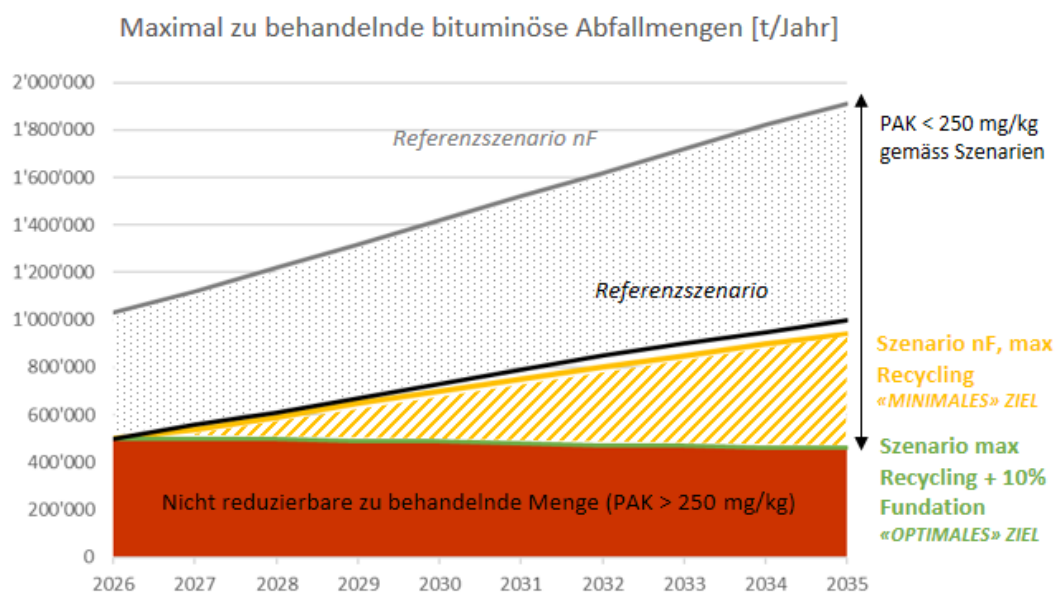


Abbildung 36: Maximale Mengen an Ausbauasphalt, die gemäss den verschiedenen Szenarien behandelt werden sollen.

Auf dieser Grundlage muss bei der Entwicklung zukünftiger Bewirtschaftungs- und Behandlungsszenarien daher unterschieden werden zwischen:

- **Kategorie mit PAK-Gehalten > 250 mg/kg**, die eine stabile Menge von rund 500'000 Tonnen pro Jahr im Jahr 2026 aufweist und bis 2035 leicht auf 460'000 t / Jahr abnimmt. Diese Mengen müssen einer thermischen Behandlung unterzogen werden. Die Behandlung kann entweder direkt oder nach einer Vorbehandlung durchgeführt werden, um die zu behandelnde Menge zu reduzieren, sofern dies umweltfreundlich und wirtschaftlich interessant ist.
- **Kategorie mit PAK-Gehalten > 250 mg/kg**, die als rezyklierte Gesteinskörnung zurückgewonnen werden können und deren Menge zwischen den verschiedenen Szenarien stark variiert. Unter diesem Gesichtspunkt ist das Szenario "max recycling, nF" ein realistisch zu erreichendes Ziel. Dieses zeigt keinen Überschuss im Jahr 2026, im Jahr 2030 eine Menge von ca. 200'000 t/Jahr und im Jahr 2035 eine Menge von ca. 500.000 t/Jahr. Wie in Kapitel 2.6.2 hervorgehoben wurde, würde eine leichte Erhöhung der Recyclingraten in den drei Deckschichten oder eine gebundene Verwertung in den Fundamenten gemäss dem Szenario "maximales Recycling + 10% Fundament" es ermöglichen, ein vollständiges Recycling dieser Fraktion zu erreichen. Für das Referenzszenario ohne Verwendung in Fundamenten (unerwünschtes Szenario), würden die Mengen dagegen bei etwa 500'000 t/Jahr im Jahr 2026 und 1'000'000 t/Jahr im Jahr 2035 liegen.

