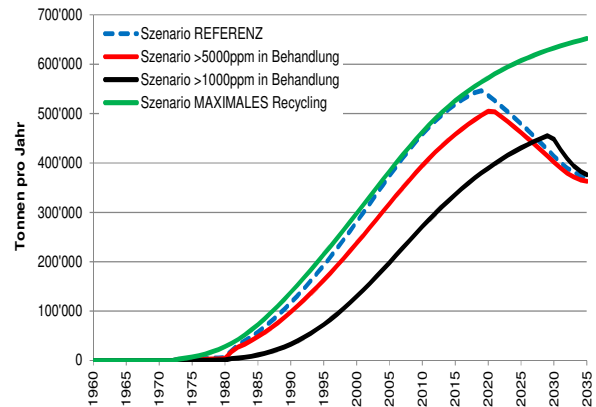
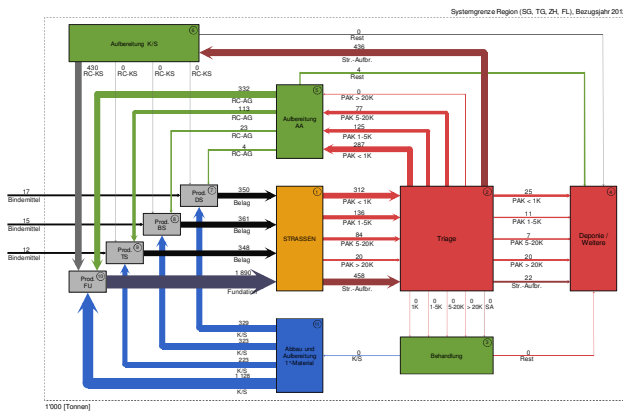




Dynamische Modellierung der Asphalt- sowie PAK-Lager und Flüsse in den Strassen der Region St.Gallen, Thurgau, Zürich und Fürstentum Liechtenstein



Überregionale Betrachtung

Juni 2013

Energie- und Ressourcen-Management GmbH
 Alter Zürichweg 21
 CH-8952 Schlieren
 Tel.: 044 371 40 90
 rubli@energie-ressourcen.ch
 www.energie-ressourcen.ch



Impressum

Bericht

Dr. Stefan Rubli, Energie- und
Ressourcen-Management GmbH,
8952 Schlieren

Projektgruppe

Dr. Stefan Rubli, Energie- und
Ressourcen-Management GmbH,
Rolf Wagner und Dr. Elmar Kuhn (AWEL)
Martin Eugster (AfU Kanton Thurgau),
Daniela Marugg (Amt für Umwelt und Energie,
Kanton St.Gallen)
Sven Bürzle (AfU Fürstentum Liechtenstein)

Bezug

In den Umweltämtern der St.Gallen,
Thurgau, Zürich und des Fürstentums
Liechtenstein

Zürich, Juni 2013



Vorwort

PAcKen wir's an!

Die Thematik des (PAK-)haltigen Ausbauasphalts (Arbeitnehmerschutz beim Heissmischverfahren, Verwertungsengpässe) sorgt schon seit Jahren für intensive Diskussionen. Die verfahrenere Situation hat dazu geführt, dass auf eine Regelung auf Verordnungsstufe im Rahmen der ChemRRV-Revision 2008 verzichtet wurde. Erneut steht im Rahmen der TVA-Totalrevision der Versuch an, den Umgang mit PAK-haltigem Ausbauasphalt rechtlich zu regeln.

Damit wir gezielt Einfluss auf die Lenkung der Ausbauasphaltflüsse nehmen können, müssen wir mehr über die aktuellen und künftigen Stoffströme wissen. Mittels eines Modells wurden daher die aktuellen und künftigen Ausbauasphaltmengen, das erwartete Potential für die Verwertung des Ausbauasphalts sowie die notwendigen finanziellen Mittel für die Entsorgung- und Verwertungslösungen beurteilt. Im Rahmen von Szenarien wurden einige mögliche Entwicklungen berechnet und visualisiert.

Die Kantone St. Gallen, Thurgau und Zürich sowie das Fürstentum Liechtenstein haben sich an der Modellentwicklung beteiligt und eine Modellierung für ihre Region vorgenommen. Quasi als Schlussdokument wurden die Regionen dieser vier Partner integrierend betrachtet, und ebenfalls im vorliegenden Bericht dargestellt.

Das Modell soll nun als Grundlage bei der Entwicklung von Lösungsansätzen und der Haltung der Kantone im Hinblick auf den langfristigen Umgang mit Ausbauasphalt dienen. Den kantonalen Tiefbauämtern und Umweltfachstellen wie auch mehreren Bundesstellen kommt hier eine wesentliche Bedeutung zu.

