

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

**Modellierung der Asphaltflüsse
in der Schweiz**

Schlussbericht

August 2020

Energie- und Ressourcen-Management GmbH

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU 3003 Bern
Begleitung BAFU	Clara-Marine Pellet und Dr. David Hiltbrunner
Auftragnehmer	Energie- und Ressourcen-Management GmbH Wolleraustrasse 15g 8807 Freienbach Tel. +41 44 371 40 90 Fax +41 44 371 40 04 info@energie-ressourcen.ch www.energie-ressourcen.ch
Autor	Dr. Stefan Rubli
Zeitraum	Mai 2020 bis August 2020
Hinweis	Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

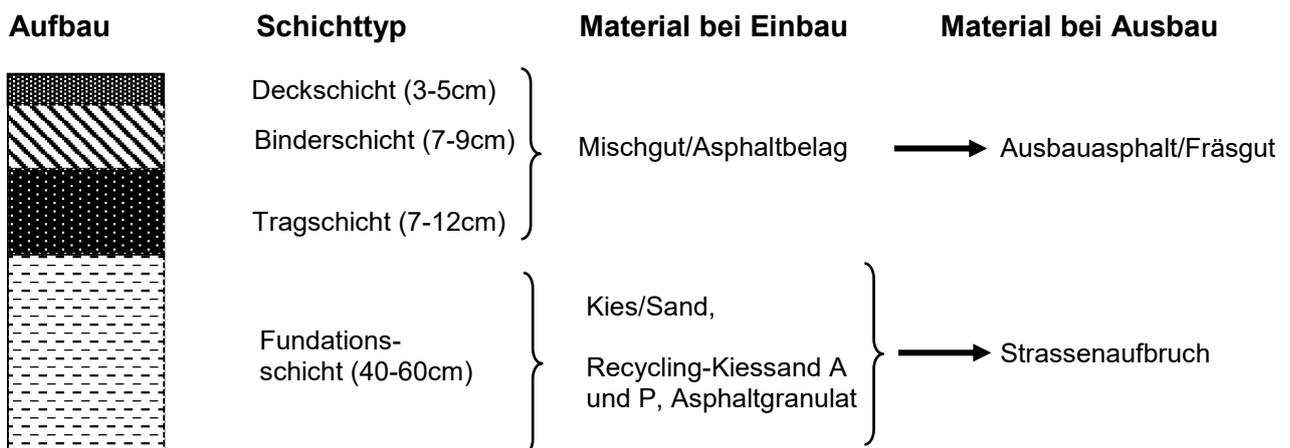
INHALTSVERZEICHNIS

1	Ausgangslage und Zielsetzung	7
1.1	<i>Ausgangslage</i>	7
1.2	<i>Zielsetzung und Fragestellung</i>	8
2	Entsorgungswege und Materialflüsse im Bezugsjahr 2018	9
2.1	<i>Anfall von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten <250 ppm in die Verwertung</i>	9
2.2	<i>Ausbauasphaltmengen mit PAK-Gehalten >250 ppm gemäss Sonderabfallstatistik</i>	10
2.3	<i>Einsatzgebiete von aufbereiteten Asphaltgranulaten</i>	10
2.4	<i>Materialbilanz und Entsorgungswege Bezugsjahr 2018</i>	11
3	Modellgrundlagen und -aufbau	13
3.1	<i>Systembeschreibung</i>	13
3.2	<i>Modellierung des Materiallagers im Prozess «STRASSEN»</i>	14
3.3	<i>Parametrisierung des Modells hinsichtlich der Entwicklung der Materialflüsse</i>	16
3.4	<i>Kalibrierung des Modells anhand des Szenarios «REFERENZ»</i>	18
3.5	<i>Definition und Beschreibung von vier Szenarien</i>	19
4	Resultate	23
4.1	<i>Resultate Szenario REFERENZ (SZ Ref)</i>	23
4.2	<i>Lagerentwicklung Asphaltbelag</i>	25
4.3	<i>Entwicklung der Outputflüsse aus den Strassen</i>	26
4.4	<i>Materialflüsse in die Aufbereitung/Behandlung/Deponien im Szenario REFERENZ</i>	27
4.5	<i>Vergleich der Resultate aus den Szenarienrechnungen</i>	30
5	Diskussion	32
5.1	<i>Modellentwicklung, Möglichkeiten der Anwendung und Systemverständnis</i>	32
5.2	<i>Erkenntnisse aus der Modellierung der vier Szenarien</i>	32
5.3	<i>Schlussfolgerungen</i>	34
6	Literaturverzeichnis	35
7	Anhang	36

Wichtige Abkürzungen/Definitionen

ACF	Heissmischfundationsschicht - Die ACF ist das Mischgut, welches direkt auf den Untergrund aufgetragen wird. Sie unterscheidet sich nur durch zwei verschiedene Körnungen (22 und 32mm).
ASTRA	Bundesamt für Strassen
Aufbereitung	Mechanische Aufbereitung von Ausbauasphalt
BAFU	Bundesamt für Umwelt
Behandlung	Thermische oder chemisch-physikalische Behandlung von Ausbauasphalt
KMF	Kaltmischfundationsschicht – KMF ist das Mischgut, welches als Kofferersatz eingesetzt wird.
Materiallager	In den Strassen gelagerte Materialien (gemäss Abbildung unten).
MFA	Materialflussanalyse
Mio.	Millionen
m ³	Kubikmeter: Alle Angaben in m ³ beziehen sich auf das Festmass!
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
ppm	parts per million → entspricht einem Gehalte von 1 mg/kg
PAK <250 ppm	Asphaltbelag mit PAK-Gehalt kleiner 250 ppm (bzw. mg/kg)
PAK >250 ppm	Asphaltbelag mit PAK-Gehalt grösser 250 ppm (bzw. mg/kg)
RC	Recycling
Recyclingkiessand A	RC-Kiessand A
Schottertränkung	Schotterschicht mit bituminösem Bindemittel (früher oft stark teerhaltig) als Tragschicht in älteren Strassen.
SFA	Stoffflussanalyse
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen

Schematischer Aufbau des Strassenoberbaus



Bemerkung: Beim Neubau und bei der Erneuerung von Strassen kann ein Teil der Fundamentalschicht 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.

ZUSAMMENFASSUNG

Ausbauasphalt und Fräsgut sind hochwertige Materialien, welche nicht in die Deponien gehören! Aufgrund der früher eingesetzten teerhaltigen Bindemittel liegen jedoch noch beträchtliche Mengen an Asphalt in unseren Strassen, welche mit PAK belastet sind. Gemäss Artikel 20 der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) darf Ausbauasphalt mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250ppm weder stofflich verwertet noch deponiert werden. Allerdings bestehen Übergangsbestimmungen, welche eine Verwertung bis zum 31.12. 2025 unter gewissen Voraussetzungen erlauben und die Ablagerung in Deponien des Typs E zulassen. Zudem wird darüber nachgedacht, die Deponierung des Ausbauasphalts mit einem PAK-Gehalt bis zu 250 ppm ebenfalls zu verbieten. Auch der Einsatz von Recyclingkiessand A (RC-Kiessand A) könnte künftig nicht mehr zugelassen werden, da heute bei der Herstellung dieses Produkts oftmals primärer Kiessand beigemischt wird.

Deponieverbote und Einschränkungen bei der Verwertung haben einen grossen Einfluss auf das Materialmanagement von Asphalt. Es stellt sich deshalb die Frage, ob, beziehungsweise unter welchen Voraussetzungen, ein nachhaltiger Materialkreislauf beim Asphalt zu erreichen ist. Um diese Fragestellung zu bearbeiten, wurde ein bestehendes Modell, welches die Kantone St. Gallen, Thurgau, Zürich und das Fürstentum Liechtenstein entwickeln liessen (Rubli 2013), ausgebaut, um es für die Ebene Schweiz einzusetzen. In Zusammenarbeit mit dem BAFU wurden vier Szenarien definiert und bis zum Jahr 2035 modelliert. Sie dienen dazu, die Auswirkungen von Massnahmen wie Deponierungsverbote, Verbot des Einsatzes von Kiessand A usw. zu untersuchen. Zudem wird analysiert, welchen Einfluss die Realisierung von thermischen oder chemisch-physikalischen Behandlungsverfahren in der Schweiz oder im Ausland auf den Materialkreislauf haben könnte. Die zeitliche Dynamik der Materiallager und -flüsse spielt bei der Bewirtschaftung des Asphalts in den Strassen eine entscheidende Rolle. Insbesondere deshalb, weil der Asphaltbelag über Jahrzehnte (je nach Schicht 30 - 60 Jahre) im Strassenkörper verbleibt. Deshalb werden die Materiallager und -flüsse für den Zeitraum 1960 bis 2035 modelliert.

Die Modellierung der vier Szenarien ergaben die folgenden Erkenntnisse:

1. Entwicklung des Asphaltlagers in den Strassen bestimmt die Entwicklung der Outputflüsse
Das Asphaltlager in den Strassen ist zwischen 1960 und 2020 um 230 Millionen Tonnen angewachsen, was einem mittleren jährlichen Wachstum von 3.8 Mio. Tonnen entspricht. Die Outputflüsse werden deshalb in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen.
2. Asphaltbedarf entwickelt sich konstant oder nimmt leicht ab
Der Asphaltbedarf bewegte sich im Zeitraum 2010 – 2019 im Bereich von 4.7 bis 5.3 Mio. Tonnen pro Jahr. Im Modell reduziert sich der Asphaltbedarf bis 2035 bis auf 4.8 Mio. Tonnen pro Jahr leicht, weil künftig eine Verdichtung nach Innen bei der Siedlungsentwicklung stattfinden wird und deshalb weniger Gemeindestrassen und Wege gebaut werden müssen.
⇒ Der abnehmende Asphaltbedarf bei gleichzeitig zunehmenden Outputflüssen wird dazu führen, dass künftig mehr Ausbauasphalt deponiert werden muss, falls keine weiteren Massnahmen ergriffen werden. Das Szenario «REFERENZ» ergibt einen Anstieg des Materialflusses in die Deponien von rund 540'000 t/a bis ins Jahr 2035.

3. Einsatz von Asphaltgranulaten in loser und gebundener Form in der Foundation

Die Entsorgungsstrategie, Asphaltgranulate vermehrt in loser oder gebundener Form in der Foundation einzusetzen, ist nicht nachhaltig. Sie bringt zwar eine unmittelbare Entlastung, das Problem wird jedoch auf künftige Generationen verschoben. Die Verwertung von Asphaltgranulaten in gebundener Form als Kalt- (KMF) oder Heissmischfundation (ACF), findet vor allem bei Sanierungen von National- und Kantonsstrassen statt und erreicht heute einen Umfang von geschätzten 600'000 Tonnen pro Jahr. Beim nächsten Sanierungszyklus würde jedoch eine entsprechend höhere Ausbauasphaltmenge anfallen. Wird der Einsatz von lose und gebundenem Asphaltgranulaten in der Foundation unterbunden, steigt der Materialfluss in die Deponie gemäss der Szenariorechnung bis zum Jahr 2035 auf knapp 1.47 Mio. Tonnen pro Jahr an. Würde nur der Einsatz in loser Form verboten, läge der Materialflusses in die Deponien im Jahr 2035 bei knapp 1.0 Million Tonnen pro Jahr.

4. Höhere RC-Anteile in der Mischgutproduktion

Höhere als in den Normen vorgegebene RC-Anteile in der Asphaltproduktion würden zu einer deutlichen Verbesserung der Verwertungssituation von Ausbauasphalt führen. Dies zeigt das Resultat eines weiteren Szenarios. Zwar müssen auch bei diesem Szenario bis zum Jahr 2035 knapp 500'000 Tonnen Ausbauasphalt pro Jahr abgelagert werden. Dies jedoch unter der Voraussetzung, dass keine Asphaltgranulate in die Foundation gelangen. Falls der gebundene Einsatz in der Foundation weiterhin erlaubt wäre, müsste wohl kein Ausbauasphalt deponiert werden.

5. Realisierung von Behandlungsverfahren

Mit der Realisierung von Behandlungsverfahren ist ein nachhaltiger Materialkreislauf möglich. Dies zeigt eine weitere Szenariorechnung. Bei einem Deponieverbot für Ausbauasphalt und einem gleichzeitigen Verbot des Einsatzes von Asphaltgranulaten in der Foundation, müssten bis zum Jahr 2035 Behandlungskapazitäten von insgesamt rund 1.2 Millionen Tonnen pro Jahr zur Verfügung stehen. Wird der gebundene Einsatz von Asphaltgranulaten in der Foundation weiterhin erlaubt, reduziert sich die notwendige Behandlungskapazität um rund die Hälfte auf geschätzte 0.6 Mio. Tonnen pro Jahr.

Die verschiedenen Szenarien zeigen, dass ein nachhaltiger Materialkreislauf nur mit einer Erhöhung der RC-Anteile in der Asphaltproduktion, verbunden mit der Realisierung von thermischen oder chemisch-physikalischen Behandlungsverfahren, zu erreichen ist. Mit dem Deponieverbot ab 2026 dürften sich die Wirtschaftlichkeitskriterien für Behandlungsanlagen im positiven Sinn verbessern. Gelingt es, den Ausbauasphalt so zu behandeln, dass das Bitumen wieder stofflich verwertet werden kann, wird gar die Behandlung von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten <250ppm interessant.

Der Strassenbau und -unterhalt ist vor allem eine Aufgabe der öffentlichen Hand. Deshalb sollte das BAFU in Zusammenarbeit mit dem ASTRA und den Tiefbauämtern eine Strategie zur nachhaltigen Bewirtschaftung des Asphaltkreislaufs entwickeln. Mit dem vorliegenden Modell steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die strategischen Konzepte überprüft und optimiert werden können. Das Modell kann mit gewissen Anpassungen auf der kantonalen oder regionalen Ebene eingesetzt werden, womit die regionalen Aspekte eines strategischen Konzepts berücksichtigt werden können.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der sich anbahnende Entsorgungsnotstand von Ausbauasphalt in der Schweiz veranlasst das Bundesamt für Umwelt (BAFU) einen wirtschaftlichen und technischen Überblick über die derzeitige Entsorgungspraxis in der Schweiz und im Ausland durchführen zu lassen. In einem ersten Schritt sollen anhand eines Modells die Entwicklung der Asphaltflüsse abgeschätzt und verschiedene Verwertungsszenarien gerechnet werden. Dabei sollen die Asphaltflüsse differenziert nach den Belastungen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) dargestellt werden.

1.1 Ausgangslage

Heute wird ein Grossteil des anfallenden Ausbauasphalts gemäss dem Stand der Technik als Recyclingbaustoff verwertet. Der nicht verwertete Ausbauasphalt wird in Deponien des Typs B (PAK-Gehalt <250 ppm) oder E (PAK-Gehalt >250 ppm) abgelagert oder im Ausland thermisch verwertet. Gemäss Artikel 20 der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) ist Ausbauasphalt mit einem PAK-Gehalt bis zu 250 ppm möglichst vollständig als Rohstoff für die Herstellung von Baustoffen zu verwerten. Ausbauasphalt mit einem Gehalt von mehr als 250 ppm darf nicht stofflich verwertet werden. Es gelten jedoch gemäss Artikel 52 die folgenden Übergangsbestimmungen:

Ausbauasphalt mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250 ppm darf im Rahmen von Bauarbeiten bis zum 31. Dezember 2025 verwertet werden, wenn:

- a. der Ausbauasphalt höchstens 1'000 ppm PAK enthält und in geeigneten Anlagen so mit anderem Material vermischt wird, dass er bei der Verwertung höchstens 250 ppm PAK 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.

Ausbauasphalt mit einem PAK-Gehalt von mehr als 250 ppm darf bis zum 31. Dezember 2025 auf einer Deponie des Typs E abgelagert werden.