Ausserdem müssen bei der Realisierung der verschiedenen Szenarien die Unsicherheiten in Bezug auf die folgenden Elemente berücksichtigt werden:

- Überprüfung der Daten zur Verteilung zwischen den beiden PAK-Kategorien (< und > 250 mg/kg). Zum jetzigen Zeitpunkt ist es wahrscheinlich, dass ein Teil der Abfälle mit unbestimmten oder gemischten Gehalten in die Kategorie der am stärksten kontaminierten Abfälle aufgenommen wird, was zu einer Vergrösserung der Mengen mit PAK-Gehalten > 250 mg/kg führen würde.
- Daten über die Korngrössenverteilung der mineralischen Fraktionen, die in bituminösen Abfällen enthalten sind. Dieser Parameter beeinflusst die Volumenströme und das Rückgewinnungspotenzial, insbesondere bei allen nicht-thermischen Behandlungen oder Vorbehandlungen.

Die Stellung und Rolle von Behandlungsanlagen für bituminöse Abfälle muss den Grundsätzen und Zielen der Schweizer Abfallwirtschaft gegenübergestellt werden, die im USG definiert und von der VVEA umgesetzt werden:

a. *Die Erzeugung von Abfällen soll soweit möglich vermieden werden.*

- ⇒ Bei bituminösen Abfällen soll dieses Ziel durch die Entwicklung von Techniken und Materialien erreicht werden, die die Haltbarkeit der Beläge verbessern und die Erneuerungshäufigkeit der verschiedenen Schichten zeitlich strecken.

b. *Abfälle müssen soweit möglich verwertet werden.*

- ⇒ Diese in Artikel 30 des Umweltschutzgesetzes festgelegte Anforderung gilt für Ausbauasphalt mit einem PAK-Gehalt von < 250 mg/kg. Hier muss dieses Ziel zunächst durch die Rückgewinnung bituminöser Gesteinskörnungen bei der Herstellung neuer Beläge gemäss den in Kapitel 2.4 beschriebenen Elementen und Grundsätzen erreicht werden, indem Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es ermöglichen, die ehrgeizigsten Szenarien in Bezug auf die Verwertungsquoten aus Kapitel 2.6.1 zu erreichen (Entwicklung des normativen Rahmens und der Praktiken der Fachleute; technologische Entwicklung der Asphaltanlagen und der Bewirtschaftungsmethoden).

Für überschüssige Mengen, die nicht als rezyklierte Gesteinskörnungen zurückgewonnen werden, ist es wichtig, so weit wie möglich die Aufbereitungsverfahren zu bevorzugen, die es ermöglichen, die stoffliche Verwertung der verschiedenen Bestandteile der bituminösen Abfälle nach Durchlaufen der Aufbereitungsanlagen zu optimieren.

Die ökologische Optimierung dieser Prozesse muss aus einer breiteren Perspektive der Nachhaltigkeit angegangen werden, wobei neben Fragen des Ressourcen- und Abfallmanagements auch insbesondere Energie- und Klimafragen berücksichtigt werden müssen.

d. *Abfälle müssen umweltverträglich und, soweit es möglich und sinnvoll ist, im Inland entsorgt werden.*

⇒ Eine umweltverträgliche Entsorgung ist für diejenigen Mengen oder Fraktionen zu erwarten, die nach dem derzeitigen Stand der Technik und den geplanten zukünftigen Entwicklungen nicht sinnvoll verwertet werden können.

Bei mit PAK verunreinigten Gesteinskörnungen (>250 mg/kg) ist in jedem Fall mit einer Entsorgung des Bindemittels oder der bindemittelreichen Fraktion zu rechnen.

Auf dieser Grundlage können die Elemente und Grundsätze einer globalen Strategie für die Bewirtschaftung und Behandlung von Bitumenabfällen unter Berücksichtigung der ab 2026 geplanten regulatorischen Änderungen wie folgt angegeben werden.

Die **erste Priorität** ist, die Rückgewinnung der PAK-Kategorie < 250 mg/kg als rezyklierte Gesteinskörnung in den gebundenen Schichten von Strassen so weit wie möglich zu fördern, bis hin zu einem vollständigen Wiederverwertung dieser Fraktion. Auf jedem Fall sollte der nicht verwertete Überschuss gemäss dem in Kapitel 2.6.2 vorgestellten Szenario "max Recycling, nF" begrenzt werden.