Kantonale Abfallfachstellen der Kantone St. Gallen, Thurgau und Zürich

Abfallfachstelle des Fürstentums Liechtenstein

Zusammenfassung

Ausgangslage

Die heute noch empfohlene Beimischung von PAK-belasteten Ausbauasphaltgranulaten mit Gehalten von 5'000 – 20'000 ppm PAK im Bindemittel (PAK: Polyaromatische Kohlenwasserstoffe) in der Mischgutproduktion wird voraussichtlich in der revidierten TVA (Technische Verordnung über Abfälle) aus Gründen des Arbeitnehmerschutzes für das Heissmischverfahren gemäss aktuellem Vorschlag des BAFU nicht mehr zugelassen. Als alternative Entsorgungsoptionen verblieben somit die Deponierung, eine breitere Anwendung des Kaltmischverfahrens und die thermische Behandlung (gemäss Vorschlag des BAFU) oder nasschemische Behandlung dieser Fraktion. Da künftig das Schliessen der Materialkreisläufe bei der Bewirtschaftung des Bauwerks Strasse immer schwieriger sein dürfte, bietet die thermische oder nasschemische Behandlung, neben der Vernichtung toxischer oder krebserregender PAK, die Möglichkeit, die Gesteinskörnungen in anderen Anwendungen wieder einzusetzen. Die Abfallfachstellen der Kantone St. Gallen, Thurgau, Zürich und des Fürstentums Liechtenstein haben aus diesem Grund ein Projekt mit folgender Zielsetzung lanciert:

- Entwicklung eines datengestützten Modells, mit dem die in den Strassen gelagerten Mengen an PAK-haltigen Belägen abgeschätzt werden können.
- Modellierung der Entwicklung der jährlich als Ausbauasphalt anfallenden Mengen bis 2035.
- Das Modell soll in der Lage sein, die Entwicklung der Materialflüsse in die mechanische Aufbereitung, die thermische Behandlung und die Deponierung szenarioabhängig abzubilden.
- Modellierung der Entwicklung der mit der Entsorgung verbundenen Kosten.
- Die Modellrechnungen sollen für jeden Kanton und über die gesamte Region durchgeführt werden. Es soll nach den folgenden „PAK-Klassen“ differenziert werden:
 - kleiner 1'000 ppm (d. h. „unbelasteter“ Belag)
 - 1'000 – 5'000 ppm
 - 5'000 – 20'000 ppm
 - grösser 20'000 ppm

Resultate

Die Modellierung im Szenario REFERENZ (nur Aufbereitung und Deponierung, keine Behandlung), welches in etwa die heutige Situation in der betrachteten Region widerspiegelt, ergibt für das Jahr 2012 ein Asphaltlager im Umfang von rund 45 Mio. Tonnen. Dieses wird unter den im Szenario definierten Rahmenbedingungen bis ins Jahr 2035 auf rund 58 Mio. Tonnen ansteigen. Insgesamt werden gemäss dem Szenario jährlich rund 1,06 Mio. Tonnen Mischgut produziert. Der Materialbedarf (Kies/Sand) für die Fundation liegt bei knapp 1,9 Mio. Tonnen pro Jahr (t/a). Der Anfall an Ausbauasphalt aus dem Bauwerk Strasse beträgt mit rund 550'000 t/a rund die Hälfte des Mischgutinputs. Somit wächst das Materiallager heute noch immer stark. Rund 57% des anfallenden Ausbauasphalts weist eine PAK-Belastung von weniger als 1'000 ppm im Bindemittel auf. Weitere 25% liegen im Bereich von 1'000 - 5'000 ppm. Mit jährlich 84'000 Tonnen

fallen rund 15% des Ausbausphalts mit PAK-Gehalten von 5000 – 20'000 ppm an. Die restlichen 20'000 t/a (rund 3%) werden aufgrund der hohen PAK-Belastung von über 20'000 ppm deponiert.

Die Ausbausphaltemengen mit PAK-Gehalten <1'000 ppm werden von heute rund 310'000 t/a auf rund 460'000 t/a im Jahr 2035 zunehmen, währenddessen die restlichen Asphaltfraktionen mit höheren PAK-Belastungen bis 2035 langsam aber kontinuierlich abnehmen. Diese Entwicklung hat entsprechende Auswirkungen auf die Entsorgungskosten. Diese werden im Szenario REFERENZ von rund 16 Mio. Franken im Jahr 2012 auf 20 Mio. Franken ansteigen, wobei der Anteil der Kosten für die Entsorgung der Fraktion PAK <1000 ppm von heute rund 50% bis zum Jahr 2035 auf rund 65% zunehmen wird.