Verschiedene Kantone und das BAFU überlegen sich, zukünftig die Deponierung von Ausbauasphalt unabhängig von seinem PAK-Gehalt generell zu verbieten. Auch der Einsatz von RC-Kiessand A könnte künftig nicht mehr zugelassen werden. Es stellt sich nun die Frage, welche Konsequenzen solche Einschränkungen auf das Materialmanagement von Ausbauasphalt haben. Reichen die Aufnahmekapazitäten in der Mischgutproduktion aus? Unter welchen Rahmenbedingungen (Normen, Aufbereitungskonzepte, Behandlungstechnologien usw.) liesse sich ein Deponieverbot einführen, verbunden mit möglichst geringen negativen Auswirkungen auf die Entsorgungs- und Verwertungsbranche? Wie müssten die Rahmenbedingungen gesetzt werden, um den Materialkreislauf auf langfristige Sicht zu schliessen, d.h. ohne unerwünschte Lagerbildungen zu schaffen? Die Modellierung von verschiedenen Szenarien soll aussagekräftige Resultate liefern, um diese Fragestellungen zu beantworten.

1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Die Kantone St. Gallen, Thurgau, Zürich und das Fürstentum Liechtenstein haben im Jahr 2013 ein Modell zur Beschreibung der Entwicklung der PAK- und Asphaltflüsse erstellen lassen (Rubli 2013). Das Ziel des Projekts ist, das Modell der oben erwähnten Kantone so weiterzuentwickeln, dass sich die Asphaltflüsse auf der Ebene Schweiz modellieren und verschiedene Szenarien bis zum Jahr 2035 rechnen lassen. Die Resultate aus den Szenarienrechnungen dienen als Grundlage für die Entwicklung einer nachhaltigen Verwertungsstrategie von Ausbauasphalt unter vorgegebenen Rahmenbedingungen.

Folgende Arbeitsschritte sind dazu notwendig:

- Zusammentragen von Daten zu den anfallenden Ausbauasphaltmengen aus Erhebungen des Bundes, der Kantone und der Verbände für das Bezugsjahr 2018.
- Differenzierung der Ausbauasphaltmengen nach den beiden Kategorien: PAK-Gehalt <250 ppm und PAK-Gehalt >250 ppm.
- Eruiieren der heute verfügbaren Entsorgungs- und Verwertungswege von Ausbauasphalt bzw. der aufbereiteten Asphaltgranulate, d.h. Zusammentragen der Asphaltmengen, welche in die Deponien, die Verwertung in ungebundene/gebundene Anwendungen, in den Export bzw. in die Verwertung im Ausland gehen.

In einem weiteren Arbeitsschritt erfolgen die Modellentwicklung und die Definition von Szenarien:

- Auf Basis der zusammengetragenen Daten wird das entwickelte Modell parametrisiert, kalibriert und validiert.
- In Zusammenarbeit mit dem BAFU werden vier verschiedene Szenarien definiert, welche die Entwicklung der Asphaltflüsse bis zum Jahr 2035 abbilden sollen.
- Die Modelle werden gemäss den Szenarienvorgaben parametrisiert. Anschliessend lassen sich die verschiedenen Asphaltflüsse für jedes Szenario berechnen.
- Die Resultate aus den vier Szenarienrechnungen werden miteinander verglichen und interpretiert.

Auf Basis der Szenarienrechnungen können die verschiedenen Verwertungsstrategien miteinander verglichen werden. Daraus lassen sich Handlungsoptionen ableiten, welche schlussendlich aufzeigen sollen, mit welchen Verwertungsstrategien ein ökologisch und wirtschaftlich nachhaltiger Umgang mit dem künftig anfallenden Ausbauasphalt möglich ist.

In einer zweiten Studienphase werden auf Grundlage der Ergebnisse der vorliegenden Studie die technischen und wirtschaftlichen Aspekte sowie die Umsetzbarkeit von möglichen Behandlungsverfahren zur Aufarbeiten des überschüssigen Ausbauasphalts beurteilt.

2 Entsorgungswege und Materialflüsse im Bezugsjahr 2018

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells müssen ausreichende Datengrundlagen zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurden die verfügbaren Daten aus diversen Quellen zusammengetragen und ausgewertet. Wo möglich, wurden die Daten miteinander verglichen, um die Datenqualität zu beurteilen. Die Auswertungen zeigen, dass oftmals nur unvollständige Datensätze für die verschiedenen Bezugsjahre vorliegen, deshalb werden nachfolgend nur die Materialmengen des Bezugsjahres 2018 angegeben, für welches ein beinahe vollständiger Datensatz zusammengetragen werden konnte. Bestehende Datenlücken werden mittels Hochrechnungen und weiteren Abschätzungen geschlossen.

2.1 Anfall von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten <250 ppm in die Verwertung

Der in der Schweiz anfallende Ausbauasphalt (inkl. Fräsgut)¹ wird durch die beiden Verbände arv Baustoffrecycling Schweiz (ARV) und Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie (FSKB) mit Hilfe der elektronischen Plattformen (ARVIS und RESSIS) für jeden Baustoffrecyclingbetrieb, welcher einem der Verbände angeschlossen ist, erfasst. In der Abbildung 1 sind die im Jahr 2018 in die Aufbereitungsanlagen gelieferten Ausbauasphaltmengen mit PAK-Gehalten <250 ppm, gegliedert nach Kantonen, aufgeführt.

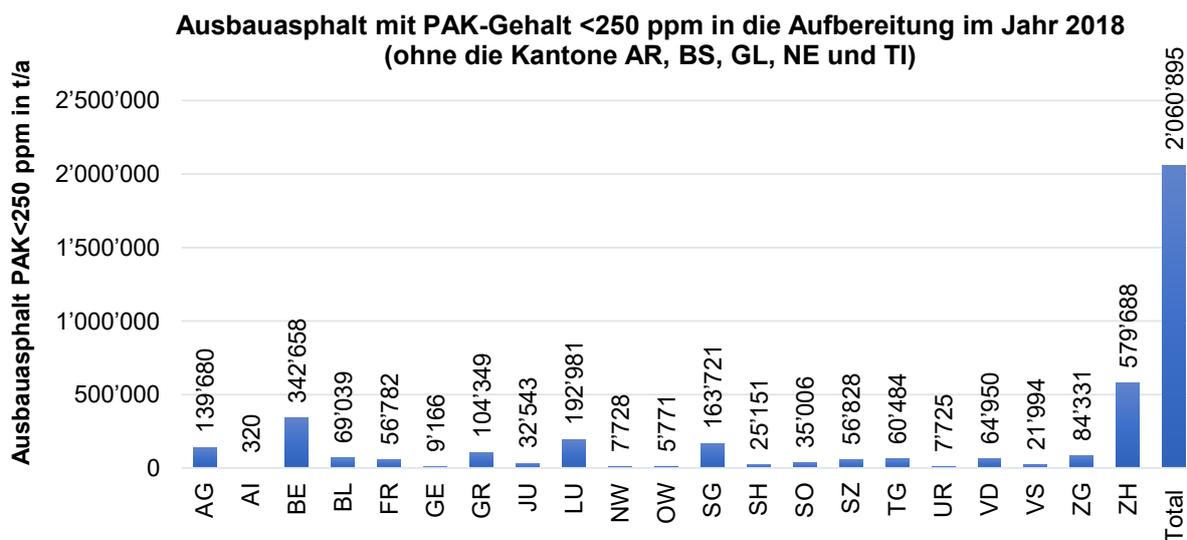


Abbildung 1: Von den Verbänden ARV und FSKB erhobene Ausbauasphaltmengen mit PAK-Gehalten <250 ppm, welche von den Aufbereitungsanlagen angenommen wurden, für das Bezugsjahr 2018. Die Ausbauasphaltmengen der Kantone AR, BS, GL, NE und TI wurden von den Verbänden nicht erhoben.

In den 21 Kantonen, in denen die Materialmengen erfasst wurden, gelangten im Jahr 2018 etwas mehr als 2.06 Millionen Tonnen Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten <250ppm in die Aufbereitungsanlagen. Knapp 45% davon wurden ausschliesslich in den Kantonen Zürich und Bern aufbereitet. Ein nicht bekannter Anteil davon dürfte aus den Nachbarkantonen stammen. In den Kantonen AR, BS, GL, NE und TI wurden für das Bezugsjahr 2018 keine Ausbauasphaltmengen erhoben, deshalb dürfte das Total für die Schweiz etwas höher liegen.

¹ Nachfolgend ist beim Materialfluss «Ausbauasphalt» immer auch das Fräsgut enthalten.

Für die Hochrechnung auf die gesamtschweizerische Ebene wurde der Anteil der Strassenlängen in diesen Kantonen am gesamtschweizerischen Strassennetz von knapp 7% berücksichtigt (Tabelle A. 1). Entsprechend höher ist deshalb die oben aufgeführte Menge für die gesamte Schweiz (Tabelle 3).

2.2 Ausbauasphaltmengen mit PAK-Gehalten >250 ppm gemäss Sonderabfallstatistik

Die Mengen an Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten >250 ppm, welche im Zeitraum 2014 bis 2018 in der Schweiz angefallen sind (Tabelle 1), stammen aus den Sonderabfallstatistiken des BAFU (BAFU, 2014-2018a) (BAFU, 2014-2018b). Sowohl bei den im Inland deponierten und aufbereiteten Asphaltmengen als auch bei den Exporten ist eine steigende Tendenz von ca. +50% (Inland) bzw. +150% (Exporte) innerhalb von 5 Jahren festzustellen. Auch der Exportanteil steigt innerhalb des Betrachtungszeitraums von 13% auf knapp 20% an.

Der doch recht starke Anstieg dieser Materialflüsse könnte einerseits auf einen Entsorgungsnotstand für diese Abfallfraktionen hindeuten. Andererseits könnte es auch sein, dass die Tiefbauämter in Erwartung eines Deponieverbotes ab dem Jahr 2026 gewisse Strassensanierungen vorziehen, um nicht ab diesem Zeitpunkt in einen Entsorgungsnotstand zu geraten bzw. um allfällige Mehrkosten für die Entsorgung zu verhindern.

Tabelle 1: Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten >250 ppm gem. Sonderabfallstatistiken in Tonnen pro Jahr, sowie der Exportanteil in Prozenten für den Zeitraum 2014 – 2018.

Inland	2014	2015	2016	2017	2018
Deponierung	60'496	72'419	70'058	62'658	97'261
Recycling/Aufbereitung	205'509	218'834	279'108	316'789	336'374
Total Inland	266'005	291'253	349'166	379'447	433'635
Export					
Recycling/Behandlung	39'466	43'762	95'005	78'462	105'533
Total Inland + Export	305'471	335'015	444'171	457'909	539'168
Exportanteil in %	12.9	13.1	21.4	17.1	19.6

2.3 Einsatzgebiete von aufbereiteten Asphaltgranulaten

Der ARV und FSKB erheben im Rahmen der Mengenerfassung seit rund drei Jahren zusätzlich, in welche Anwendungen die aufbereiteten Asphaltgranulate gelangen. Damit kann aufgezeigt werden, welche Anteile der aufbereiteten Asphaltgranulate in die Mischgutproduktion gehen und welche Anteile in die losen Anwendungen gelangen. Bei den losen Anwendungen ist der Einsatz als Asphaltgranulat oder als Kiessand A möglich.

Insgesamt wurden im Jahr 2018 knapp 2 Mio. Tonnen Asphaltgranulate produziert (Tabelle 2). Etwas mehr als 73% davon oder 1.44 Mio. Tonnen gelangten in die gebundenen Anwendungen. Weitere 20% oder 400'000 Tonnen wurden in loser Form eingesetzt und nur 130'000 Tonnen wurden zur Produktion von 650'000 Tonnen Kiessand A verwendet.

Tabelle 2: Produzierte Asphaltgranulatmengen im Bezugsjahr 2018 differenziert nach Einsatzformen in den 21 Kantonen gemäss den Erhebungen des ARV und FSKB. Produzierte Asphaltgranulate aus den Kantonen AR, BS, GL, NE und TI sind in den Daten nicht enthalten.

Daten ARV+FSKB	Einsatzform	2018 Tonnen	Anteile in %
Asphaltgranulat	lose	399'195	20.2
Asphaltgranulat im Recycling-Kiessand A ⁽¹⁾	lose	130'087	6.6
Asphaltgranulat	gebunden	1'443'335	73.2
Total verwertet exkl. Kiesanteile von 80% im RC-KS A		1'972'617	100.0

(1) Bei der angegebenen Menge handelt es sich um die Asphaltgranulatmenge, die zur Herstellung von RC-Kiessand A benötigt wird. Dies entspricht einer RC-Kiessand A Menge von 650'435 Tonnen.

2.4 Materialbilanz und Entsorgungswege Bezugsjahr 2018

Aus den in den Kapiteln 2.1 - 2.3 aufgeführten Materialflüssen lassen sich nun die Materialbilanz für das Bezugsjahr 2018 erstellen, sowie die Entsorgungswege analysieren (Tabelle 3). Insgesamt wurden im Jahr 2018 etwas mehr als 2.74 Mio. Tonnen Ausbausphalt von den Aufbereitungsbetrieben (inkl. Export) und Deponiebetreibern angenommen. Der Anteil an PAK-belastetem Ausbausphalt mit PAK-Gehalten >250ppm am Gesamtanfall beträgt knapp 20%.

Tabelle 3: Materialbilanz von Ausbausphalt aus der Bewirtschaftung der Strassen bzw. der Produkte aus der Aufbereitung für das Bezugsjahr 2018. Die Daten stammen von den Erhebungen des ARV und FSKB und aus der Sonderabfallstatistik des BAFU. Aufgrund fehlender Daten aus den Kantonen AR, BS, GL, NE und TI wurden die Mengen auf Basis der Anteile der Strassenlängen hochgerechnet (Wert in der letzten Spalte).

Materialanfall von Ausbausphalt	Datengrundlagen	Materialmenge in Tonnen	Materialmenge CH ⁽¹⁾ in Tonnen	Anteile in Prozenten
Ausbauhphalt PAK-Gehalt <250ppm	ARV und FSKB	2'060'895	2'205'158	80.4
Ausbauhphalt 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 Ausbausphalt/-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

Die Summe der verwerteten und deponierten Asphaltmengen beträgt knapp 2.78 Mio. Tonnen (Tabelle 3, unterer Teil). Darin enthalten ist ein Nettolageraufbau bei den Aufbereitungsbetrieben von knapp 132'000 Tonnen. Die Differenz von Materialanfall – Materialoutput beträgt -37'000 Tonnen, was im Unsicherheitsbereich der Materialerhebungen liegt. Insgesamt beträgt die Verwertungsquote 96.5%, wenn davon ausgegangen wird, dass die sich im Materiallager befindlichen Asphaltfraktionen später ebenfalls verwertet werden. Sollte dies nicht der Fall sein, dann läge die Verwertungsquote bei 92%. Interessant ist die weitere Entwicklung der

Materiallager. Sollte sich der Lageraufbau weiterhin in diese Richtung entwickeln, dann müsste der Lagerabbau wohl über die Deponie erfolgen, falls nicht genügend Verwertungsoptionen zur Verfügung stehen. In der Tabelle 3 nicht enthalten sind die in Deponien abgelagerte Ausbauasphaltfraktionen mit PAK-Gehalten <250ppm. Hierzu gibt es keine vollständigen Datensätze. Untersuchungen zu den abgelagerten Mengen in Deponien des Typs B in den Innerschweizer Kantonen zeigen, dass dort im Jahr 2018 rund 12'000 Tonnen Ausbauasphalt abgelagert wurden. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere in ländlichen bzw. abgelegenen Regionen in anderen Kantonen auch Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten <250ppm in Deponien des Typs B abgelagert werden.

3 Modellgrundlagen und -aufbau

Das zu entwickelnde Modell basiert bis auf einigen Anpassungen auf dem im Bericht zur Modellierung der Asphalt- und PAK-Flüsse in den Kantonen St. Gallen, Thurgau, Zürich und dem Fürstentum Liechtenstein beschriebenen Methodik (BAFU, 2001). Um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, werden in den nachfolgenden System- und Modellbeschreibungen die wichtigsten methodischen Ansätze nochmals thematisiert sowie die modellspezifischen Erweiterungen erläutert.

3.1 Systembeschreibung

Die zeitliche Entwicklung der Asphaltflüsse wird möglichst realitätsnah modelliert. Hierzu ist ein umfassender Modellaufbau notwendig. So werden die Strassen in National-, Kantons- und Gemeindestrassen, sowie weitere Strassen, Geh- und Radwege gegliedert. Der Strassenaufbau mit den verschiedenen Schichten wie Fundations-, Trag-, Binder- und Deckschicht wird im Modell ebenfalls berücksichtigt. Schliesslich werden sämtliche Outputflüsse nach den PAK-Belastungsklassen kleiner und grösser 250 ppm differenziert. Die Grundzüge des Modells lassen sich anhand des Systems in Abbildung 2 beschreiben.