Die **zweite Priorität besteht aus der Entwicklung spezifischer Behandlungskanäle auf nationalem Gebiet, die in der Lage sind, bituminöse Abfälle der PAK-Kategorie > 250 mg / kg** sowie gegebenenfalls den überschüssigen Anteil der PAK-Kategorie < 250 mg / kg zu behandeln (wenn dieser nicht im Strassenbau verwertet werden kann).

Die in dieser Studie durchgeführte Analyse zeigt, dass mechanische und chemische Behandlungen zu bevorzugende Optionen sind, sowohl für die ganzheitliche Behandlung bituminöser Abfälle der PAK-Kategorie < 250 mg / kg als auch für die Vorbehandlung der PAK-Kategorie > 250 mg / kg. Für diese zweite Kategorie, die den überwiegenden Teil der künftig zu behandelnden Abfälle ausmachen wird, bieten sie aus technischer und wirtschaftlicher Sicht eine günstigere Verwertung gegenüber einer vollständigen thermischen Behandlung.

Darüber hinaus erfordern mechanische und chemische Aufbereitungsverfahren keine sehr hohe kritische Behandlungskapazität und könnten daher als dezentrale Anlagen mit einer Mindestkapazität von etwa 50'000 bis 100'000 t/Jahr pro Anlage realisiert werden. Schweizweit wären etwa zehn solcher Installationen erforderlich.

Die Entwicklung dieser mechanischen und chemischen Kanäle würde somit eine Alternative zum Export von Abfällen der PAK-Kategorie > 250 mg / kg in eine spezialisierte Behandlungsanlage in den Niederlanden darstellen, die für die zukünftige Bewirtschaftung weiterhin in Betracht gezogen werden muss. Dennoch wäre es wünschenswert, sich aus der kompletten Abhängigkeit etwas befreien zu können.

Die thermische Behandlung in Zementwerken hat in der derzeitigen Konfiguration der Anlagen eine sehr begrenzte Kapazität (ca. 60'000 t/Jahr für die gesamte Schweiz), und das Interesse, parallele Reaktoren speziell für diese Art von Abfällen einzusetzen, muss noch ermittelt werden, insbesondere da die geschätzten Behandlungskosten wahrscheinlich höher sind als die Kosten für die mechanischen und chemischen Behandlungsverfahren.

Die Behandlung in Zementwerken bleibt jedoch eine interessante Option für die thermische Behandlung des Bindemittels bzw. der bindemittelreichen Feinfraktion der PAK-Kategorie > 250 mg/kg aus der mechanischen und chemischen Vorbehandlung, deren Menge je nach Effizienz und Eigenschaften der Vorbehandlung auf 30'000 bis 170'000 t/Jahr geschätzt wird.

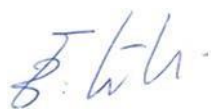
Die mechanischen und chemischen Behandlungsprozesse befinden sich jedoch noch in der Entwicklung oder Optimierung. Die Zeit, die bis zum Inkrafttreten der von der VVEA geplanten Änderungen im Jahr 2026 zur Verfügung steht, kann es ermöglichen, die Machbarkeit dieser Methoden im industriellen

Massstab zu bestätigen und die Prozesse sowie die Verwertungsmöglichkeiten der verschiedenen aus der Behandlung resultierenden Fraktionen zu optimieren.

Für die **mechanische Aufbereitung** soll geprüft werden, ob der derzeitige Stand der Technik zur Trennung von mineralischen Gesteinskörnungen bis zu einem Mindestdurchmesser von 8 mm durch eine Absenkung der Mindestkorngrösse auf 2 mm optimiert werden kann, um die Möglichkeiten zur Aufwertung der bindemittelreichen Feinfraktion als Bestandteil eines neu gebildeten Bindemittels durch technologische Anpassungen zu erweitern.

Für die **chemisch-physikalisch oder kombinierte Behandlung**, die derzeit im Forschungsstadium oder in Pilotanlagen mit geringer Kapazität entwickelt werden, ist das Ziel, sie in einer Pilotanlage im industriellen Massstab umzusetzen. Dadurch wird es eventuell möglich, die betriebliche und wirtschaftliche Durchführbarkeit zu bestätigen, die technische und ökologische Qualität der resultierenden Produkte zu validieren und die Einhaltung der Umweltvorschriften zu bewerten.