Insgesamt wurden vier Szenarien gerechnet und miteinander verglichen. Dabei zeigt sich, dass bei einer allfälligen Einführung der thermischen Behandlung weitere Massnahmen wie die Erhöhung der RC-Anteile in der Produktion notwendig sind, um ein nachhaltiges Baustoffmanagement bei der Bewirtschaftung unserer Strassen zu erreichen. Im Szenario MAXIMALES Recycling, in dem sehr hohe Recyclinganteile in der Produktion vorausgesetzt werden, kann gezeigt werden, dass bei hohen RC-Anteilen in der Produktion das anfallende Asphaltgranulat im betrachteten Zeitraum und unter den getroffenen Annahmen beinahe vollständig rezykliert werden kann. Allerdings auf Kosten eines Überschusses an Strassenaufbruch, weil dieser vermehrt durch Asphaltgranulate substituiert wird. Zudem wird das Problem mit dem massiven Einbau von Asphaltgranulaten in die Fundation (in diesem Szenario werden 80% in die Fundation eingebaut werden) in die Zukunft verschoben.

Aus Sicht des Materialkreislaufes müsste deshalb längerfristig zusätzlich ein Teil der Ausbausphalfracation mit PAK-Gehalten unter 1'000 ppm thermisch oder chemisch behandelt werden. Die daraus entstehende Gesteinskörnung könnte dann zwar teilweise wieder in die Asphaltproduktion zurückgeführt werden, aus Materialflusssicht ist aber nur der Einsatz in anderen Anwendungen wie beispielsweise als Kiesersatz in loser oder gebundener Form im Hoch- oder Tiefbau sinnvoll. Der Zeitpunkt der Umsetzung dieser Massnahme dürfte von der künftigen Preis- und Kostenentwicklung der verschiedenen Entsorgungsoptionen abhängig sein. Heute erscheint es aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll, diese schwach belasteten Fraktionen thermisch zu behandeln. Sollten künftig die Deponiepreise ansteigen, könnte die thermische Behandlung dieser Fraktion durchaus zum Thema werden.

Folgerungen

Mit den nun vorliegenden Material- bzw. Stoffflussmodellen können die diversen Fragestellungen, welche sich im Zusammenhang mit der Entwicklung einer umfassenden Strategie für die Verwertung von Ausbausphalt ergeben, auf einer relativ fundierten Basis bearbeitet werden. Zudem lassen sich mit Hilfe des Modells die zeitlichen Entwicklungen sämtlicher für die Bewirtschaftung der Strassen relevanten Materialflüsse berechnen, womit der gesamte Materialkreislauf im Modell im Zeitraum zwischen 1960 bis 2035 berücksichtigt ist. Durch den Einbezug der Entsorgungspreise sind zudem erste Aussagen zur Kostenentwicklung möglich.

Die Szenarioanalyse zeigt auf, dass auf langfristige Sicht weder ausschliesslich die thermische Behandlung noch die Erhöhung der RC-Anteile in den Produktionsprozessen zum Ziel führen wird. Die Kombination dieser beiden Massnahmen wird die erfolgreichste Strategie sein.



Den Auftrag gebenden Umweltämtern steht mit dem entwickelten Modell ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die Auswirkungen der oben erwähnten und weiteren Massnahmen proaktiv untersucht werden können. Durch den Einbezug des gesamten Materialkreislaufs in das Modell werden die Anwender ihr Systemverständnis deutlich verbessern können. Dieses bildet wiederum die Grundlage, um Massnahmen zur Steuerung der Materialflüsse zu definieren.