Das System wird durch sieben Prozesse (eingefärbte Boxen) definiert. Die Materialflüsse zwischen den Prozessen sind jeweils als Pfeile dargestellt. Der Prozess «Strassen» ist der Hauptprozess im System. In diesem Prozess werden sämtliche Materiallager in den Strassen abgeschätzt. Ausgehend von diesen Lagerbeständen werden mittels der Neubau-, Erneuerungs- und Rückbauanteile die Materialflüsse abgeleitet. Die Outputflüsse aus dem Prozess «Strassen» gelangen in den virtuellen Verteilungsprozess «TRIAGE». Hier werden Ausbauasphalt und Strassenaufbruch entweder den Prozessen der mechanischen «Aufbereitung Ausbauasphalt» oder der thermischen oder chemischen «Behandlung» zugeführt². Der Rest des anfallenden Materials aus den «STRASSEN» gelangt in die «Deponie».

In den Prozessen «Aufbereitung» werden Asphaltgranulate bzw. RC-Kies/Sand für die Baustoffproduktion, d.h. für die Mischgut- und Kiesproduktion für die Foundation hergestellt. Falls nicht alles aufbereitete Material in den Produktionsprozessen eingesetzt werden kann, weil beispielsweise die vorgegebenen RC-Anteile in den Belagsschichten bereits ausgeschöpft sind, muss der «Überschuss» von der Aufbereitung in die Deponie geführt werden. Als einzige Importflüsse gelangen die Bindemittel (Bitumen und früher teerhaltige Bindemittel) in die Produktionsprozesse zur Herstellung des Mischguts.

² Diese Prozesse können auch im ausserhalb der Schweiz liegen. Aus diesem Grund weist das System keine Exportflüsse auf!

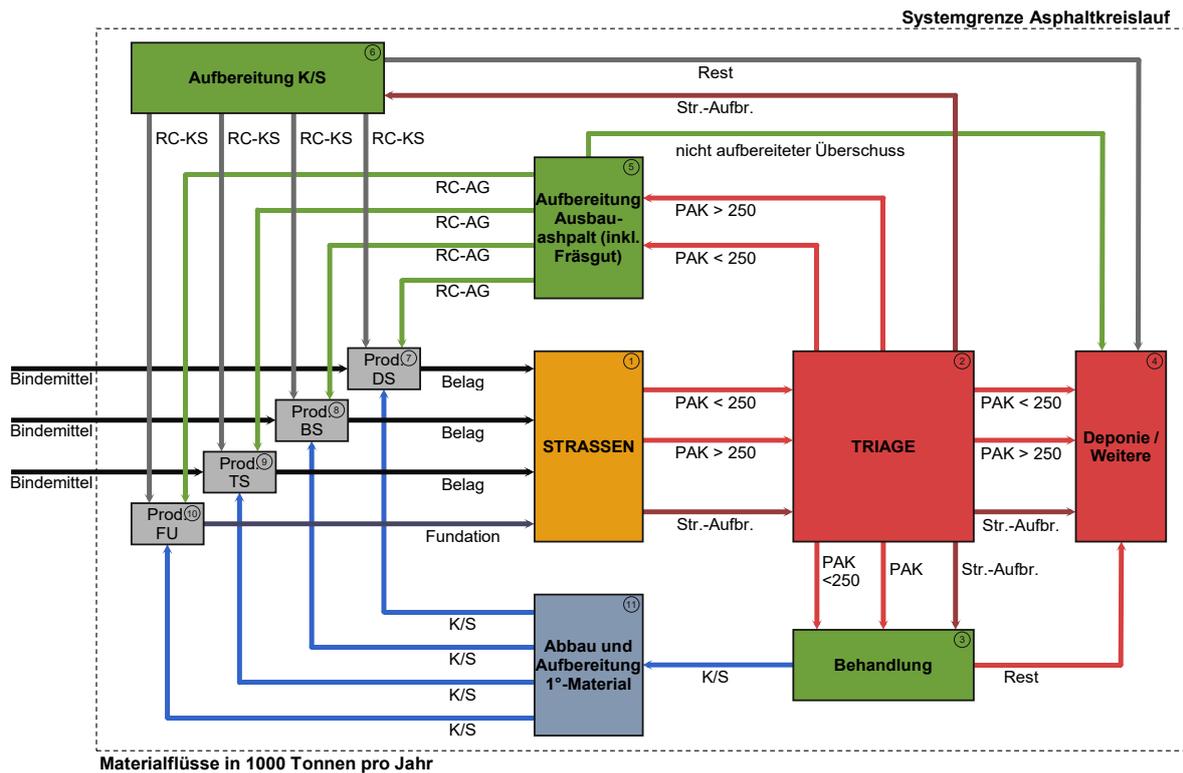


Abbildung 2: Systems zur Erfassung und Modellierung der Materialflüsse.

Legende: RC-AG: Asphaltgranulat, K/S: Kies/Sand, Str.-Aufbr.: Strassenaufbruch, DS: Deckschicht, BS: Binderschicht, TS: Tragschicht, FU: Fundationsschicht

Im Prozess «Behandlung» wird das Bindemittel aus dem Ausbauasphalt thermisch oder chemisch abgetrennt. Die verbleibende Gesteinskörnung kann entweder in der Mischgutproduktion oder als Kies-/Sandersatz verwertet werden. Die nicht verwertbaren Fraktionen und Rückstände aus dem Aufbereitungs- und Behandlungsprozess werden ebenfalls der «Deponie» zugeführt.

3.2 Modellierung des Materiallagers im Prozess «STRASSEN»

Der zentrale Prozess «STRASSE» beinhaltet viele weitere Subprozesse. Für jeden der vier Strassentypen «Nationalstrassen», «Kantonsstrassen», «Gemeindestrassen» und «Übrige Strassen» (asphaltierte Privatstrassen, Geh- und Radwege³ sowie Parkplätze) wird ein spezifischer Aufbau mit jeweils unterschiedlichen Schichtdicken (siehe auch Abbildung im Kapitel Glossar/Definitionen) definiert. Insgesamt werden somit 4 Strassentypen mit jeweils 4 Schichten und 2 Materialfraktionen, das heisst, es werden bis zu 32 Subprozesse im Prozess «Strasse» modelliert. Hinzu kommen die weiteren Prozesse des Systems. Das Modell ist somit von hoher Komplexität.

Über die aus statistischen Erhebungen bekannten Strassenlängen und -breiten lassen sich die heute in den Strassen gelagerten Materialvolumen abschätzen. Mit den eingesetzten

³ In den asphaltierten Geh- und Radwegen sind auch die Parkplätze enthalten. Dieser Strassentyp wird im Modell auch als „Übrige Strassen“ bezeichnet.

Materialdichten können die Materiallager in Tonnen umgerechnet werden. Als Datengrundlage dienen die Angaben zu den Strassenlängen für den Zeitraum 1950 – 2018 des Bundesamtes für Statistik (BFS, 2019). Allerdings verändern sich die Strassenlängen der Kantons- und Gemeindestrassen seit Mitte der 80er Jahre in dieser Statistik kaum mehr. Der Grund hierfür ist, dass insbesondere bei den Gemeindestrassen seit 1984 keine weiteren Erhebungen der Strassenneubauten durchgeführt wurden. Es wurden ausschliesslich die Umklassierungen zwischen Kantons- und Gemeindestrassen statistisch erfasst. Aus diesem Grund muss die Entwicklung der Längen der Gemeindestrassen und der übrigen Strassen über die Siedlungsentwicklung abgeschätzt werden (BAFU, 2016).

Zur Beschreibung der Entwicklung der Materiallager wird vom Istzustand des Materiallagers im Jahr 2018 ausgegangen (Berechnungen siehe Tabelle A. 3 im Anhang). Zunächst wird die vergangene Lagerentwicklung bis ins Jahr 1960 rückwärts modelliert, indem die Neubauraten für jeden Strassentyp in den Jahren 1960, 1990, 2010 eingesetzt werden (Tabelle A. 2 im Anhang). Die Neubauraten beziehen sich dabei immer auf den Strassenbestand (Längen) in den entsprechenden Jahren. Da das Nationalstrassennetz im Jahr 1960 beispielsweise noch sehr klein war, sind die Neubauraten für diesen Strassentyp zu Beginn sehr hoch angesetzt. Für die künftige Lagerentwicklung wird ein zusätzlicher Wert für das Jahr 2035 definiert. Die Werte werden mit Hilfe von kubischen Splinesfunktionen interpoliert, so dass für jedes Jahr Werte für die weiteren Berechnungen zur Verfügung stehen. Dieses Vorgehen gewährleistet die Stetigkeit der zeitlichen Entwicklung. In der Abbildung 3 sind die interpolierten Entwicklungen der Strassenlängen, differenziert nach Strassentyp für den Zeitraum 1960 bis 2035 angegeben.

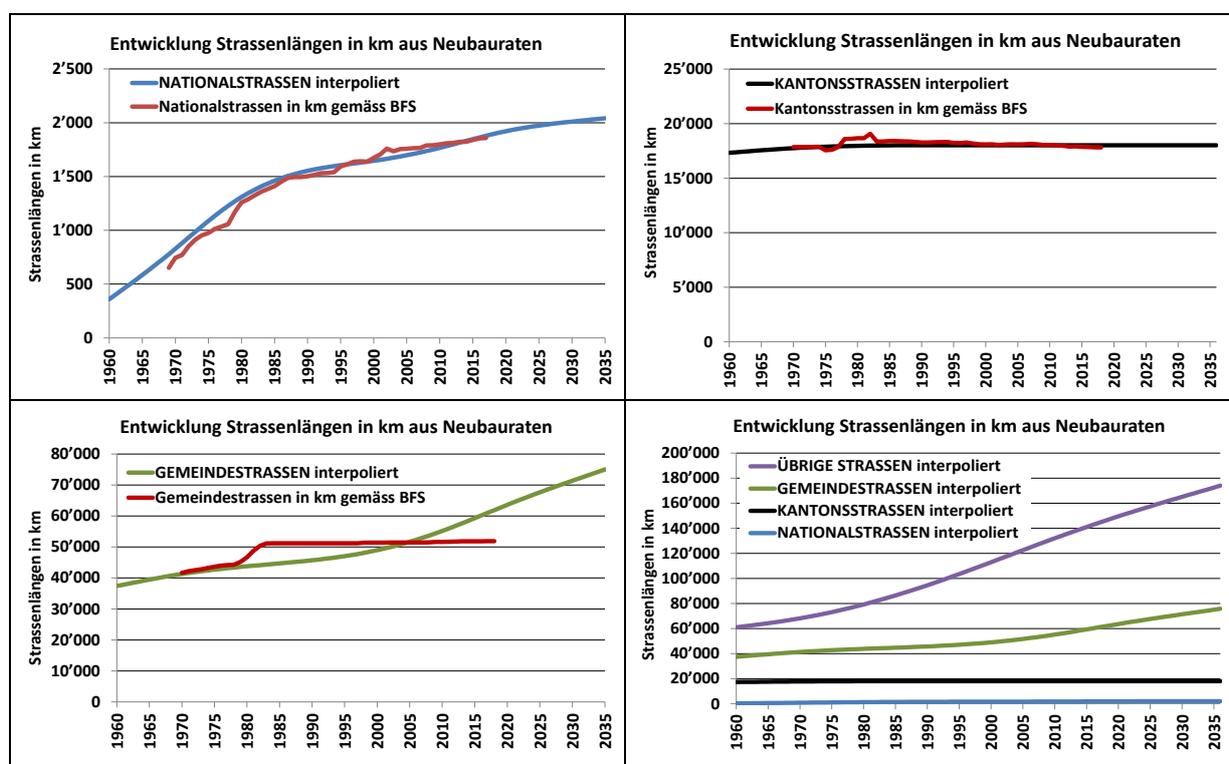


Abbildung 3: Vergleich der Entwicklung der Strassenlängen gemäss der Statistik des BFS (rote Linien in den Grafiken oben und unten links) und interpolierten Strassenlängen im Zeitraum 1960 bis 2035 gemäss den eingesetzten Neubauraten in der Tabelle A. 2 im Anhang. In der Grafik unten rechts sind die interpolierten Entwicklungen der Strassenlängen für die verschiedenen Strassentypen aufgeführt.

Zur Kalibrierung der Entwicklung wurden die erwähnten statistischen Datengrundlagen zur Entwicklung der Strassenlängen des BFS verwendet. Die eingesetzten Neubauraten werden dabei so angepasst, dass die modellierten Längen für bestimmte Jahre mit den statistischen Angaben (rote Linien in den Grafiken oben und links unten) möglichst optimal übereinstimmen. Ebenfalls im Modell berücksichtigt ist das Breitenwachstum der Strassen. Insbesondere bei den Kantons- und Gemeindestrassen sowie bei den «Übrigen Strassen» ist dieser Zuwachs relativ stark ausgeprägt.

3.3 Parametrisierung des Modells hinsichtlich der Entwicklung der Materialflüsse

Die Parametrisierung des Modells zur Modellierung der Entwicklung der Materialflüsse bis zum Jahr 2035 erfolgt in den Grundzügen gemäss der Modellierung der Asphalt- und PAK-Flüsse in den Kantonen St. Gallen, Thurgau, Zürich und dem Fürstentum Liechtenstein (Rubli, 2013). Nachfolgend werden die wichtigsten Modellparameter beschrieben und die Unterschiede zur Studie von 2013 aufgezeigt.

3.3.1 Entwicklung der PAK-haltigen Asphaltflüsse

In der vorliegenden Studie werden die Ausbauasphaltflüsse nach den zwei PAK-Klassen «PAK-Gehalt <250ppm» und «PAK-Gehalt >250ppm» differenziert. Die zeitliche Entwicklung der PAK-Lager und Flüsse im Zeitraum 1960 bis 2035 basiert auf den Modellparametern der Studie von Rubli 2013. Als Datengrundlage dienen eine BAFU-Publikation zu den Luftschadstoffemissionen auf Baustellen (BAFU, 2001) und eigene Abschätzungen zu den eingesetzten Anteilen an teerhaltigen Bindemitteln im zeitlichen Verlauf. Zur Validierung des Modells wurden damals umfangreiche Auswertungen von Bohrkernanalysen durchgeführt, um die modellierten PAK-Lager in den Strassen möglichst gut abzubilden. Die Modellparameter für die Ebene Schweiz wurden für die vorliegende Studie leicht angepasst, da es in der Schweiz Regionen gibt (v.a. in der Westschweiz), welche nur über geringfügige PAK-Belastungen in den Strassen verfügen. Die zeitabhängige Entwicklung der Bindemittelzusammensetzungen werden jeweils für die Jahre 1960, 1980, 1990, 2010 und 2035 vorgegeben (Tabelle A. 4) und anschliessend mittels kubischer Splinefunktionen interpoliert.

3.3.2 Entwicklung der RC-Anteile im Mischgut

Die Entwicklung der RC-Asphaltgranulatanteile (RCAg-Anteile) in der Mischgutproduktion bzw. in der Foundation ist ein zentrales Element zur Modellierung von verschiedenen Szenarien. Mittels Festlegung der maximal möglichen RCAg-Anteile in den einzelnen Schichten für die Jahre 1960, 1980, 1990, 2010 und 2035 kann die zeitliche Entwicklung vorgegeben und mittels kubischen Splinefunktionen abgebildet werden (Tabelle 4). Sollte aus der Aufbereitung jedoch weniger RCAg als die vorgegebenen Anteile verfügbar sein, wird das RC-Granulat im Modell jeweils bis zum maximal definierten Anteil in den einzelnen Schichten eingesetzt, wobei bei der Foundation, bei der die geringsten Qualitätsanforderungen zu erfüllen sind, begonnen wird. Sobald der maximal definierte Anteil in der Foundation erreicht ist, geht das noch vorhandene RC-Asphaltgranulat in die darüber liegende Schicht (Tragschicht). Dies wird fortgesetzt bis zur Deckschicht. Sollte am Schluss noch immer ein Überschuss an RCAg aus der Aufbereitung vorhanden sein, dann wird dieser im Modell als «nicht aufbereiteter Überschuss» in den Prozess

«Deponie» zurückgeführt (Tabelle 4). Der Einsatz von RC-Asphaltgranulat erfolgt im Modell somit kaskadenartig von der Foundation mit den geringsten materialtechnischen Anforderungen bis hin zur Deckschicht mit den höchsten materialtechnischen Anforderungen.