CSD INGENIEURE AG



Eric Säuberli
Niederlassungsleiter



pp. Alexander Flacher
«Waste to energy» manager

Genf, 15. Februar 2021

Weitere Mitwirkende an der Studie:

- *Johanna Fernandez, Umweltingenieurin, EPFL*
- *Milena Kessler, Umweltingenieurin, ETH Zürich*
- *Cédric Egolf, Bauingenieur, EPFL-Diplom*
- *Antoine Indaco, Leiter des Bereichs Abfall und Deponierung*

6 Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Asphaltverband, „Wiederverwenden von Asphalt“, Bonn, 2014.
- [2] EU-Recycling, „Teerhaltiger Straßenaufbruch wird in Deutschland zum Problem“, 2017.
- [3] Arbeitsgruppe der Umweltallianz Sachsen unter Federführung der IHK Chemnitz, „Wiederverwendung und Verwertung von Ausbauasphalt, Leitfaden Stand 2020“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 2020.
- [4] N. Büche und S. Nibuxs, *Augmentation de la teneur en fraisat dans les enrobés bitumineux*, Lausanne: Conférence Journée d'Etude de la Route et des Infrastructures, 2018.
- [5] Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, „Asphalt Recycling: Situation in Österreich“, Wien, 2020.
- [6] Bouwend Nederland Vakgroep Bitumineuze Werken, „Asphalt Recycling in den Niederlanden“, Zoetermeer, 2020.
- [7] BAM Infra Asphalt (Rien Huurman), *Asphalt legal regulations in the Netherlands*, Culemborg, 2020.
- [8] European Asphalt Pavement Association, „Asphalt in Figures“, Brüssel, 2018.
- [9] European Asphalt Pavement Association EAPA, „Asphalt and Circular Economy“, EAPA, 2020. [Online]. Available: <https://eapa.org/recycling>. [Zugriff am 11.12.2020].
- [10] D. Sandra, „Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung“, Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute VSS, Schlieren, 2013.
- [11] D. Heijkoop, „Thermische Verwertung von teerhaltigem Asphalt“, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2017.
- [12] BAM Infra Asphalt, „LE2AP Low Emission Asphalt Pavement“, BAM Infra Asphalt, Culemborg.
- [13] IMP Bautest AG, „Schlussbericht: Wiederverwendung von Gesteinskörnungen aus thermisch behandeltem Asphalt“, Oberbuchsitzen, 2016.
- [14] REKO B.V., „Präsentation REKO“, Rotterdam, 2020.
- [15] Baunetzwerk, „Zweite Aufbereitungsanlage für Teer“, 22.04.2020. [Online]. Available: <https://www.baunetzwerk.biz/zweite-aufbereitungsanlage-fuer-teer>. [Zugriff am 24.11.2020].
- [16] Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, „Konsequenzen verschiedener Verwertungsoptionen für teerhaltigen Strassenaufbruch“, Rhein-Main Umwelt GmbH, Würzburg, 2019.
- [17] Kooship GMBH, „Asphalttransport NL - CH“, Gummersbach, 2020.
- [18] ATM Entsorgung Deutschland GmbH, *Telefonat M. Hennes*, 2020.
- [19] Contargo GmbH & Co. KG, „Kleinwasser“, Contargo GmbH & Co. KG, 07.2017. [Online]. Available: https://www.contargo.net/assets/pdf/Kleinwasser_Info-2017-DE.pdf. [Zugriff am 05.12.2020].