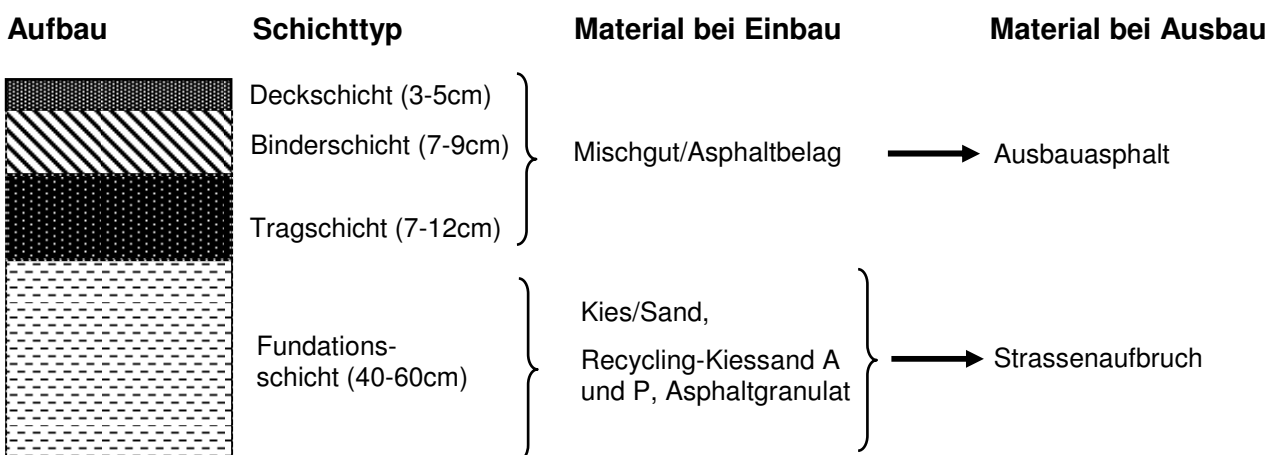
INHALTSVERZEICHNIS

1	AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG	9
1.1	Ausgangslage	9
1.2	Zielsetzung	9
2	MODELLGRUNDLAGEN	11
2.1	Modellaufbau	11
2.1.1	Modellierung des Materiallagers	12
2.1.2	Parametrisierung des Modells hinsichtlich des Prozesses «Strasse»	12
2.1.3	Parametrisierung hinsichtlich der PAK-Lager und Flüsse	15
2.1.4	Transferkoeffizienten im Triageprozess	16
2.1.5	Parametrisierung des Moduls „Entsorgungskosten“	17
2.2	Kalibrierung und Validierung des Modells	17
2.3	Definition der Szenarien	19
3	RESULTATE	22
3.1	Resultate zur überregionalen Betrachtung (SG, TG, ZH und FL) für das Szenario REFERENZ	22
3.1.1	Vergleich der Materialflüsse im Szenario REFERENZ für die Jahre 2012 und 2035	22
3.1.2	Lagerentwicklung im Szenario REFERENZ	24
3.1.3	Entwicklung der Outputflüsse im Szenario REFERENZ	24
3.1.4	Entwicklung der Entsorgungskosten im Szenario REFERENZ	27
3.2	Vergleich der Resultate aus den Szenarienrechnungen im überregionalen Modell	28
3.3	Vergleich der Entsorgungskosten im überregionalen Modell	31
4	DISKUSSION	32
4.1	Die wichtigsten Erkenntnisse	32
4.1.1	Modellspezifische Aspekte	32
4.1.2	Erkenntnisse aus den Modellierungen	32
4.2	Schlussbemerkungen	36
5	LITERATUR	37
	ANHANG	38

Glossar/Definitionen

ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
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	Polyaromatische Kohlenwasserstoffe
ppm	parts per million
PAK <1K	Fraktion mit PAK-Gehalt kleiner 1'000 ppm im Bindemittel
PAK 1-5K	Fraktion mit PAK-Gehalt zwischen 1'000 – 5'000 ppm im Bindemittel
PAK 5-20K	Fraktion mit PAK-Gehalt zwischen 5'000 – 20'000 ppm im Bindemittel
PAK >20K	Fraktion mit PAK-Gehalt grösser 20'000 ppm im Bindemittel
RC	Recycling
Schottertränkung	Schotterschicht mit bituminösem Bindemittel (früher oft stark teerhaltig) als Tragschicht in älteren Strassen.
SFA	Stoffflussanalyse
TVA	Technische Verordnung über Abfälle

Schematischer Aufbau des Strassenoberbaus



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

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Die heute noch empfohlene Beimischung von PAK-belasteten Ausbauasphaltgranulaten mit Gehalten von 5'000 – 20'000 ppm PAK im Bindemittel (Polyaromatische Kohlenwasserstoffe) in der Mischgutproduktion soll in der revidierten TVA (Technische Verordnung über Abfälle) aus Gründen des Arbeitnehmerschutzes für das Heissmischverfahren voraussichtlich nicht mehr zugelassen werden. Diese Fraktion soll gemäss einem Vorschlag des BAFU (Bundesamt für Umwelt) einer thermischen oder nasschemischen Behandlung zur Vernichtung der PAK zugeführt werden, was gleichzeitig die Verwertung der Gesteinskörnung ermöglichen würde.

Das Schliessen der Materialkreisläufe im Bereich der Bewirtschaftung des Bauwerks Strasse dürfte in Zukunft immer schwieriger werden. Aus diesem Grund bietet die thermische oder nasschemische Behandlung, neben der Vernichtung toxischer oder krebserregender PAK, die Möglichkeit, die Gesteinskörnungen in anderen Anwendungen wieder einzusetzen. Auf Basis dieser Hypothese möchten die Abfallfachstellen der Kantone St. Gallen, Thurgau, Zürich und des Fürstentums Liechtenstein im Rahmen der Modellierungen prüfen, welche Auswirkungen eine allfällige thermische oder nasschemische Behandlung der Asphaltbeläge mit PAK-Gehalten von 1'000 – 5'000 ppm auf den gesamten Materialkreislauf haben kann.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen der hier vorgestellten Studie soll mittels eines datengestützten Modells gezeigt werden, welche Mengen an PAK-haltigen Belag heute in den Strassen der an der Studie teilnehmenden Kantone lagern und welche Mengen bis zum Jahr 2035 jährlich als Ausbauasphalt in die Entsorgung gelangen. Vorzugsweise sollen diese Modellrechnungen für jeden Kanton und über die gesamte Region durchgeführt werden. Zu unterscheiden sind dabei die folgenden „PAK-Klassen“:

- Kleiner 1'000 ppm (d. h. „unbelasteter“ Belag)
- 1'000 – 5'000 ppm
- 5'000 – 20'000 ppm
- Grösser 20'000 ppm

Die durch die vollständige Beseitigung der PAK-haltigen Beläge zusätzlich anfallenden Kosten sollen basierend auf den Ergebnissen der modellierten Material- bzw. Stoffflüsse abgeschätzt werden, damit sich die Kantone (Budget, Logistik) und Industrie (Planungen, Anlagenbau) ein Bild über die finanziellen Auswirkungen einer solchen Entsorgungsstrategie machen können. Sofern es die bestehenden statistischen Daten zulassen, soll auf Basis der Ergebnisse der Modellierungen beurteilt werden können, ob eine Beseitigung bzw. Behandlung des Ausbauasphalts ab 5'000 ppm oder bereits ab 1'000 ppm zweckmässig wäre.

Konkret sollen die folgenden Ziele verwirklicht werden:

- Entwicklung des Modells.
- Validierung des Modells (mit kantonalen Tiefbauämtern und ASTRA).



- Modellierung der Materiallager, der Materialflüsse und der Kosten für jeden Kanton und für ganze Region.
- Mit dem Modell sollen Szenarienrechnungen möglich sein.
- Das Modell steht den Kantonen bei Bedarf zur Verfügung.

2 Modellgrundlagen

2.1 Modellaufbau

Um die Entwicklung der PAK-Flüsse möglichst realitätsnah zu modellieren, ist ein komplexer Modellaufbau notwendig. Einerseits ist eine Differenzierung nach Strassentypen notwendig. Andererseits muss der Strassenaufbau mit den unterschiedlichen Belagsschichten ins Modell einfließen. Schliesslich werden für die Bestimmung der PAK-Lager und Flüsse die oben erwähnten vier PAK-Belastungsklassen definiert und im Modell entsprechend berücksichtigt.

Die Grundzüge des Modells lassen sich anhand einer vereinfachten Darstellung in Abbildung 1 erklären.

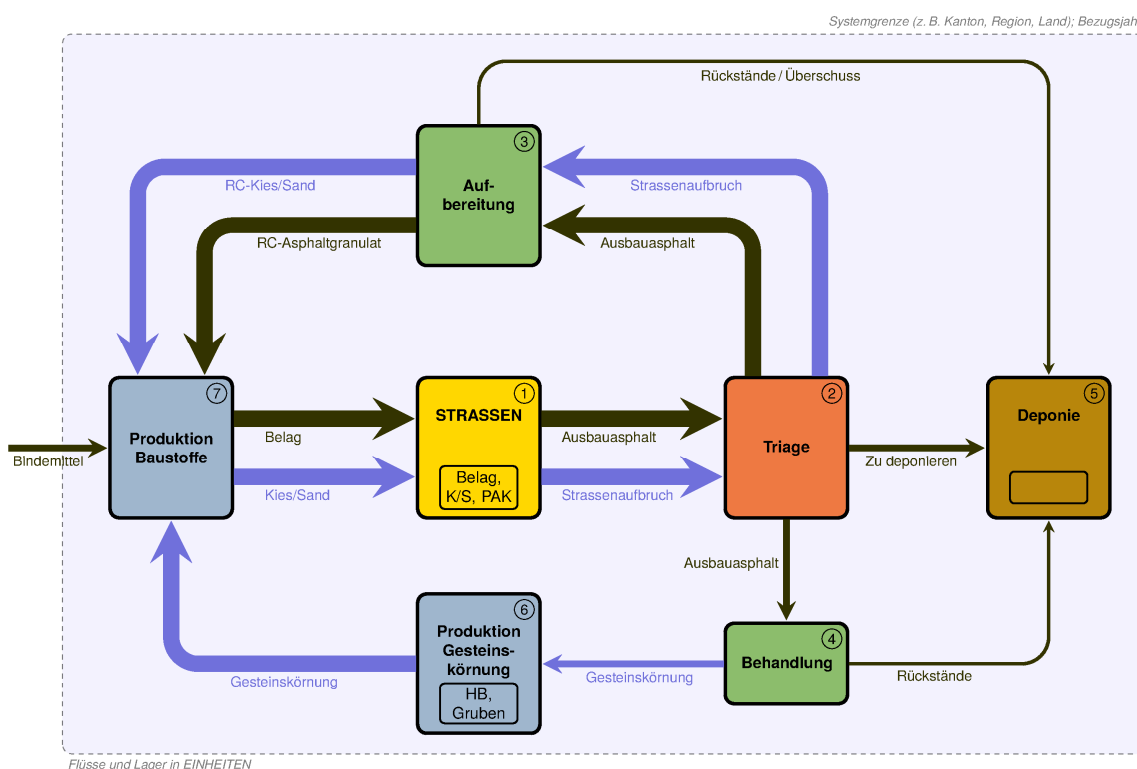


Abbildung 1: Vereinfachtes System zur Erfassung und Modellierung der Materialflüsse (Mischgut, Kies für Fundation, Ausbausphalt und Strassenaufbruch).