Tabelle 4: Modellparameter zur Vorgabe der Entwicklung der maximalen Anteile an RC-Asphaltgranulaten und RC-Kies/Sand an der jeweiligen Baustoffproduktion, differenziert nach den verschiedenen Schichten (hier für das Szenario REFERENZ). In der letzten Spalte ist jeweils der totale RC-Anteil aufsummiert, er darf nicht grösser als 100 sein.

Anteil RC-Produkte (total)		Anteil PAK <250	Anteil PAK >250	Anteil RC-K/S	Total
Deckschicht					
	Jahr				
0%	1960	0	0	0	0
0%	1980	0	0	0	0
0%	1990	0	0	0	0
5%	2010	4	1	0	5
5%	2035	4	1	0	5
Binderschicht					
5%	1960	2	3	0	5
10%	1980	6	4	0	10
20%	1990	14	6	0	20
30%	2010	23	7	0	30
30%	2035	25	5	0	30
Tragschicht					
10%	1960	5	6	0	10
20%	1980	11	9	0	20
55%	1990	38	17	0	55
60%	2010	47	13	0	60
60%	2035	50	10	0	60
Foundation					
35%	1960	35.0	0	40	75
35%	1980	35.0	0	40	75
15%	1990	15.0	0	40	55
11.0%	2010	11.0	0	85	96
11.0%	2035	11.0	0	89	100

3.3.3 Parametrisierung der Verteilung im Prozess TRAIGE

Die drei Outputflüsse aus dem Prozess «Strassen» gelangen in den Triageprozess (Abbildung 2). Dieser virtuelle Verteilungsprozess findet in der Praxis bereits auf der Baustelle oder bei den Aufbereitungsunternehmen statt. Im Modell können diese Verteilungen mittels sogenannter Transferkoeffizienten szenarioabhängig definiert und damit die Materialflüsse in die nachgelagerten Entsorgungsprozesse festgelegt werden. Wenn künftig beispielsweise ein Behandlungsprozess für die thermische oder chemisch-physikalische Behandlung von Ausbauasphalt in der Schweiz erstellt wird, können die Materialflüsse aus Prozess «Triage» in die «Behandlung» über die Verteilungsparameter entsprechend angepasst und modelliert werden. Es handelt sich somit um ein neues Modellszenario.

3.4 Kalibrierung des Modells anhand des Szenarios «REFERENZ»

Als Grundlage für die Modellierung wird zunächst ein Szenario «REFERENZ» definiert, welches insbesondere für ein Bezugsjahr (hier das Jahr 2018) den IST-Zustand möglichst gut abbilden soll. Hierzu werden die zur Verfügung stehenden Daten verwendet. Die Modellparameter werden so lange verändert, bis die Modellresultate möglichst nahe bei den Werten der erhobenen Materialflüssen liegen. Je mehr Datengrundlagen zur Verfügung stehen, umso besser kann das Modell kalibriert werden. Die im Kapitel 2 präsentierten Daten erlauben eine ausgewogene Kalibration des Modells. Zusätzlich stehen weitere Daten vom Schweizer Fachverband «asphaltsuisse» zur Mischgutproduktion für den Zeitraum 2010 -2019 zur Verfügung (asphaltsuisse, 2019). Die Abbildung 4 zeigt den Vergleich zwischen der Mischgutproduktion im Zeitraum 2010 bis 2019 (Punkte) mit dem modellierten Ausbausasphaltinput in die Strassen (Linie) für den Zeitraum 2000 bis 2035 in Millionen Tonnen pro Jahr. Dieser Vergleich entspricht der Kalibration des jährlichen Asphaltbelaginputs in die Strassen.

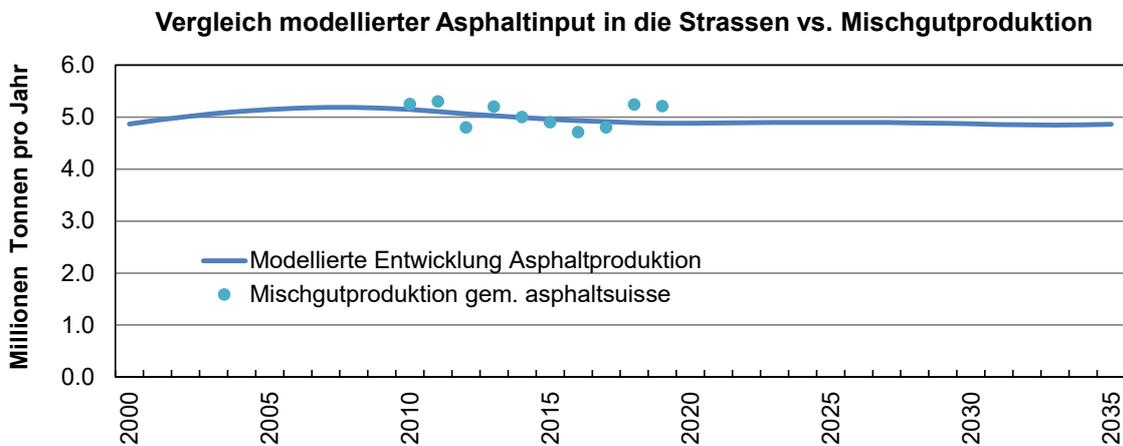


Abbildung 4: Vergleich der Mischgutproduktion im Zeitraum 2010 bis 2019 (Punkte) mit dem modellierten Ausbausasphaltinput in die Strassen (Zeitraum 2000 bis 2035) in Millionen Tonnen pro Jahr.

Die Outputflüsse aus den Strassen und die Verteilung dieser Materialflüsse im Prozess «Triage» auf die verschiedenen Entsorgungswege wurden ebenfalls kalibriert (Tabelle 5). Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen den erhobenen und modellierten Materialflüssen im Bereich $0 \pm 1.9\%$ liegen.

Diese sind teilweise darauf zurückzuführen, dass im Modell weitere Annahmen getroffen wurden. So wird im Modell beispielsweise davon ausgegangen, dass ein geringer Teil des anfallenden Ausbausasphalt mit PAK-Gehalten $<250\text{ppm}$ im Umfang von knapp 27'000 Tonnen pro Jahr deponiert werden. Aus diesem Grund liegt der entsprechende Wert des Modells beim Ausbausasphalt etwas über jenem der erhobenen Daten. Zudem ist im erhobenen Materialfluss «Asphaltgranulat PAK $<250\text{ppm}$ in Verwertung in der CH» der Lageraufbau bei den Aufbereitungsbetrieben enthalten. Im Modell widerspiegelt dieser Materialfluss den «nicht aufbereiteten Überschuss».

Tabelle 5: Vergleich zwischen den erhobenen Materialflüssen (gem. Kapitel 2) und den modellierten Materialflüssen des Szenarios «REFERENZ» für das Bezugsjahr 2018 sowie Abweichung in %.

Materialflüsse	Erhebungen in Tonnen/Jahr	Modell in Tonnen/Jahr	Abweichung in %
Output aus Prozess "Strassen"			
Ausbauasphalt PAK-Gehalt <250ppm	2'205'158	2'248'122	1.9
Ausbauasphalt PAK-Gehalt >250ppm	539'168	539'208	0.0
Total Materialouput aus Strassen	2'744'326	2'787'330	1.6
Output aus Prozess "Triage"			
Asphaltgranulat PAK <250ppm in Verwertung in CH	2'242'371	2'220'592	-1.0
Asphaltgranulat PAK >250ppm in Verwertung in CH	336'374	331'492	-1.5
Deponierung Inland PAK <250ppm	nicht bekannt	27'531	
Deponierung Inland PAK >250ppm	97'261	98'420	1.2
Verwertung Ausland PAK >250ppm	105'533	109'295	3.6
Total Materialouput aus Triage	2'781'539	2'787'330	0.2

3.5 Definition und Beschreibung von vier Szenarien

Die umfangreiche Parametrisierung des Modells erlaubt es, eine Vielzahl an verschiedenen Szenarien zu rechnen. Die zu definierenden Szenarien sollen jeweils die verschiedenen Fragestellungen reflektieren. In der vorliegenden Studie stehen die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welchen Einfluss hat das Ablagerungsverbot von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten von >250ppm und allenfalls von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten von <250ppm ab dem Jahr 2026 auf die künftige Entwicklung der Asphaltflüsse im System?
- Welche Auswirkungen hätte ein Verbot von lose eingesetztem RC-Kiessand A und von Asphaltgranulaten in der Fundation?
- Welche Auswirkungen hätte die Erhöhung der maximalen Recyclinganteile in der Mischgutherstellung und wie verändern sich die Asphaltflüsse, wenn zusätzlich ein thermisches oder chemisch-physikalisches Behandlungsverfahren in der Schweiz realisiert würde?

Es werden insgesamt vier Szenarien definiert. Die Szenarien sind so gestaltet, dass sie aufeinander aufbauen, wobei nur wenige Parameter zwischen den einzelnen Szenarien verändert werden. Dies hat den Vorteil, dass die Resultate bzw. die Unterschiede zwischen den Szenarien gut zu interpretieren sind und die Ergebnisse nachvollziehbar bleiben. Das Szenario «REFERENZ» bildet das erste Szenario, welches die Basis für die Entwicklung der weiteren Szenarien darstellt. Es soll die IST-Situation so gut wie möglich widerspiegeln. Der IST-Zustand wird bis zum Jahr 2035 fortgeschrieben, das heisst, die Parameter bleiben bis zum Jahr 2035 weitgehend unverändert. Damit kann die Entwicklung der verschiedenen Materialflüsse unter der Voraussetzung, dass keine weiteren Massnahmen (bis auf das in der VVEA verankerte Deponieverbot im Jahr 2026 für Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten >250ppm) stattfinden, abgebildet werden.

In der Tabelle 6 sind die vier Szenarien als Übersicht kurz beschrieben. Die Tabelle enthält die Abkürzungen der Szenarien, welche jeweils für die nachfolgenden Grafiken im Resultatteil verwendet werden.

Tabelle 6: Kurzbeschreibung der vier Szenarien.

Szenario	Abkürzung	Kurzbeschreibung
Szenario Referenz	SZ Referenz	Das Szenario bildet weitgehend den Istzustand ab. Dieser wird bis zum Jahr 2035 fortgeschrieben.
Szenario Referenz, es gehen jedoch weder RC-Kiessand A noch Asphaltgranulat in loser und gebundener Form in die Foundation.	SZ Ref, nF	Dieses Szenario entspricht ebenfalls dem Szenario «Referenz», es wird jedoch vorgegeben, dass weder RC-Kiessand A noch Asphaltgranulate in loser und gebundener Form in der Foundation eingesetzt werden. Der Grund hierfür ist, dass es sich nur bedingt um ein Recycling handelt. Es wird ausschliesslich die Lebensdauer der Materialien verlängert. Später muss dieses Material je nach Einbauverfahren wieder als Materialgemisch ausgebaut und mit grosser Wahrscheinlichkeit deponiert werden.
Szenario nichts in Foundation, maximale RC-Anteile in der Asphaltproduktion.	SZ nF, maxREC	Dieses Szenario entspricht dem Szenario «SZ nF», die maximalen RC-Anteile in Asphaltproduktion liegen jedoch teilweise über den heute in den Normen festgelegten RC-Anteilen.
Szenario nichts in Foundation, maximale RC-Anteile in der Asphaltproduktion und zusätzlich ein Behandlungsverfahren.	SZ nF, maxREC + BH	Dieses Szenario entspricht dem Szenario «SZ nF, Max Rec», ein Grossteil des Asphaltbelags mit PAK-Gehalten >250ppm, sowie ein geringerer Anteil an Asphaltbelag mit PAK-Gehalten <250ppm geht in einen Behandlungsprozess.

3.5.1 Wichtige Parameter des Basisszenarios REFERENZ

Im Basisszenario REFERENZ werden die maximalen RC-Anteile in der Mischgutproduktion so gesetzt, dass diese im Zeitraum zwischen 2010 und 2035 konstant auf den in der Norm SN 640431-1-b-NA definierten maximalen RC-Anteilen bei Warmzugabe entsprechen. Bei der Deckschicht wurde allerdings nur ein Anteil von 5% eingesetzt, weil davon ausgegangen wird, dass heute bzw. auch in den kommenden Jahren der RC-Anteil von 30% meist nicht erreicht wird.

Zulässige Zugabeanteile von RC-Granulat gemäss SN 640 431-1-b-NA:

Deckschicht:	0 bis 30%;	im Referenzszenario:	5%	für die Jahre 2010 und 2035
Binderschicht:	bis 30%;	im Referenzszenario:	30%	für die Jahre 2010 und 2035
Tragschicht:	bis 60%;	im Referenzszenario:	60%	für die Jahre 2010 und 2035
Foundation:	bis 70%;	im Referenzszenario:	11%	für die Jahre 2010 und 2035

In der Foundation werden heute RC-Kiessand A und Asphaltgranulate in loser und gebundener Form eingesetzt. Auf die gesamte Foundationsschicht bezogen, entspricht dies, Stand 2018, einem durchschnittlichen Anteil an der Foundation von 11% (bezogen auf eine Schichtdicke von

40 – 60 cm). Dieser Anteil wird in Szenario REFERENZ bis ins Jahr 2035 konstant belassen. In den weiteren Szenarien wird davon ausgegangen, dass aus genannten Gründen (Tabelle 6) keine RC-Kiessand A und Asphaltgranulat in die Foundation gelangen.

3.5.2 Parameterveränderungen zwischen den vier Szenarien

Die in der Tabelle 6 beschriebenen Szenarien unterscheiden sich einerseits in Bezug auf die eingesetzten Recyclinganteile (Tabelle 7). Andererseits sind die Verteilungskoeffizienten des Prozesses «Triage» (Tabelle 8), in dem die Entsorgungspfade des Ausbauasphalts definiert werden, szenarioabhängig gewählt. Veränderungen gegenüber dem Szenario «REFERENZ» sind in den Tabellen jeweils gelb markiert und in fetter Schrift angegeben. In der Tabelle 7 ist erkennbar, dass beim Szenario «SZ Ref, nF» im Jahr 2035 kein Asphaltgranulat in die Foundation gelangt. Der Wert liegt bei 0%. Dies ist auch bei den weiteren Szenarien der Fall, hier sind jedoch die maximalen Recyclinganteile in der Trag-, Binder- und Deckschicht im Jahr 2035 deutlich höher als im Szenario «REFERENZ». Die letzten beiden Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der RC-Anteile nicht voneinander. Die Verteilungskoeffizienten im Prozess «Triage» sind in diesen Szenarien hingegen verschieden gewählt (Tabelle 8). Im letzten Szenario «SZ nF, REC+BH» gelangen im Jahr 2035 100% des Ausbauasphalts mit PAK-Gehalten >250ppm und 30% des Ausbauasphalts mit PAK-Gehalten <250ppm in die Behandlung.

Tabelle 7: Definition der Entwicklung der Recyclinganteile in den verschiedenen Strassenschichten für die vier Szenarien. Die gelb markierten und in fetter Schrift angegebenen Anteile, verdeutlichen die Veränderungen gegenüber dem Szenario «REFERENZ».

	SZ Referenz	SZ Referenz, nichts in Foundation (nF)	SZ nF, max Rec	Szenario nF, max REC +BH
Deckschicht				
Jahr				
1960	0%	0%	0%	0%
1980	0%	0%	0%	0%
1990	0%	0%	0%	0%
2010	5%	5%	5%	5%
2035	5%	5%	30%	30%
Binderschicht				
1960	5%	5%	5%	5%
1980	10%	10%	10%	10%
1990	20%	20%	20%	20%
2010	30%	30%	30%	30%
2035	30%	30%	60%	60%
Tragschicht				
1960	10%	10%	10%	10%
1980	20%	20%	20%	20%
1990	55%	55%	55%	55%
2010	60%	60%	60%	60%
2035	60%	60%	80%	80%
Foundation				
1960	35%	35%	35%	35%
1980	35%	35%	35%	35%
1990	15%	15%	15%	15%
2010	11.0%	11.0%	11.0%	11.0%
2035	11.0%	0.0%	0.0%	0.0%
gelb markiert und fette Schrift: Werte verändert gegenüber Szenario Referenz				

Tabelle 8: Verteilungskoeffizienten im Prozess «Triage», in dem die Verwertungswege «Aufbereitung», «Behandlung» und «Deponierung» für die vier Szenarien definiert werden. Die Summe der Koeffizienten ergibt den Wert 1. Die gelb markierten und in fetter Schrift angegebenen Werte, verdeutlichen die Veränderungen zwischen den verschiedenen Szenarien. Die Verteilungskoeffizienten verändern sich demnach nur im Szenario «Szenario nF, max REC +BH», bei allen anderen Szenarien bleiben diese unverändert.