- [20] Hannoversche Allgemeine Zeitung, „Rhein-Pegel so niedrig wie seit Jahrzehnten nicht,“ Hannover, 2018.
- [21] R. R. A. Oliver Mickley, Interviewee, *Asphalttransport von der Schweiz in die Niederlande*. [Interview]. 04 11 2020.
- [22] World Meteorological Organization , „WMO climate statement: past 4 years warmest on record,“ World Meteorological Organization , 29 11 2018. [Online]. Available: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-climate-statement-past-4-years-warmest-record>. [Zugriff am 11 12 2020].
- [23] F. Knappe und J. Reinhardt, „Entsorgung von teerhaltigem Straßenaufbruch aus ökologischer Sicht,“ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, 2017.
- [24] Solenia, „Energetical Value of Milled Asphalt Bitumen“.
- [25] U. Neumann, „Nachhaltiges Recycling von PAK-haltigem Straßenaufbruch,“ TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2017.
- [26] HEMO GmbH, „HEMO Reinigungstechnologien,“ Hemo GmbH, [Online]. Available: <https://hemo-gmbh.de/technologien.php>. [Zugriff am 03 12 2020].
- [27] HEMO Recycling AG, „ARCA: AsphaltReCyclingAnlage,“ Ötisheim, 2020.
- [28] R. Koppmann, *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*, Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [29] Bundesamt für Umwelt BAFU, „VOC-Lenkungsabgabe,“ 20 08 2020. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/massnahmen-zur-luftreinhaltung/voc-lenkungsabgabe.html>. [Zugriff am 04 12 2020].
- [30] D. (. V. 2. a. A. d. S. V. d. S.-. u. Verkehrsfachleute, „Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans les enrobés à chaud : EP3 - Evaluation du flux de matière ainsi que de la durabilité,“ November 2013.
- [31] Deutscher Asphaltverband, „Asphalt Recycling Stand 2019 in Deutschland,“ Bonn, 2020.
- [32] R. Plass, „REKO: Thermische Verwertung von teerhaltigem Asphalt,“ Rotterdam, 2020.
- [33] M. Zaumanis, M. Arragada, S. Wyss, K. Zeyer, M. Cavalli und L. Poulikakos, „Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator,“ *Journal of Cleaner Production* 237, 2019.
- [34] R. C. West und A. Copeland, „High RAP Asphalt Pavements: Japan Practica - Lessons Learnt,“ National Asphalt Pavement Association, Lanham, 2015.
- [35] Straßen.NRW, „Verwertung teer-/pechhaltiger Ausbaustoffe in NRW,“ Willingen, 2019.
- [36] ATM Renewi, *Telefonat K. De Ridder*, 2020.
- [37] BAM Infra BV, „Towards sustainable horizontal asphalt recycling,“ Utrecht, 2016.
- [38] H. R. A. Werner Jost, Interviewee, *ARCA Reinigungsverfahren*. [Interview]. 21 09 2020.
- [39] Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, „Asphalt Recycling: Situation in Österreich,“ Wien, 2020.
- [40] A. S. REMEX Recycling, Interviewee, *Deponierung von Asphalt in Deutschland*. [Interview]. 24 11 2020.

- [41] R. Huurman und J. Qiu, Interviewees, *BAM Infra Asphalt: Dutch asphalt producers*. [Interview]. 13 10 2020.
- [42] Weltgesundheitsorganisation, „WHO Leitlinien für Innenraumluftqualität: ausgewählte Schadstoffe“, Kopenhagen, 2011.
- [43] FLB Lieferbeton GmbH & Co. KG, „KWZ-Erläuterungen“, 10 11 2017. [Online]. Available: <http://www.flb-frankfurt.de/files/kwzdok.pdf>. [Zugriff am 05 12 2020].
- [44] M. Mauermann, „Havarien auf dem Rhein“, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) , Mainz, 2017.
- [45] E.-. u. R.-M. G. (M.Rubli), *Modélisation des flux de bitume en Suisse*, 2020.
- [46] O. f. d. l'environnement, *Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. L'environnement pratique n° 3106.*, Berne, 2006.
- [47] B. f. S. ASTRA, *Fachhandbuch Trasee / Umwelt (FHB T/U)*, 2020.
- [48] Nibuxy Sàrl, „Augmentation de la teneur en fraisat dans les enrobés bitumineux“, in *Journée d'Etude de la Route et des Infrastructures*, 2018.
- [49] C. d. Valais, *Guide technique d'application pour l'utilisation de matériaux minéraux de recyclage*, 2016.
- [50] L. Poulikakos, M. Zaumanis, M. C. Cavalli, M. M. Fernandez und N. Heeb, „Sustainable fully recycled asphalt concrete“, EMPA, Dübendorf, 2018.
- [51] ASTRA, „Häufige Fragen“, Bundesamt für Strassen ASTRA, [Online]. Available: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/wissenswertes/haeufige-fragen.html>. [Zugriff am 09 12 2020].
- [52] Bundesamt für Umwelt (BAFU) , „Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle“, BAFU, Bern, 2006.
- [53] REKO BV, „Telefonkonferenz mit David Heijkoop und Remco Plass“, Zürich / Rotterdam, 2020.
- [54] M. Mauermann und Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), Interviewees, *Anfrage Pegelstände Maxau und Kaub*. [Interview]. 04 12 2020.