Insgesamt werden zur Beschreibung des Systems sieben Prozesse (Kästchen) definiert. Die Material- und Stoffflüsse zwischen den Prozessen sind jeweils als Pfeile dargestellt. Der Prozess «Strassen» ist von zentraler Bedeutung, weil hier die Materiallager abgeschätzt und ausgehend von den Lagerbeständen mittels der Neubau-, Erneuerungs- und Rückbauraten die entsprechenden Materialflüsse abgeleitet werden. Die Outputflüsse aus dem Prozess «Strassen» gelangen in den Triageprozess. Hier werden Ausbausphalt und Strassenaufbruch entweder den Prozessen der mechanischen «Aufbereitung» oder der thermischen oder chemischen «Behandlung» zugeführt. Der Rest des anfallenden Materials aus den «Strassen» gelangt in die «Deponie». Im Prozess «Aufbereitung» werden Asphaltgranulate und RC-Kies/Sand für die Baustoffproduktion, d.h. für die Mischgut- und Kiesproduktion für die Fundation hergestellt. 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. Hier ist zu bemerken, dass der Begriff «Deponie» auch die nicht gesetzeskonforme Entsorgung wie beispielsweise der Einsatz von PAK-belasteten Granulaten in Wald- und Feldwegen oder der Einsatz PAK>20'000 ppm im Kaltmischverfahren (z.B. im Kanton St. Gallen gemäss Beschluss der BPUK-Ost vom April 2007) usw. beinhaltet.

Um einen vertieften Einblick in die Struktur des Modells zu gewährleisten, wird nachfolgend detaillierter auf die Modellinhalte eingegangen:

2.1.1 Modellierung des Materiallagers

Der Prozess «Strasse» beinhaltet sogenannte Subprozesse, welche den vier Strassentypen «Nationalstrassen», «Kantonsstrassen», «Gemeindestrassen» und «Übrige Strassen» (asphaltierte Privatstrassen, Geh- und Radwege¹ sowie Parkplätze) entsprechen. Jeder Strassentyp verfügt über einen für ihn spezifischen Aufbau (Deck-, Binder- und Tragschicht sowie die Foundationsschicht) mit jeweils unterschiedlichen Schichtdicken (siehe auch Abbildung im Kapitel Glossar/Definitionen). Über die aus statistischen Erhebungen bekannten Strassenlängen und -breiten lassen sich die heute in den Strassen gelagerten Materialvolumen abschätzen. Mit den eingesetzten Materialdichten können die Materiallager in Tonnen umgerechnet werden. Als Datengrundlage dienen die Angaben zu den Strassenlängen für den Zeitraum 1980 – 2011 (gegliedert nach Kantonen) bzw. 1950 – 2011 (für die Schweiz) des Bundesamtes für Statistik (BFS 2012 a + b). Die Strassenlängen der asphaltierten Geh- und Radwege wurden aus einer Erhebung des Bundesamtes für Umwelt entnommen (BAFU 2008).

Insgesamt werden somit 4 Strassentypen mit jeweils 4 Schichten und 5 Materialfraktionen (4 Bindemittelfraktionen je nach PAK-Gehalt, 1 Fraktion „Kies/Sand“), insgesamt also $4 \times 4 \times 5 = 80$ Materiallager alleine im Prozess «Strasse» modelliert. Dazu kommen die weiteren Prozesse im System. Das Modell ist somit von grosser Komplexität.

2.1.2 Parametrisierung des Modells hinsichtlich des Prozesses «Strasse»

Um die Entwicklung der Materiallager abbilden zu können, wird vom Istzustand des Lagers im Jahr 2011 ausgegangen. Zunächst wird die historische Lagerentwicklung bis ins Jahr 1960 rückwärts modelliert, indem die Neubauraten für jeden Strassentyp in den Jahren 1960, 1990, 2010 eingesetzt werden (Tabelle 1). 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 mittels einer kubischen Splinefunktion 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 2 ist die vorgegebene Entwicklung der Strassenlängen, differenziert nach Strassentyp für den Zeitraum 1960 bis 2035 angegeben. Zur Kalibrierung der Entwicklung werden die im Kapitel 2.1.1 erwähnten statistischen Datengrundlagen zu den Strassenlängen verwendet. Die eingesetzten Neubauraten werden dabei so angepasst, dass die modellierten Längen für bestimmte Jahre mit den statistischen Angaben optimal übereinstimmen.