	Szenario Referenz			Szenario Referenz, nichts in Fundation (nF)			Szenario nF, max REC			Szenario nF, max REC +BH		
	Aufbereitung	Behandlung	Deponie	Aufbereitung	Behandlung	Deponie	Aufbereitung	Behandlung	Deponie	Aufbereitung	Behandlung	Deponie
Anteil PAK-Gehalt <250ppm												
1960	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80
1970	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80
1980	0.70	-	0.30	0.70	-	0.30	0.70	-	0.30	0.70	-	0.30
1990	0.90	-	0.10	0.90	-	0.10	0.90	-	0.10	0.90	-	0.10
2010	0.98	-	0.02	0.98	-	0.02	0.98	-	0.02	0.98	-	0.02
2020	0.99	-	0.01	0.99	-	0.01	0.99	-	0.01	0.98	0.01	0.01
2035	1.00	-	-	1.00	-	-	1.00	-	-	0.70	0.30	-
Anteil PAK-Gehalt >250ppm												
1960	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80
1970	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80	0.20	-	0.80
1980	0.70	-	0.30	0.70	-	0.30	0.70	-	0.30	0.70	-	0.30
1990	0.75	-	0.25	0.75	-	0.25	0.75	-	0.25	0.75	-	0.25
2010	0.70	0.05	0.25	0.70	0.05	0.25	0.70	0.05	0.25	0.70	0.05	0.25
2020	0.55	0.30	0.15	0.55	0.30	0.15	0.55	0.30	0.15	0.55	0.30	0.15
2035	-	1.00	-	-	1.00	-	-	1.00	-	-	1.00	-
gelb markiert: Werte verändert gegenüber Szenario Referenz												

4 Resultate

Das Szenario REFERENZ bildet das Basisszenario. Aus diesem Grund wird nachfolgend zunächst auf die Resultate dieses Szenarios eingegangen. Daran anschliessend erfolgt der Vergleich mit den weiteren Szenarien. Hier geht es insbesondere darum, die teilweise markanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien in Bezug auf die Materialflüsse in die Deponien aufzuzeigen.

4.1 Resultate Szenario REFERENZ (SZ Ref)

Das Szenario REFERENZ widerspiegelt die heutige Situation in der Schweiz bzw. die weitere Entwicklung unter heute gegebenen Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2035. In der Abbildung 5 sind die Materialflüsse für dieses Szenario für das Jahr 2018 dargestellt. Das Modell ergibt für dieses Bezugsjahr eine Mischgutproduktion bzw. einen Bedarf an Asphaltbelag von 4.89 Mio. Tonnen. Jeweils ungefähr ein Drittel der Asphaltproduktion geht in die Tragschicht (TS), Binderschicht (BS) und Deckschicht (DS). Der Materialbedarf für die Foundation liegt bei 9.1 Mio. Tonnen pro Jahr.

Aus dem Prozess «Strassen» resultiert ein Ausbauasphaltanfall von 2.761 Mio. Tonnen, wovon 539'000 Tonnen einen PAK-Gehalt von >250 ppm haben, was einem Anteil von knapp 20% entspricht. Somit wächst das Asphaltlager in den Strassen noch immer jährlich um rund 2.1 Mio. Tonnen pro Jahr. Knapp 92% des anfallenden Ausbauasphalts, was 2.573 Mio. Tonnen pro Jahr entspricht, wird aufbereitet und gelangt zurück in die Asphaltproduktion. Der Rest wird in Deponien des Typs B und E abgelagert (Total 126'000 t/a) oder einer Behandlungsanlage im Ausland der thermischen Verwertung zugeführt (89'000 t/a), wobei es sich hier vorwiegend um Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten >1000ppm handelt. Der grösste Teil der aufbereiteten Asphaltgranulate, das heisst 1.136 Mio. Tonnen, gelangt in die Foundation. Rund die Hälfte davon wird in loser Form als Kiessand A oder als Asphaltgranulat eingesetzt (siehe Tabelle 3), die andere Hälfte wird in gebundener Form als Kaltmischfundation (KMF) oder als Heissmischfundation (ACF) eingebaut. Diese Anwendungen kommen vor allem bei Sanierungen von National- und teilweise Kantonsstrassen zum Einsatz. In die Mischgutproduktion gelangen gemäss Modell insgesamt 1.374 Mio. Tonnen, davon werden 880'000 Tonnen oder zwei Drittel in die Tragschicht geführt. Ein weiteres Drittel geht in die Binderschicht. Nur sehr geringe Mengen gelangen in die Deckschicht. Gemäss Modell kann nicht sämtlicher Ausbauasphalt, welcher der Aufbereitung zugeführt wird, verwertet werden. Der «nicht aufbereitete Überschuss» im Umfang von 63'000 Tonnen pro Jahr wird im Modell in die Deponien geführt. In der Praxis werden diese Mengen im Moment vor allem auf den Aufbereitungsplätzen zwischengelagert.

In der Abbildung 6 ist das gleiche Szenario für das Jahr 2035 dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede bei den Materialflüssen im Vergleich mit dem Jahr 2018 festzustellen. Zwar bewegt sich der totale Asphalt- bzw. Mischgutinput in die Strassen mit 4.863 Mio. Tonnen weiterhin auf beinahe gleichem Niveau wie im Jahr 2018, der Ausbauasphaltanfall nimmt jedoch um rund 350'000 t/a auf 3.14 Mio. Tonnen pro Jahr zu.

Die Zunahme des Ausbauasphalts und die damit zusammenhängende Problematik bei der zukünftigen Verwertung dieses Materials hat verschiedene Gründe.

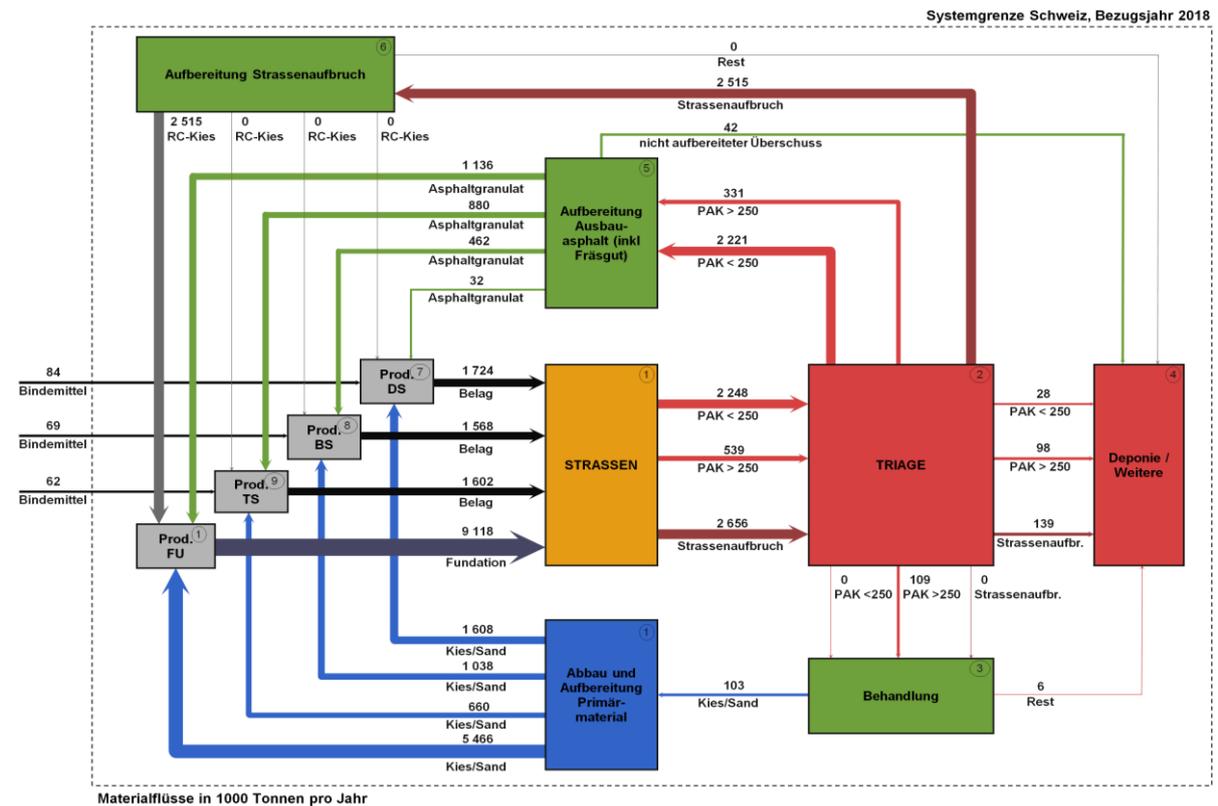


Abbildung 5: Materialflüsse im modellierten Szenario REFERENZ für das Bezugsjahr 2018. Werte in 1'000 t/a. Legende: DS: Deckschicht, BS: Binderschicht, TS: Tragschicht, FU: Fundationsschicht.

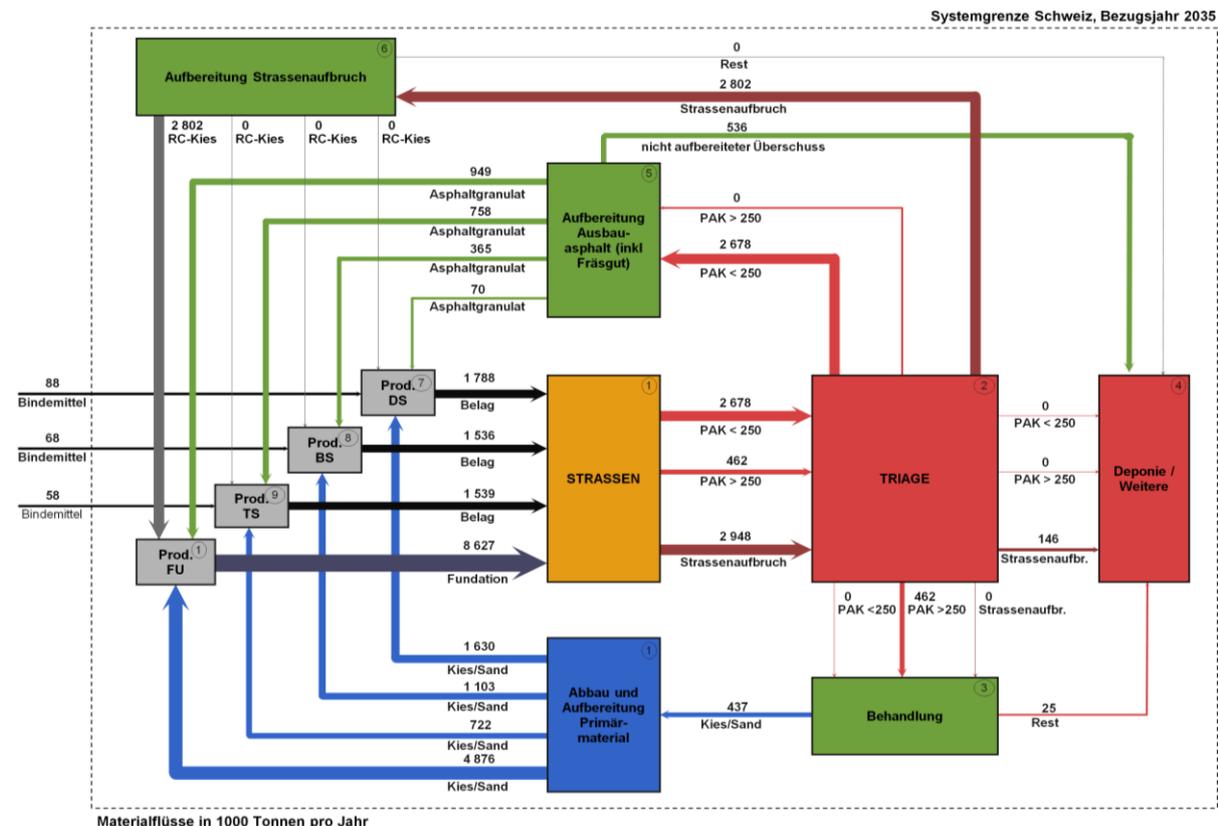


Abbildung 6: Materialflüsse im modellierten Szenario REFERENZ für das Jahr 2035. Werte in 1'000 t/a. Im Vergleich zur Abbildung 5 ist insbesondere der Materialfluss «nicht aufbereiteter Überschuss» mit 536'000 t/a deutlich grösser. Es kann somit nicht mehr aller anfallender Ausbauasphalt unter den gegebenen Rahmenbedingungen verwertet werden. Legende: Siehe Abbildung 5.

Der Hauptgrund für die Zunahme der Ausbauasphaltemengen ist das im Betrachtungszeitraum anwachsende Materiallager: Wird von einem jährlichen Lagerwachstum von Asphaltbelag von durchschnittlich 2 Mio. Tonnen ausgegangen (Lagerwachstum im 2018: 2.1 Mio. Tonnen) wächst das Materiallager innerhalb von 17 Jahren, d.h. bis zum Jahr 2035 um 34 Mio. Tonnen. Bei einer Sanierungsrate von 1.5% ergäbe dies einen zusätzlichen Output an Ausbauasphalt von theoretisch 510'000 t/a, was noch höher liegt, als die im Modell resultierenden 350'000 t/a im Jahr 2035. Die Thematik des Einflusses des Lagerwachstum auf die Entwicklung der Outputflüsse wird oftmals unterschätzt, insbesondere deshalb, weil diese Entwicklung bei den Strassen mit einer starken Verzögerung von Jahrzehnten eintritt. Der systembedingte Anstieg von Ausbauasphalt kann jedoch vorerst nicht unterbunden werden. Die Konsequenz dieser Entwicklung ist, dass gemäss Modell im Jahr 2035 536'000 Tonnen Ausbauasphalt nicht mehr aufbereitet werden können, weil zu wenig Verwertungskapazitäten zur Verfügung stehen, und deshalb als «nicht aufbereiteter Überschuss» deponiert werden müsste. Verschärft wird diese Entwicklung durch das Deponieverbot für Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten von >250ppm. Wie in der Abbildung 6 zu erkennen ist, gelangt kein Ausbauasphalt aus dem Prozess «TRIAGE» in die Deponien. Auf der Inputseite des Prozesses «STRASSEN» ist beim Vergleich der Modellresultate zu erkennen, dass der Materialfluss in die Fundation im Vergleich zum Jahr 2018 aufgrund der leicht geringeren Neubaurate abnimmt. Damit reduziert sich die Aufnahmekapazität für Asphaltgranulate von 1.136 Mio. Tonnen auf 0.949 Mio. Tonnen, was die Problematik zusätzlich verschärft.

4.2 Lagerentwicklung Asphaltbelag

Wie im Kapitel 4.1 aufgezeigt, spielt die Lagerentwicklung eine wesentliche Rolle bei der Interpretation der Modellresultate. In Abbildung 7 ist die Entwicklung des Asphaltlagers in den Strassen für den Zeitraum 1960 bis 2035 für das Szenario «Referenz» dargestellt ⁴.