Anhang A Liste der kontaktierten Unternehmer

Name
Schweiz
Dach-/Berufsverbände
Asphaltsuisse
ASR/ARV
Behörden
Etat de Genève - Service de géologie, sols et déchets
Canton de Vaud - Division géologie, sol et déchets
Tiefbauamt Zürich
Forschungsinstitute/Hochschulen/Universitäten
Hochschule für Technik Rapperswil
EMPA
Berner Fachhochschule
Privatunternehmen
Eberhard
GIPO AG
Ammann
Walo Bertschinger AG
Implenia
Colas
WMA Transport AG
Habö SA
BHZ
REMEX Recycling AG
Holcim AG
Jura Cement

Name
Europa
Dach-/Berufsverbände
Eurobitume
European asphalt pavement association
Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM)
Deutscher Asphaltverband
Österreichischer Baustoff-Recycling Verband
Bouwend Nederland Vakgroep Bitumineuze Werken
Forschungsinstitute/Hochschulen/Universitäten
Institut für Energie- und Umweltforschung
Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)
Privatunternehmen
HEMO Recycling AG
REKO
ATM Renewi
BAM Infra Asphalt LE2AP (Pays Bas)
Jansen Recycling
VBW-Asphalt
SITEB
Theo Pouw
ATM Entsorgung Deutschland GmbH
Koozand B.V.