Ebenfalls in den Neubauraten berücksichtigt ist das Breitenwachstum der Strassen. Insbesondere bei den Kantons- und Gemeindestrassen sowie bei den «Übrigen Strassen» ist dieser Zuwachs relativ gross. In der Statistik des BFS (BFS 2012a) ist bei den Kantons- aber vor allem bei den Gemeindestrassen kaum ein Längenwachstum in den letzten 20 bis 30 Jahren ausgewiesen. Bei den Gemeindestrassen ist aber davon auszugehen, dass dies nicht zutreffen kann, weil die Siedlungsentwicklung in diesem Zeitraum einem starken Wachstum unterworfen war. Auch die Arealstatistiken weisen darauf hin, dass die Strassenflächen in diesem Zeitraum gewachsen sind. Aus diesem Grund wurde im Modell ein im Vergleich zu den Daten der BFS-Statistiken stärkeres Wachstum bei den Kantons- und insbesondere bei den Gemeinde- und übrigen Strassen angenommen.

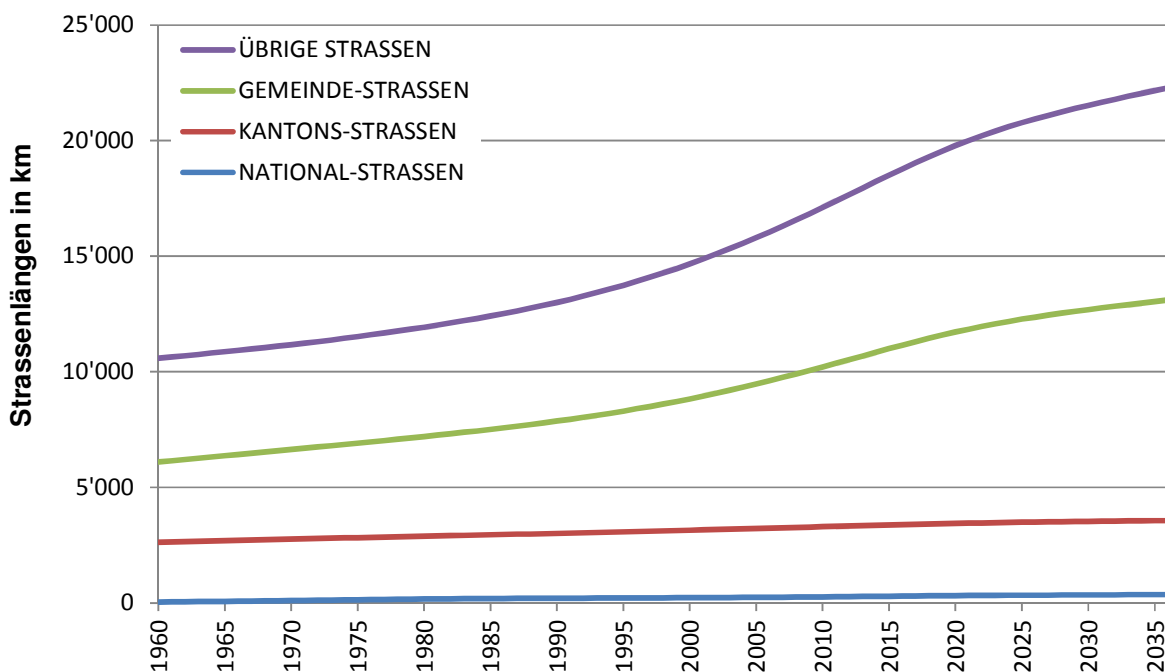


Abbildung 2: Vorgegebene Entwicklung der Strassenlängen in der betrachteten Region.

Da vom Istzustand des Materiallagers ausgegangen wird, muss zusätzlich die zeitliche Veränderung der vier Schichtdicken des Strassenaufbaus berücksichtigt werden. Diese Veränderung wird ebenfalls in der Tabelle 1 in der Spalte «Faktor Reduktion Dicke» definiert. Der Wert von 0.50 bei den Nationalstrassen für das Jahr 1960 bedeutet beispielsweise, dass die Schichtdicke im Jahr 1960 im Vergleich zu heute um durchschnittlich 50 % kleiner war. Auch hier

¹ In den asphaltierten Geh- und Radwegen sind auch die Parkplätze enthalten. Dieser Strassentyp wird im Modell auch als „Übrige Strassen“ bezeichnet.



werden die Werte, wie bei allen eingesetzten Parametern, im Modell als Stützwerte für die kubischen Splinefunktionen verwendet.