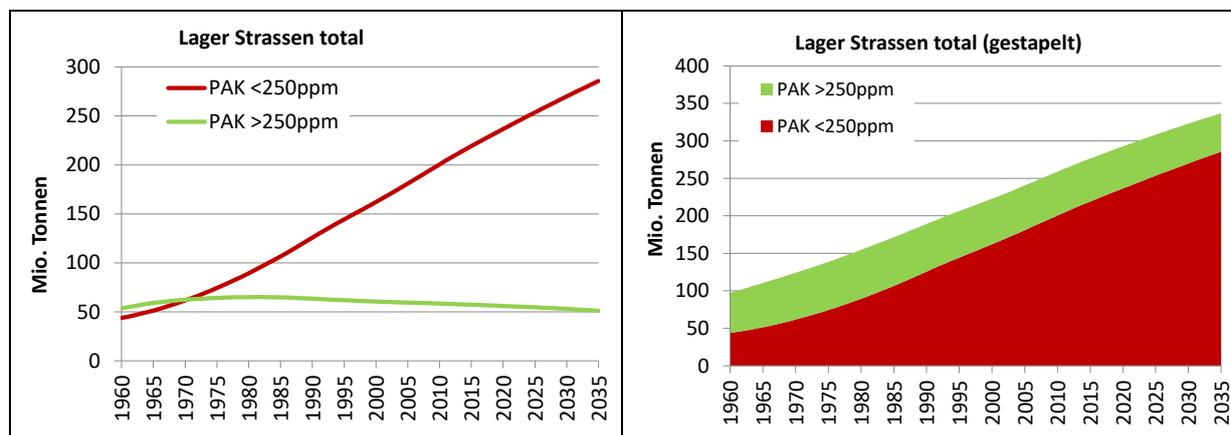


Abbildung 7: Entwicklung der Lager für die einzelnen Materialkategorien (links) und gestapelte bzw. summierte Entwicklung (rechts). Angaben in Millionen Tonnen.

⁴ Die Lagerentwicklung der anderen Szenarien unterscheiden sich nur geringfügig vom Szenario «Referenz».

Das Asphaltlager nimmt von knapp 100 Mio. Tonnen im Jahr 1960 auf etwas mehr als 330 Mio. Tonnen im Jahr 2035 zu (Abbildung rechts). Wird die Entwicklung nach PAK-Gehalten differenziert (Abbildung links), ist erkennbar, dass sich das Lager der PAK-belasteten Beläge mit PAK-Gehalten >250ppm seit den 70er Jahren langsam, aber stetig zurückbildet, währenddessen die Asphaltlager mit PAK-Gehalten <250ppm deutlich ansteigen. Durch die sehr tiefen Erneuerungsraten von durchschnittlich etwas mehr als 1%, reduziert sich das Lager der PAK-belasteten Beläge nur langsam. Deshalb wird auch im Jahr 2035 und danach noch PAK-belasteter Ausbauasphalt anfallen. Die Verweilzeit von Asphalt im Lager beträgt je nach Belagsschicht 30 bis 60 Jahre. Das heisst, dass beispielsweise die Tragschichten, welche im Jahr 1960 eingebaut wurden, erst heute ausgebaut werden (Verweildauer im Lager von 60 Jahren). Die Entwicklung des Asphaltlagers zeigt somit auf, wie sich die Outputflüsse in den kommenden Jahrzehnten entwickeln werden. Diese steigen zeitverschieben in ähnlicher Weise, wie das Lager angewachsen ist, an. Aus diesem Grund wird der Ausbauasphaltfluss in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten weiterhin deutlich ansteigen. Da davon auszugehen ist, dass sich der Asphaltbedarf (Input in Lager) in etwa konstant bis leicht abnehmend entwickeln wird, muss künftig eine immer grössere Menge an Ausbauasphalt aufbereitet und in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Ist dies nicht möglich, muss der Ausbauasphalt deponiert werden.

4.3 Entwicklung der Outputflüsse aus den Strassen

In der Abbildung 8 ist die modellierte Entwicklung der Outputflüsse aus dem Prozess «Strasse» für den Zeitraum 1960 bis 2035 dargestellt. Der Output von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten <250 ppm nimmt von rund 0.6 Mio. t/a im Jahr 1960 auf rund 2.7 Mio. t/a im Jahr 2035 zu. Die Materialflüsse der restlichen Fraktionen nehmen aufgrund des seit Anfang der 90er Jahre unterbundenen Einsatzes von teerhaltigen Bindemitteln nach einem Anstieg zu Beginn des Betrachtungszeitraumes kontinuierlich ab. Die summierten Ausbauasphaltflüsse ergeben für das Jahr 2035 einen totalen Outputfluss von rund 3.16 Mio.t/a (Abbildung 8, rechts).

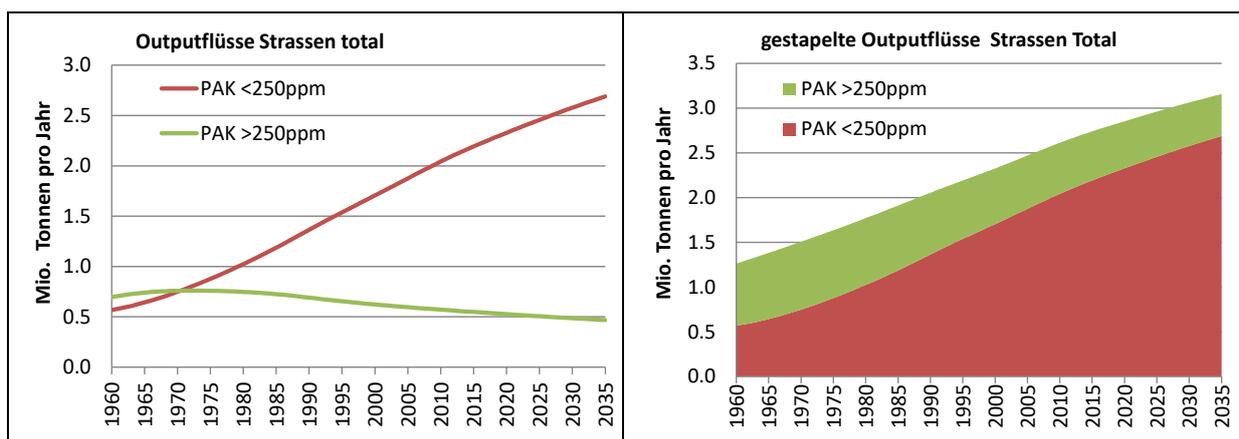


Abbildung 8: Entwicklung der Outputflüsse aus dem Prozess «Strasse». Abbildung links: Zeitliche Entwicklung der Ausbauasphaltmenge mit PAK-Gehalten <250ppm bzw. >250 ppm und gestapelte bzw. summierte Entwicklung (Abbildung rechts). Angaben in Millionen Tonnen pro Jahr.

Die Entwicklung der Outputflüsse ist abhängig vom Strassentyp. In der Abbildung 9 sind die Outputflüsse aus den vier Strassentypen National-, Kantons-, Gemeinde- und übrige Strassen aufgeführt. Während sich die modellierten Outputflüsse bei den National- und Kantonsstrassen

gegen Ende des Betrachtungszeitraums auf leicht abnehmendem bzw. konstantem Niveau bewegen, ist bei den Gemeindestrassen und den übrigen Strassen eine deutlich ansteigende Tendenz festzustellen. Gerade bei diesen beiden Strassentypen liegen die Outputmengen deutlich höher als bei den anderen beiden Strassentypen. Der Ausbausphalt wird deshalb in den kommenden Jahren zu hohen Anteilen aus den Gemeindestrassen und den übrigen Strassen stammen.

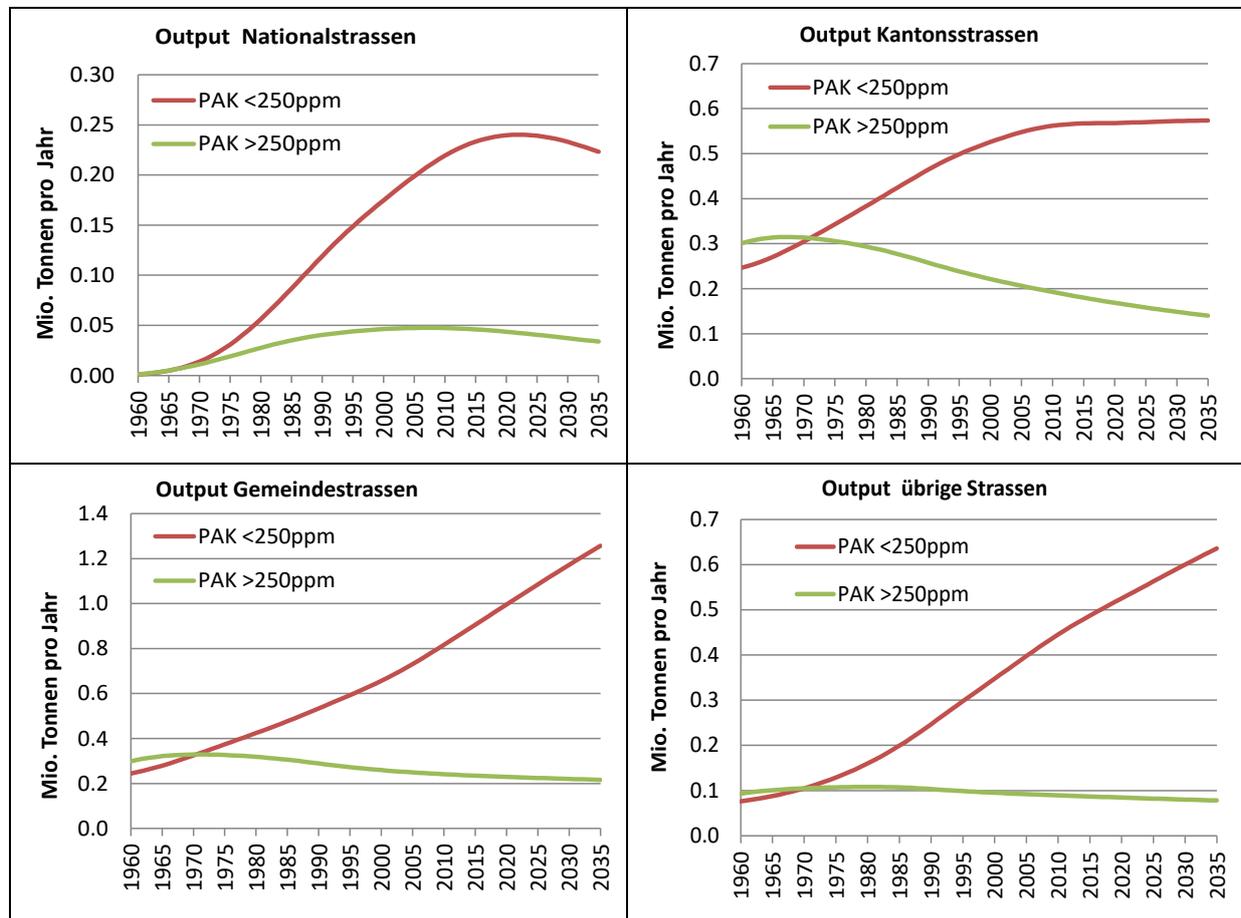


Abbildung 9: Modellierter Entwicklung der Outputflüsse aus den vier Strassentypen National-, Kantons-, Gemeinde- und übrige Strassen von 1960 bis 2035. Ausbausphaltmenge differenziert nach PAK-Gehalten <250ppm bzw. >250 ppm. Angaben in Millionen Tonnen pro Jahr.

4.4 Materialflüsse in die Aufbereitung/Behandlung/Deponien im Szenario REFERENZ

Die Outputflüsse aus den Strassen verteilen sich unter den vorgegebenen Bedingungen des Szenarios REFERENZ auf die drei Entsorgungsprozesse «Aufbereitung», «Behandlung» und «Deponierung». Für die Entwicklung von Massnahmen sind insbesondere Kenntnisse zu den künftig zu deponierenden Ausbausphaltemengen notwendig, falls die heutigen Rahmenbedingungen bis 2035 nicht verändert werden. Das heisst, dass die RC-Anteile in der Mischgutproduktion unverändert bleiben und der Anteil des Ausbausphalts mit PAK-Gehalten >250ppm, der in die Behandlung geht, auf dem heutigen Stand von 25% verbleibt. Einzig die Deponierung der Asphaltbeläge geht im Modell ab dem Jahr 2010 kontinuierlich bis auf 0% zurück, weil das Deponieverbot für PAK-belasteten Ausbausphalt ab 2026 in Kraft treten wird (siehe Szenariendefinition im Kapitel 3.5.1 und 3.5.2).

In der Abbildung 10 ist die Entwicklung der summierten Materialflüsse in die Deponien für den Zeitraum 2000 bis 2035 für das Szenario «REFERENZ» dargestellt. Gemäss diesem Szenario steigt der Materialfluss in die Deponie ab dem Jahr 2020 bis 2035 stark an und erreicht am Ende ein Niveau von knapp 540'000 Tonnen pro Jahr. Dies entspricht einer Zunahme von rund 0.47 Mio. Tonnen gegenüber dem Jahr 2020. Würde das Modell weiter fortgeschrieben, ergäbe sich ein weiterer, leicht abnehmender Anstieg. Der Zunahme ist vorwiegend auf den «Verwertbaren Überschuss», der nicht aufbereitet werden kann, zurückzuführen (rote Fläche).

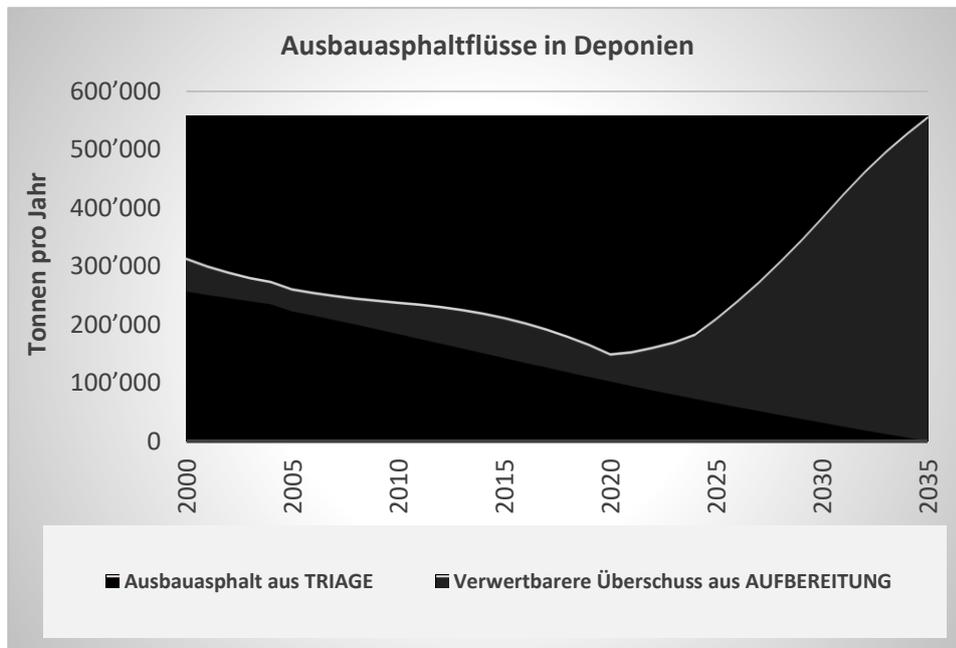


Abbildung 10: Modellierter Entwicklung der gestapelten Materialflüsse in die Deponien für den Zeitraum 2000 bis 2035 in Tonnen pro Jahr. Helle Fläche: Ausbauasphalt aus dem Prozess «TRAIAGE» in die Deponien. Rote Fläche: Ausbauasphalt, der deponiert werden muss, weil zu wenig Verwertungs-kapazitäten zur Verfügung stehen.

Dies wird auch in der Abbildung 11 erkennbar. Die grüne Linie, welche die Entwicklung der aufbereiteten Mengen an Asphaltgranulaten in die Mischgutproduktion bzw. in die Foundation widerspiegelt, nimmt ab dem Jahr 2020 kontinuierlich ab, weil zu wenig Absatzmöglichkeiten für die Asphaltgranulate zur Verfügung stehen. Entweder müsste mehr Ausbauasphalt in die Behandlung gehen oder die RC-Anteile in der Mischgutproduktion und in der Foundation müssten erhöht werden. Zudem steigt der Materialfluss in die Behandlung im Modell kontinuierlich an. In der Realität würde diese Entwicklung mit der Inbetriebnahme von Behandlungsverfahren sprunghaft ansteigen. Diese kann im Modell nicht abgebildet werden.