Anhang B Schätzung der zu behandelnden Abfallmengen pro Kanton

	Canton	Masse d'asphalte [t]	Pourcentage	Année	SZ Referenz [kt/an]		SZ Ref, nF [kt/an]		SZ nF, max REC [kt/an]		SZ Max Recycling + 15% Fund [kt/an]	
					HAP > 250	HAP < 250	HAP > 250	HAP < 250	HAP > 250	HAP < 250	HAP > 250	HAP < 250
1	Zürich	16'984'750	10.3%	2026	51'537	0	51'537	53'599	51'537	0	52'568	0
				2035	47'414	55'660	47'414	149'459	47'414	49'476	50'507	0
2	Bern	25'060'669	15.2%	2026	76'042	0	76'042	79'084	76'042	0	77'563	0
				2035	69'959	82'126	69'959	220'523	69'959	73'001	74'522	0
3	Luzern	7'613'147	4.6%	2026	23'101	0	23'101	24'025	23'101	0	23'563	0
				2035	21'253	24'949	21'253	66'992	21'253	22'177	22'639	0
4	Uri	1'259'406	0.8%	2026	3'821	0	3'821	3'974	3'821	0	3'898	0
				2035	3'516	4'127	3'516	11'082	3'516	3'669	3'745	0
5	Schwyz	2'381'149	1.4%	2026	7'225	0	7'225	7'514	7'225	0	7'370	0
				2035	6'647	7'803	6'647	20'953	6'647	6'936	7'081	0
6	Obwalden	1'315'948	0.8%	2026	3'993	0	3'993	4'153	3'993	0	4'073	0
				2035	3'674	4'312	3'674	11'580	3'674	3'833	3'913	0
7	Nidwalden	736'145	0.4%	2026	2'234	0	2'234	2'323	2'234	0	2'278	0
				2035	2'055	2'412	2'055	6'478	2'055	2'144	2'189	0
8	Glarus	1'042'096	0.6%	2026	3'162	0	3'162	3'289	3'162	0	3'225	0
				2035	2'909	3'415	2'909	9'170	2'909	3'036	3'099	0
9	Zug	1'352'921	0.8%	2026	4'105	0	4'105	4'269	4'105	0	4'187	0
				2035	3'777	4'434	3'777	11'905	3'777	3'941	4'023	0
10	Fribourg	8'008'534	4.9%	2026	24'301	0	24'301	25'273	24'301	0	24'787	0
				2035	22'357	26'245	22'357	70'472	22'357	23'329	23'815	0
11	Solothurn	5'687'299	3.5%	2026	17'257	0	17'257	17'947	17'257	0	17'602	0
				2035	15'877	18'638	15'877	50'046	15'877	16'567	16'912	0
12	Basel-Stadt	932'203	0.6%	2026	2'829	0	2'829	2'942	2'829	0	2'885	0
				2035	2'602	3'055	2'602	8'203	2'602	2'715	2'772	0
13	Basel-Landschaft	4'640'283	2.8%	2026	14'080	0	14'080	14'643	14'080	0	14'362	0
				2035	12'954	15'207	12'954	40'833	12'954	13'517	13'799	0
14	Schaffhausen	2'804'717	1.7%	2026	8'510	0	8'510	8'851	8'510	0	8'681	0
				2035	7'830	9'191	7'830	24'680	7'830	8'170	8'340	0
15	Appenzell Ausserrhoden	927'557	0.6%	2026	2'815	0	2'815	2'927	2'815	0	2'871	0
				2035	2'589	3'040	2'589	8'162	2'589	2'702	2'758	0
16	Appenzell Innerrhoden	322'568	0.2%	2026	979	0	979	1'018	979	0	998	0
				2035	900	1'057	900	2'838	900	940	959	0
17	St. Gallen	7'580'533	4.6%	2026	23'002	0	23'002	23'922	23'002	0	23'462	0
				2035	21'162	24'842	21'162	66'705	21'162	22'082	22'542	0
18	Graubünden	8'952'277	5.4%	2026	27'164	0	27'164	28'251	27'164	0	27'708	0
				2035	24'991	29'337	24'991	78'776	24'991	26'078	26'621	0
19	Aargau	12'650'126	7.7%	2026	38'385	0	38'385	39'920	38'385	0	39'152	0
				2035	35'314	41'456	35'314	111'316	35'314	36'849	37'617	0
20	Thurgau	7'011'700	4.3%	2026	21'276	0	21'276	22'127	21'276	0	21'701	0
				2035	19'574	22'978	19'574	61'700	19'574	20'425	20'850	0
21	Ticino	8'109'711	4.9%	2026	24'608	0	24'608	25'592	24'608	0	25'100	0
				2035	22'639	26'576	22'639	71'362	22'639	23'623	24'115	0
22	Vaud	17'952'567	10.9%	2026	54'474	0	54'474	56'653	54'474	0	55'564	0
				2035	50'116	58'832	50'116	157'975	50'116	52'295	53'385	0
23	Valais	10'190'069	6.2%	2026	30'920	0	30'920	32'157	30'920	0	31'538	0
				2035	28'446	33'394	28'446	89'668	28'446	29'683	30'302	0
24	Neuchâtel	4'308'630	2.6%	2026	13'074	0	13'074	13'597	13'074	0	13'335	0
				2035	12'028	14'120	12'028	37'914	12'028	12'551	12'812	0
25	Genève	3'323'885	2.0%	2026	10'086	0	10'086	10'489	10'086	0	10'288	0
				2035	9'279	10'893	9'279	29'249	9'279	9'682	9'884	0
26	Jura	3'631'787	2.2%	2026	11'020	0	11'020	11'461	11'020	0	11'240	0
				2035	10'138	11'902	10'138	31'958	10'138	10'579	10'800	0
	Total Suisse	164'780'677		2026	500'000	0	500'000	520'000	500'000	0	510'000	0
				2035	460'000	540'000	460'000	1'450'000	460'000	480'000	490'000	0