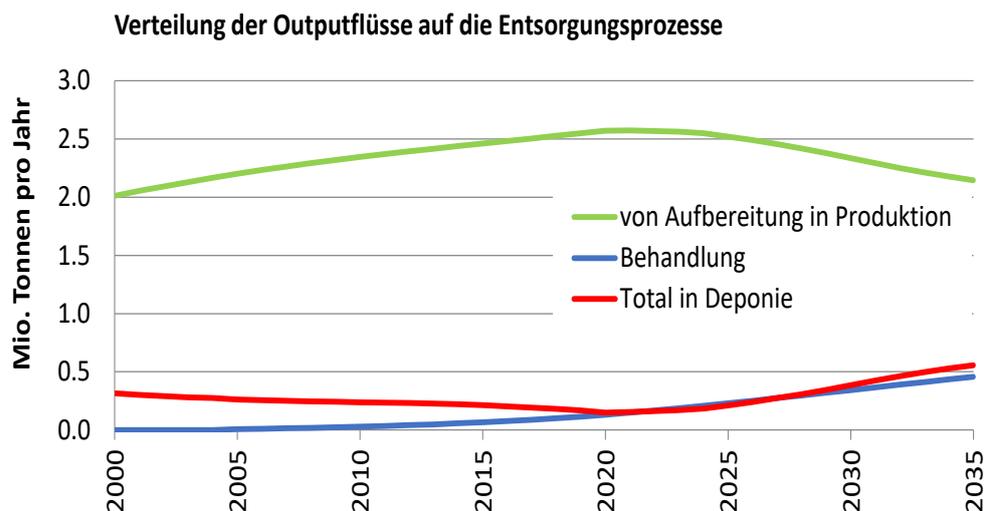


Abbildung 11: Modellierter Entwicklung der Ausbauasphaltflüsse in die drei Entsorgungsprozesse Aufbereitung (grüne Linie), Behandlung (blaue Linie) und Deponierung (rote Linie) für den Zeitraum 2000 bis 2035. Angaben in Mio. Tonnen pro Jahr.

Wie stark müssten nun die RC-Anteile erhöht werden, um sämtlichen anfallenden Ausbauasphalt einer Verwertung zuzuführen?

Um diese Fragestellung zu beantworten, sind in der Abbildung 12 die Entwicklungen des totalen RC-Anteils (Belag und Foundation) im Szenario Referenz (grüne Linie) und die des RC-Anteils, der notwendig wäre, um sämtlichen anfallenden Ausbauasphalt einer Verwertung bzw. Behandlung zuzuführen (rote Linie), einander gegenübergestellt⁵.

⁵ Berechnung der notwendigen RC-Anteile (rote Linie): Summe Ausbauasphaltanfall aus Strassen dividiert durch totalen Asphaltinput in die Strassen in Prozenten.

Berechnung des Anteils des verwerteten Asphalts (grüne Linie): Summe der Asphaltmengen in die Mischgutproduktion, Foundation und Behandlung dividiert durch totalen Asphaltinput in die Strassen in Prozenten.

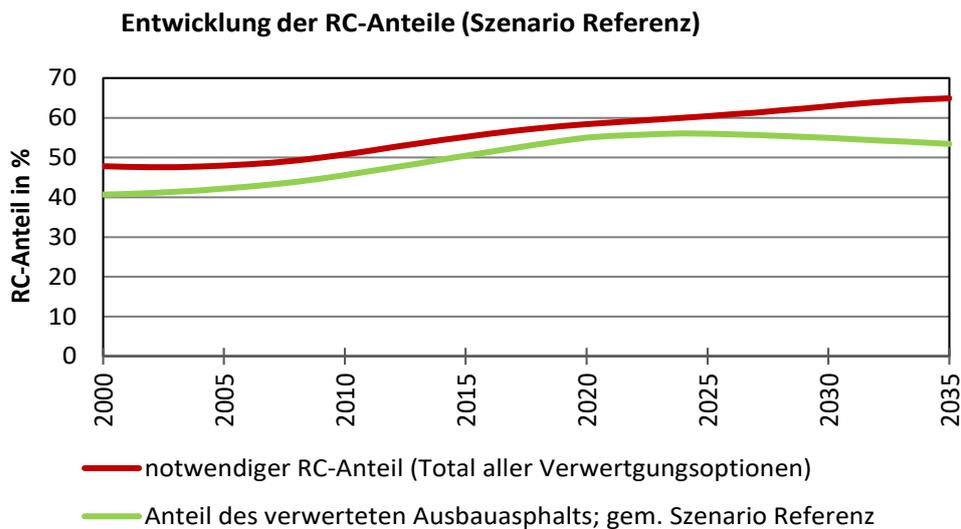


Abbildung 12: Modellierter Entwicklung des totalen RC-Anteils im Belag und in der Foundation im Szenario Referenz (grüne Linie) und die Entwicklung des RC-Anteils, der notwendig wäre, um sämtlichen anfallenden Ausbausphalt einer Verwertung bzw. Behandlung zuzuführen (rote Linie).

Bis zum Jahr 2020 nähern sich die beiden Linien an, was bedeutet, dass das Recyclingpotenzial zu diesem Zeitpunkt beinahe vollständig ausgeschöpft wird. Danach bewegen sich die Linien auseinander. Während der RC-Anteil aus genannten Gründen stetig zunehmen müsste (rote Linie), reduziert sich der RC-Anteil ab 2020 aufgrund des abnehmenden Asphaltbedarfs leicht (grüne Linie). Der notwendige RC-Anteil liegt gemäss diesem Modellszenario im Jahr 2035 bei 65%. Im Szenario «Referenz» wird jedoch nur ein Anteil von 53% erreicht.

4.5 Vergleich der Resultate aus den Szenarienrechnungen

Für die vorliegende Studie wurden die vier im Kapitel 3.5.2 definierten Szenarien gerechnet. Dabei interessiert insbesondere der Vergleich der Entwicklung der szenarioabhängigen Materialflüsse in die Entsorgungsprozesse.

In der Abbildung 13 sind die zeitlichen Entwicklungen der Materialflüsse in die Aufbereitung, Behandlung und in die Deponien für die vier Szenarien dargestellt. In der Grafik oben links sind die szenarioabhängigen Entwicklungen der Materialflüsse in die **Asphaltaufbereitung bzw. in die Produktion** aufgeführt. Gut zu erkennen ist, dass das Szenario REFERENZ und das Szenario «nF;maxREC» nahe beieinander liegen. Bei beiden Szenarien beginnt der «Knick» in der Kurve zwischen 2018 und 2020 (Begründung siehe Kapitel 4.4). Werden keine Asphaltgranulate in die Foundation geführt (Szenario «Ref, nF»; rote Linie), schwindet ab dem Jahr 2016 die Abnahmekapazität für die Asphaltgranulate. Sie nimmt von 2.5 Mio. Tonnen im Jahr 2016 auf rund 1.2 Mio. Tonnen im Jahr 2035 ab. Die Entwicklung des Szenarios «nF, maxREC + BH» (grüne Linie) liegt zwischen den oben erwähnten Szenarien, weil der Ausbausphalt vermehrt in die Behandlung geht (Grafik rechts). Zwar geht auch bei diesem Szenario kein Asphaltgranulat in die Foundation, die RC-Anteile in der Mischgutproduktion entsprechen jedoch dem Szenario «nF, maxREC».

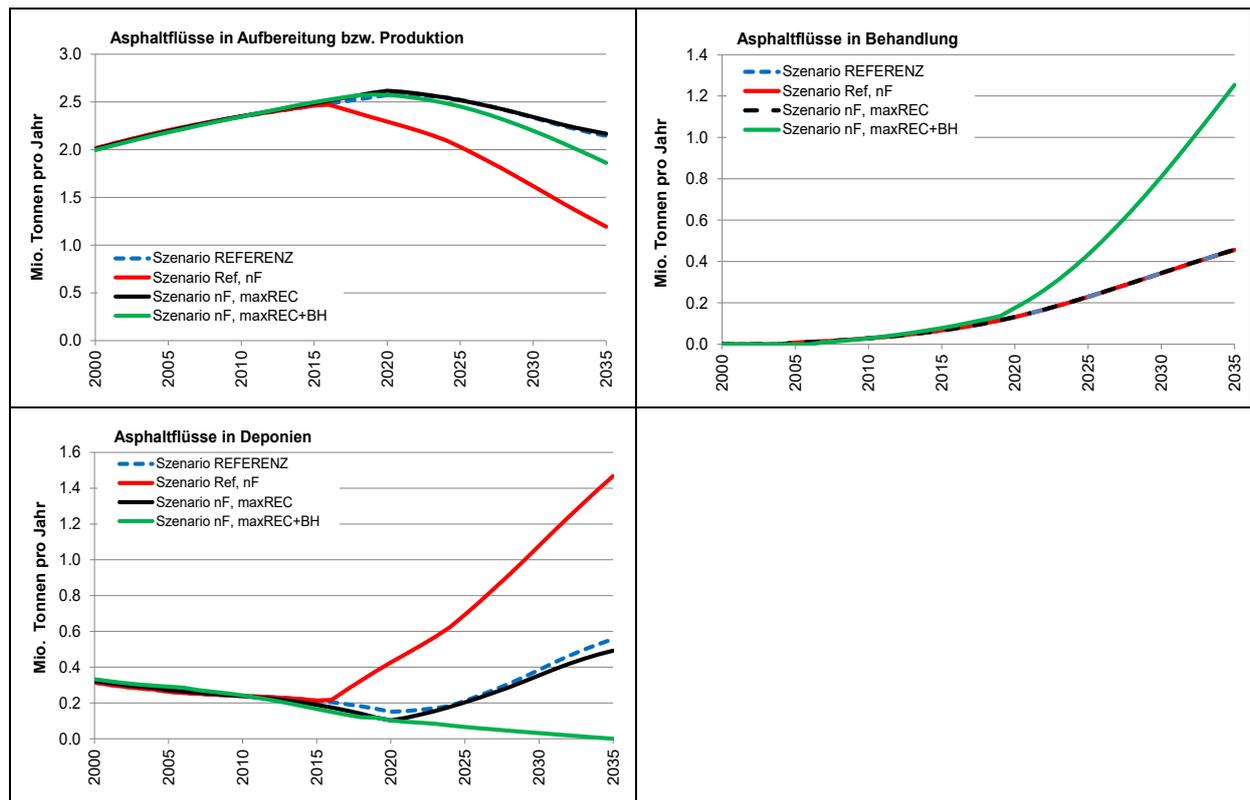


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung der Materialflüsse in die **Aufbereitung** für das Szenario «REFERENZ», Szenario «Referenz, aber keine Asphaltgranulate in Foundation (nF)», Szenario «nF und maximales Recycling (Sz nF; maxREC)» sowie das Szenario «nF; maximales Recycling + Behandlung (Sz nF; maxREC+BH)» (oben links), in die **Behandlung** (oben rechts) und in die **Deponie** (unten).

Die szenarienabhängigen Entwicklungen der Materialflüsse in die **Behandlung** sind in der Grafik oben rechts dargestellt. Die Entwicklung der Materialflüsse verläuft für die ersten drei Szenarien beinahe gleichförmig, weshalb die Linien übereinander liegen. Die Materialflüsse in die Behandlung steigen zwischen 2020 und 2035 von 132'000 t/a (2025) auf 457'000 t/a an (2035). Im Szenario «nF, maxREC+BH» (grüne Linie) steigt der Materialfluss in die Behandlung ab 2019 stark an und erreicht im Jahr 2035 ein Niveau von 1.25 Mio. t/a.

Die szenarienabhängigen Materialflüsse in die **Deponien** unterscheiden sich je nach Szenario stark voneinander. Die Entwicklung des Materialflusses im Szenario «REFERENZ» (Grafik unten, blau gestrichelte Linie) entspricht der im Kapitel 4.4 bereits thematisierten Entwicklung. Würde kein Asphaltgranulat in die Foundation gelangen, steigt der Materialfluss in die Deponie bis zum Jahr 2035 auf 1.47 Mio. t/a an (rote Linie). Würden jedoch gleichzeitig die zulässigen RC-Anteile in der Mischgutproduktion gem. Szenario «nF, maxREC» erhöht, reduziert sich der Anstieg bis 2035 auf 0.49 Mio. t/a (schwarze Linie). Dies bedeutet, dass die Erhöhung der RC-Anteile allein nicht genügen würden, um den Stoffkreislauf zu schliessen. Würden jedoch zusätzliche Behandlungskapazitäten von über 1.25 Mio. t/a zur Verfügung stehen (Szenario «nF, maxREC+BH»), müsste im Jahr 2035 kein Ausbauasphalt deponiert werden, da neben dem Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten >250ppm auch jener mit PAK-Gehalten <250ppm behandelt werden könnte.

5 Diskussion

Das Modell zur Beschreibung von szenarienabhängigen Entwicklungen der Asphaltflüsse in der Schweiz bis zum Jahr 2035, bildet eine wichtige Basis, um ein Systemverständnis zum Umgang mit Ausbauasphalt zu entwickeln. Nur wenn alle relevanten Materialflüsse in die langfristige Betrachtung mit einbezogen werden, sind die Zusammenhänge zwischen der Lagerbildung und der durch die Bewirtschaftung der Strassen ausgelösten Materialflüsse zu erkennen. Nachfolgend wird zunächst auf das Modell an sich eingegangen. Daran anschliessend werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz zusammengefasst.

5.1 Modellentwicklung, Möglichkeiten der Anwendung und Systemverständnis

Ein Modell stellt eine Abstraktion eines realen Systems dar. Dabei bestimmt in den meisten Fällen die Fragestellung den Abstraktionsgrad des Modells. Dies setzt wiederum ein gewisses Systemverständnis des Modellentwicklers voraus. Bei der Entwicklung von Materialflussmodellen wird in einem ersten Schritt stets ein statisches Abbild der Systems erstellt (Abbildung 2). Im vorliegenden Fall werden zunächst sämtliche relevanten Asphaltflüsse erfasst. Darauf aufbauend wird das im Kapitel 3 beschriebene, dynamische Modell, welches eine komplexe Struktur aufweist, entwickelt. Die zeitliche Dynamik der Materiallager und -flüsse spielt im vorliegenden Fall eine entscheidende Rolle. Insbesondere deshalb, weil die Verweildauer des Asphalts im Strassenkörper sehr lange ist. Die daraus resultierende Problematik zeigt sich erst, wenn die Materiallager und -flüsse über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten modelliert werden. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich in einem iterativen Entwicklungsprozess ein Systemverständnis aufbauen, welches es ermöglicht, die verschiedenen Fragestellungen zu bearbeiten und die Modellresultate zu interpretieren.

Der hohe Parametrisierungsgrad des vorliegenden Modells bietet die folgenden Möglichkeiten:

- Es kann eine Vielzahl an verschiedenen Szenarien definiert und gerechnet werden. Die hier vorgestellten Szenarien dienen als Beispiele und wurden entsprechend der Fragestellung in diesem Projekt definiert.
- Die Systemabbildung mit Angabe der Asphaltflussmengen kann für ein Bezugsjahr und ein Szenario automatisch generiert werden (siehe Beispiel Abbildung 5).
- Die zeitliche Entwicklung der Asphaltlager und -flüsse kann jeweils für ein Szenario grafisch dargestellt werden.
- Das vorliegende Modell ist auf die Ebene Schweiz bezogen. Das Modell kann jedoch auch kantonale oder regionale Asphaltlager und -flüsse rechnen. Dazu müssen mindestens die in der Tabelle A. 3 enthaltenen Daten vorliegen. Zudem müssen diese Modelle kalibriert und validiert werden.
- Anhand der Visualisierung der Materialflüsse können die komplexen Zusammenhänge auch nicht fachkundigen Personen gut aufgezeigt werden.

5.2 Erkenntnisse aus der Modellierung der vier Szenarien

In der jüngsten Vergangenheit sind vermehrt Klagen seitens der Akteure, welche Ausbauasphalt entsorgen müssen, über mangelnde Verwertungsmöglichkeiten zu vernehmen. Die Resultate

aus den Szenarienrechnungen bestätigen diese Aussagen. Die Verwertungskapazitäten sind heute weitgehend ausgeschöpft und der Druck, Ausbauasphalt zu deponieren, nimmt zu. Der Engpass bei der Verwertung wird sich künftig weiter akzentuieren, falls keine zusätzlichen Massnahmen eingeleitet werden. Was sind nun die Gründe für diesen «Entsorgungsnotstand» und unter welchen Voraussetzungen kann der Materialkreislauf geschlossen werden? Nachfolgend werden diese Aspekte anhand der Szenarioanalyse diskutiert:

1. Entwicklung des Asphaltlagers in den Strassen bestimmt die Entwicklung der Outputflüsse

Das Asphaltlager in den Strassen nimmt seit 60 Jahren kontinuierlich zu. Innerhalb dieses Zeitraums ist das Asphaltlager um 230 Mio. Tonnen angewachsen (Kapitel 4.2), was einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 3.8 Mio. Tonnen entspricht. Da die Verweildauer des Asphalts in den Strassen je nach Schicht und Sanierungszyklus 30 – 60 Jahre beträgt, wirkt sich dieses Lagerwachstum in verzögerter Form auf die Outputflüsse aus. Deshalb werden die Outputflüsse in den kommenden Jahren und Jahrzehnten weiter ansteigen. Zu verhindern wäre dies nur, wenn die Sanierungsraten reduziert würden, was das Problem aber nur verzögern würde.

2. Asphaltbedarf entwickelt sich konstant oder nimmt leicht ab

Der Asphaltbedarf bewegte sich im Zeitraum 2010 – 2019 im Bereich von 4.7 bis 5.3 Mio. Tonnen pro Jahr (asphaltsuisse, 2019). Im Modell reduziert sich der Asphaltbedarf bis 2035 bis auf 4.8 Mio. Tonnen pro Jahr leicht, wobei dieser Wert rund 0.2 Mio. t/a tiefer als der Mittelwert des Zeitraums 2010 - 2019 liegt. Das Wachstum der Strassen fand in den vergangenen Jahrzehnten vor allem bei den Gemeindestrassen und den übrigen Strassen statt, was mit der Siedlungsentwicklung und der damit zusammenhängenden Erschliessung mit Strassen zu tun hat. Künftig wird die Verdichtung nach Innen ein zentraler Bestandteil der Siedlungsentwicklung in der Schweiz darstellen. Dies bedeutet, dass weniger auf der grünen Wiese gebaut wird und deshalb weniger Erschliessungen mit Strassen stattfinden werden, was einen entsprechenden Einfluss auf den Asphaltbedarf haben wird.

⇒ Der abnehmende Asphaltbedarf bei gleichzeitig zunehmenden Outputflüssen wird dazu führen, dass künftig mehr Ausbauasphalt deponiert werden müsste, weil entsprechende Verwertungskapazitäten fehlen. Das Szenario «REFERENZ» zeigt, dass der Materialfluss in die Deponie bis 2035 stetig bis auf 540'000 t/a ansteigt (Abbildung 10), falls keine weiteren Massnahmen ergriffen werden.

3. Einsatz von Asphaltgranulaten in loser und gebundener Form in der Foundation

Die Akteure der Entsorgungsbranche äussern oftmals den Wunsch, die Asphaltgranulate vermehrt in loser oder gebundener Form in der Foundation einzusetzen. Diese Strategie bringt zwar eine Entlastung und es ist eine kostengünstige Option. Aus der Nachhaltigkeitsperspektive wird das Problem jedoch auf künftige Generationen verschoben. Zudem ist der Einsatz von Kiessand A bedenklich, weil heute bei dessen Herstellung die Asphaltgranulate meistens mit primärem Kies/Sand vermischt werden. Die Verwertung von Asphaltgranulaten in gebundener Form als Kalt- (KMF) oder Heissmischfundation (ACF), findet vor allem bei Sanierungen von National- und Kantonsstrassen statt und erreicht heute einen Umfang von geschätzten 600'000 t/a (Differenz zwischen Asphaltgranulatfluss in die Foundation in der Abbildung 5 und dem losen Einsatz gem. Tabelle 3). Beim nächsten Sanierungszyklus würde eine entsprechend höhere Ausbauasphaltmenge anfallen. Aus diesem Grund wurde im Szenario «Ref, nF» untersucht, wie sich die Materialflüsse entwickeln, wenn keine

Asphaltgranulate in die Fundation geführt würden. Unter diesen Bedingungen würde der Ausbauasphaltfluss in die Deponie bis zum Jahr 2035 auf knapp 1.47 Mio. t/a ansteigen, was rund 0.91 Mio. t/a mehr sind als im Szenario «REFERENZ» (Abbildung 13 unten). Würde nur der Einsatz in loser Form verboten, läge die Entwicklung des Materialflusses in die Deponie zwischen den Entwicklungen der beiden Szenarien.

4. RC-Anteile in der Mischgutproduktion

In den Normen sind die maximalen RC-Anteile, welche bei der Mischgutproduktion zu berücksichtigen sind, vorgegeben. Diese Limitierung der RC-Anteile in den einzelnen Schichten führt bereits heute dazu, dass einige Mischgutwerke nicht mehr sämtlichen in ihren Einzugsgebieten anfallenden Ausbauasphalt verwerten können. Höhere RC-Anteile würden die Verwertungssituation deutlich verbessern. Dies zeigt das Resultat des Szenarios «nF, maxREC». Zwar müssen auch hier bis zum Jahr 2035 knapp 500'000 Tonnen Ausbauasphalt pro Jahr abgelagert werden. Dies jedoch unter der Voraussetzung, dass keine Asphaltgranulate in die Fundation geführt werden. Falls der gebundene Einsatz in der Fundation weiterhin erlaubt wäre, müsste wohl kein Ausbauasphalt deponiert werden (dieses Szenario wurde in der vorliegenden Studie nicht modelliert).

5. Realisierung von Behandlungsverfahren

Neben dem Deponierungsverbot von Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten von >250ppm ab dem Jahr 2026, steht auch ein entsprechendes Deponieverbot für den Ausbauasphalt mit PAK-Gehalten von <250ppm zur Debatte. Die Diskussion der oben erwähnten Szenarien bzw. die Resultate der Szenarienrechnungen zeigen, dass nur mit der Realisierung von Behandlungsverfahren ein nachhaltiger Materialkreislauf möglich ist (Abbildungen 13 und 14). Sollte sowohl ein Deponieverbot für Ausbauasphalt als auch ein Verbot des Einsatzes von Asphaltgranulaten in der Fundation erlassen werden, müssten bis zum Jahr 2035 Behandlungskapazitäten von insgesamt rund 1.2 Mio. Tonnen pro Jahr zur Verfügung gestellt werden. Wird der gebundene Einsatz von Asphaltgranulaten in der Fundation weiterhin erlaubt, reduziert sich die notwendige Behandlungskapazität um rund die Hälfte auf geschätzte 0.6 Mio. Tonnen pro Jahr.

5.3 Schlussfolgerungen

Der nachhaltige Umgang mit Asphalt bzw. Ausbauasphalt wird künftig eine massive Herausforderung darstellen. Dieses hochwertige Material gehört nicht in die Deponien, sondern muss als Baustoff in den Materialkreislauf zurückgeführt werden. Mit Hilfe des vorliegenden Asphaltmodells können verschiedene Szenarien zur Verwertung von Ausbauasphalt definiert und gerechnet werden. Das Modell erlaubt es, Szenarienrechnungen bis zum Jahr 2035 durchzuführen, womit die längerfristigen Entwicklungen der Asphaltflüsse unter verschiedenen Szenarienbedingungen mit dem Modell dargestellt werden können.

Die hier vorgestellten Szenarien wurden in Zusammenarbeit mit dem BAFU definiert. Sie dienen dazu, Grundlagen für das BAFU zu schaffen, um die Auswirkungen von Massnahmen wie Deponierungsverbote, Verbot des Einsatzes von Kiessand A usw. zu untersuchen. Zudem soll aufgezeigt werden, welchen Einfluss die Realisierung von Behandlungsverfahren in der Schweiz oder im Ausland auf den Materialkreislauf haben kann. Ein nachhaltiger Materialkreislauf, das heisst, ohne langfristigen Lageraufbau von Asphalt in der Fundation, ist nur mit zusätzlichen Behandlungsverfahren möglich.

6 Literaturverzeichnis

- asphaltsuisse (2019). *Jahresbericht 2019*. Zürich: Schweizer Fachverband asphaltsuisse.
- BAFU (2001). Luftschadstoff-Emissionen von Strassenbaustellen – Teil I: PAH und VOC. *Umweltmaterialien Nr. 126*.
- BAFU (2006). Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle. *Umwelt-Vollzug Nr. 0631*. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- BAFU (2014-2018a). Sonderabfallstatistik - Im Inland behandelte Abfälle aus der Schweiz. *Bundesamt für Umwelt, Abteilung Abfall und Rohstoffe*.
- BAFU (2014-2018b). Sonderabfallstatistik - Im Ausland behandelte Sonderabfälle aus der Schweiz (Export). *Bundesamt für Umwelt, Abteilung Abfall und Rohstoffe*.
- BAFU (2016). Bauabfälle in der Schweiz - Tiefbau. *Aktualisierung 2015*. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern.
- BFS (2019). *Längen der National-, Kantons- und Gemeindestrassen in km, 1950 - 2018, Tabelle T 11.3.1.3*. Von Bundesamt für Statistik: BFS-Nummer: je-d-11.03.01.03 abgerufen
- Rubli, S. (2013). *Dynamische Modellierung der Asphalt- sowie PAK-Lager und Flüsse in den Strassen der Region St.Gallen, Thurgau, Zürich und Fürstentum Liechtenstein*. Umweltämter der Kantone St.Gallen, Thurgau, Zürich und des Fürstentums Liechtenstein.

7 Anhang

Tabelle A. 1: Totale Strassenlängen (National- Kantons- und Gemeindestrassen) nach Kantonen bzw. Anteile in % an der Gesamtlänge gemäss der BAFU-Studie «Bauabfälle in der Schweiz – Tiefbau; Aktualisierung 2015» (BAFU, 2016).

Kanton	Strassenlänge in km	Anteil in %
AG	8'805	8.9
AI	267	0.3
BE	24'424	24.6
BL	2'771	2.8
FR	4'174	4.2
GE	1'345	1.4
GR	4'033	4.1
JU	2'661	2.7
LU	5'192	5.2
NW	287	0.3
OW	897	0.9
SG	5'543	5.6
SH	1'621	1.6
SO	3'705	3.7
SZ	1'297	1.3
TG	3'729	3.7
UR	436	0.4
VD	8'299	8.3
VS	3'458	3.5
ZG	842	0.8
ZH	9'086	9.1
Total	92'872	93.4
Kantone ohne Mengenerfassung		
AR	315	0.3
BS	88	0.1
GL	590	0.6
NE	2'615	2.6
TI	2'985	3.0
Total	6'592	6.6

Tabelle A. 2: Modellparameter zur Berechnung der Entwicklung der Materiallager und des Materialoutputs für die verschiedenen Strassentypen.

Grundlagedaten für die Strassen ('Stützpunkte'). Sie werden für die weitere Berechnung in Zeitreihen interpoliert.

	Faktor Reduktion Output		Faktor Reduktion Dicke		Neubausraten	
	Jahr	Faktor	Jahr	Faktor	Jahr	Rate [%]
Nationalstrasse	1960	0.05	1960	0.50	1960	10.52
	2010	0.55	2010	1.00	1990	0.90
	2035	0.45	2035	1.00	2010	0.85
					2035	0.05
Kantonsstrasse	1960	0.58	1960	0.65	1960	0.30
	2010	0.48	2010	1.00	1990	-
	2035	0.45	2035	1.00	2010	-
					2035	-
						-
Gemeindestrasse	1960	0.45	1960	0.65	1960	1.20
	2010	0.38	2010	1.00	1990	0.50
	2035	0.38	2035	1.00	2010	1.40
					2035	0.80
Übrige (Weg, PP)	1960	0.40	1960	0.65	1960	0.90
	2010	0.35	2010	1.00	1990	1.80
	2035	0.35	2035	1.00	2010	1.40
					2035	0.80

Tabelle A. 3: Datengrundlagen zur Berechnung der Materiallager aus den Strassenlängen, Strassenbreiten, Schichtdicken und den Dichten für das Bezugsjahr 2018. In der letzten Spalte sind die Instandsetzungsintervalle für die einzelnen Schichten angegeben, welche als Grundlage zur Berechnung der Materialflüsse verwendet werden.

Berechnung für die Abschätzung der in den Strassen gelagerten Asphaltbeläge und Kies/Sand (in Fundation)												
Berechnung		Aufbau	Verkehrs-	Längen	Breiten	Flächen	Schichtdicke	Bauvol.	Dichte	Lager Asphalt	Lager Fundatio	Instandsetzungsintervalle
Materiallager		Oberbau	lastklassen	m	m	m ²	m	m ³	t/m ³	t	t	Oberbau in Jahren
Nationalstrassen	6-spurig (inkl. 7-sp.)	Deckschicht	T6	103'268	35	3'614'380	0.04	144'575	2.4	346'980		30
		Binderschicht	T6	103'268	35	3'614'380	0.09	325'294	2.4	780'706		40
		Tragschicht	T6	103'268	35	3'614'380	0.12	433'726	2.4	1'040'941		60
		Fundation	T6	103'268	35	3'614'380	0.60	2'168'628	1.6		3'469'805	80
	4-spurig	Deckschicht	T5	1'362'000	23	31'326'000	0.04	1'253'040	2.4	3'007'296		30
		Binderschicht	T5	1'362'000	23	31'326'000	0.09	2'819'340	2.4	6'766'416		40
		Tragschicht	T5	1'362'000	23	31'326'000	0.12	3'759'120	2.4	9'021'888		60
		Fundation	T5	1'362'000	23	31'326'000	0.60	18'795'600	1.6		30'072'960	80
	2-spurig (inkl. 3-sp.)	Deckschicht	T5	286'000	14	4'004'000	0.04	160'160	2.4	384'384		30
		Binderschicht	T5	286'000	14	4'004'000	0.09	360'360	2.4	864'864		40
		Tragschicht	T5	286'000	14	4'004'000	0.09	360'360	2.4	864'864		60
		Fundation	T5	286'000	14	4'004'000	0.60	2'402'400	1.6		3'843'840	80
Total Nationalstr.			1'751'268		38'944'380		32'982'603		23'078'340	37'386'605		
Kantonsstrassen	Deckschicht	T5	18'023'100	7	126'161'700	0.04	5'046'468	2.4	12'111'523		20	
	Binderschicht	T5	18'023'100	7	126'161'700	0.09	11'354'553	2.4	27'250'927		40	
	Tragschicht	T5	18'023'100	7	126'161'700	0.09	11'354'553	2.4	27'250'927		60	
	Fundation	T5	18'023'100	7	126'161'700	0.60	75'697'020	1.6		121'115'232	90	
Gemeindestrassen	Deckschicht	T4	55'164'177	6	330'985'062	0.03	9'929'552	2.4	23'830'924		20	
	Binderschicht	T4	55'164'177	6	330'985'062	0.07	23'168'954	2.4	55'605'490		40	
	Tragschicht	T4	55'164'177	6	330'985'062	0.07	23'168'954	2.4	55'605'490		60	
	Fundation	T4	55'164'177	6	330'985'062	0.50	165'492'531	1.6		264'788'050	90	
Geh- und Radwege (ohne nicht-asphaltierte Wege)	Deckschicht	T1/T2	99'732'739	2.0	199'465'478	0.03	5'983'964	2.4	14'361'514		20	
	Binderschicht	T1/T2	99'732'739	2.0	199'465'478	0.00	0	2.4	0		40	
	Tragschicht	T1/T2	99'732'739	2.0	199'465'478	0.07	13'962'583	2.4	33'510'200		60	
	Fundation	T1/T2	99'732'739	2.0	199'465'478	0.40	79'786'191	1.6		127'657'906	90	
Total Strassen+Wege			172'920'016		656'612'240		424'945'325		249'526'998	513'561'188		
Parkplätze					64'490'000	0.10	6'449'000	2.4	15'477'600		40	
					64'490'000	0.40	25'796'000	1.6		41'273'600	90	
Total				174'671'284		695'556'620		490'172'928	2.2	288'082'938	592'221'392	

Tabelle A. 4: Modellparameter: Definition der zeitabhängigen Entwicklung der Bindemittelzusammensetzung.

Bindemittel IMPORT (dh NEU)	Anteil PAK		Total (muss = 100 sein)
	<250	>250	
1960	45.0	55.0	100
1970	71.0	29.0	100.00
1980	84.5	15.5	100.00
1990	99.0	1.0	100.00
2010	100.0	0.0	100.00
2020	100.0	0.0	100.00
2035	100.0	0.0	100.00