Anhang C Wirtschaftliche Übersichtstabelle

Anhang C.1 Geschätzte wirtschaftliche Bewertung - Mechanische Behandlung

Mechanische Behandlung									
		PAK < 250 mg/kg				PAK > 250 mg/kg			
		Aktuelles Verfahren (> 8mm)		Optimiertes Verfahren (> 2mm)		Aktuelles Verfahren (> 8mm)		Optimiertes Verfahren (> 2mm)	
A Behandlungsanlage									
Investitionen		15 - 18 MIO CHF		25 - 35 MIO CHF (?)		15 - 18 MIO CHF		25 - 35 MIO CHF (?)	
Berücksichtigte Kapazität		200'000 t/Jahr		200'000 t/Jahr		200'000 t/Jahr		200'000 t/Jahr	
Geschätzte Gesteungskosten		15 - 20 CHF/t		30 - 50 CHF/t		15 - 20 CHF/t		30 - 40 CHF/t	
davon Fixkosten inkl. Amortisation		75%		75%		75%		75%	
davon variable Kosten		25%		25%		25%		25%	
B Aufbereitung / Behandlung / Entsorgung von Behandlungsfractionen									
	Kosten CHF / t	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input
B1 Rückgewinnung von Feinfraktion, Kies/Sand + Bindemittel und Verwertung im Strassenbau	3 - 5	75% - 80%	2 - 4	30% - 35%	1 - 2				
B2 Thermische Behandlung der mit PAK kontaminierten bindemittelreichen Feinfraktion	100 - 120					75% - 80%	75 - 96	30% - 35%	30 - 42
B3 Elimination des Schlamms	100 - 120	1%	1	1%	1	1%	1	1%	1
GESAMTE BEHANDLUNGSKOSTEN		20 - 25 CHF/t		35 - 55 CHF/t		90 - 120 CHF/t		60 - 90 CHF/t	
C Umsatzerlöse - Verkauf von Sekundärmaterialien / Substitution von Primärmaterialien									
	Valeur CHF / t	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input
C1 Mineralische Granulate	30 - 40	20% - 25%	6 - 10	65% - 70%	20 - 28	20% - 25%	6 - 10	65% - 70%	20 - 28
C2 Kies/Sand/Füllstoff/Binder-Fraktion	40 - 70	75% - 80%	30 - 50						
C3 Bindemittelreicher Sand/Füllstoffanteil	70 - 120			30% - 35%	21 - 42				
GESAMTE EINNAHMEN		40 - 60 CHF/t		40 - 70 CHF/t		6 - 10 CHF/t		20 - 30 CHF/t	
GESAMTWIRTSCHAFTLICHE BILANZ		15 - 40 CHF/t		-10 - 40 CHF/t		-110 - -80 CHF/t		-70 - -30 CHF/t	

Anhang C.2 Geschätzte wirtschaftliche Bewertung - Chemische / kombinierte Behandlung

Chemische / kombinierte Behandlung									
	Behandlung mit Lösemitteln				Behandlung mit Pflanzenöl				
	PAK < 250 mg/kg		PAK > 250 mg/kg		PAK < 250 mg/kg		PAK > 250 mg/kg		
A Behandlungsanlage									
Investitionen	16 MIO CHF (?)				15 - 30 MIO CHF (??)				
Berücksichtigte Kapazität	50'000 t/Jahr				50-100'000 t/Jahr				
Geschätzte Gesteungskosten	50 - 70 CHF/t				50 - 70 CHF/t (?)				
davon Fixkosten inkl. Amortisation	75%				75% (?)				
davon variable Kosten	25%				25% (?)				
B Aufbereitung / Behandlung / Entsorgung von Behandlungsfractionen									
	Kosten CHF / t	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Kosten CHF / t zu behandelner Input
B1 Thermische Behandlung der mit PAK kontaminierten bindemittelreichen Feinfraktion	100 - 120			5% - 10%	5 - 12			10% - 20%	10 - 24
GESAMTE BEHANDLUNGSKOSTEN		50 - 70 CHF/t		55 - 80 CHF/t		50 - 70 CHF/t		60 - 90 CHF/t	
C Umsatzerlöse - Verkauf von Sekundärmaterialien / Substitution von Primärmaterialien									
	Wert CHF / t	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input	% betroffener Massenanteil	Wert CHF / t zu behandelner Input
C1 Mineralische Granulate	30 - 40	90% - 95%	27 - 38	90% - 95%	27 - 38	90% - 95%	27 - 38	80% - 90%	24 - 36
C2 Bindemittel oder bindemittelreiche Fraktion	120 - 300	5% - 10%	6 - 30			5% - 10%	6 - 30		
GESAMTE EINNAHMEN		30 - 70 CHF/t		30 - 40 CHF/t		30 - 70 CHF/t		25 - 35 CHF/t	
GESAMTWIRTSCHAFTLICHE BILANZ		-40 - -20 CHF/t		-50 - -20 CHF/t		-40 - -20 CHF/t		-70 - -20 CHF/t	