Die Outputflüsse aus dem Prozess «Strasse» werden unter anderem mittels den Eingabewerten in der Spalte „Faktor Reduktion Output“ in der Tabelle 1 bestimmt. Dieser Faktor bezieht sich auf den jeweiligen Inputfluss in den Prozess «Strasse» des entsprechenden Jahres. Der Faktor von 0.50 im Jahr 1960 bei den Kantonsstrassen bedeutet beispielsweise, dass der Outputfluss in diesem Jahr 50 % des Inputflusses entspricht, wobei sich der Inputfluss aus dem Materialbedarf für den Neubau und die Erneuerung (Unterhalt) zusammensetzt. Die Kalibrierung und Validierung der Input- und Outputflüsse erfolgt über die bekannten Produktionszahlen und die Angaben zum Ausbausphaltenanfall in den verschiedenen Kantonen.

Tabelle 1: Im Excel-Blatt „GL_Str“ werden die Modellparameter für die für Entwicklung der Strassen in der betrachteten Region (SG, TG, ZH, FL) eingegeben. Die in der Tabelle eingesetzten Parameterwerte werden für das Referenzszenario verwendet.

	<u>Faktor Reduktion Output</u>		<u>Faktor Reduktion Dicke</u>		<u>Neubauraten</u>	
	<u>Jahr</u>	<u>Faktor</u>	<u>Jahr</u>	<u>Faktor</u>	<u>Jahr</u>	<u>Rate [%]</u>
Nationalstrasse						
	1960	0,05	1960	0,50	1960	10,52
	2010	0,58	2010	1,00	1990	0,98
	2035	0,68	2035	0,95	2010	1,88
					2035	0,05
Kantonsstrasse						
	1960	0,50	1960	0,65	1960	0,50
	2010	0,58	2010	1,00	1990	0,40
	2035	0,68	2035	0,95	2010	0,39
					2035	0,03
Gemeindestrasse						
	1960	0,42	1960	0,65	1960	0,78
	2010	0,49	2010	1,00	1990	0,70
	2035	0,59	2035	0,99	2010	1,13
					2035	0,13
Übrige (Weg, PP)						
	1960	0,34	1960	0,65	1960	0,50
	2010	0,41	2010	1,00	1990	0,61
	2035	0,51	2035	0,99	2010	1,08
					2035	0,14



2.1.3 Parametrisierung hinsichtlich der PAK-Lager und Flüsse

Die Modellierung der PAK-Lager bedingt eine weitere Differenzierung im Modell. Da die durchschnittlichen PAK-Gehalte in den einzelnen Belagsschichten nicht bekannt sind, werden alternativ vier Klassen mit unterschiedlichen Bereichen von PAK-Gehalten definiert. Es handelt sich dabei, wie bereits oben erwähnt, um die PAK-Klassen kleiner als 1'000 ppm, 1'000 – 5'000 ppm, 5'000 – 20'000 ppm und grösser als 20'000 ppm.

Die zeitliche Entwicklung der PAK-Lager und Flüsse wird im Modell in der Weise berücksichtigt, dass jeweils bei den Bindemittelimporten/-produktion die Zusammensetzung Tabelle 2 und bei der Baustoffproduktion die Recyclinganteile gegliedert nach den verschiedenen PAK-Klassen als Modellparameter für die Jahre 1960, 1980, 1990, 2010 und 2035 vorgegeben werden (Tabelle 3). Als Datengrundlage dienen die BAFU-Publikation aus dem Jahr 2001 (BAFU 2001) und eigene Abschätzungen zu den eingesetzten Anteilen an Teeren im zeitlichen Verlauf (diese ergeben Teeranteile von zwischen 20 – 35% im Zeitraum 1960 bis 1991). Die geschätzten Anteile in der Tabelle 2 wurden zudem mit Spezialisten des Tiefbauamtes des Kantons Zürich und des ASTRA (Bundesamt für Strassen) diskutiert. Deren Rückmeldungen sind im Modell berücksichtigt (siehe auch Kapitel 2.2).

Tabelle 2: Im Excel-Blatt „GL_Belag_und_RC“ wird die zeitabhängige Bindemittelzusammensetzung definiert.

	Anteil PAK < 1K	Anteil PAK 1-5K	Anteil PAK 5-20K	Anteil PAK > 20K	Total (muss = 100 sein)
Bindemittel IMPORT (dh NEU)					
1960	3,0	42,0	50,0	5,0	100
1970	10,0	50,0	20,0	20,0	100,00
1980	30,0	55,0	10,0	5,0	100,00
1990	80,0	19,0	1,0	0,0	100,00
2010	100,0	0,0	0,0	0,0	100,00
2020	100,0	0,0	0,0	0,0	100,00
2035	100,0	0,0	0,0	0,0	100,00

Die Summe der RC-Anteile in der Tabelle 3 ergibt zudem den totalen Anteil der RC-Asphaltgranulate und RC-Kies im Inputstrom in den Prozess «Strasse». Die Entwicklung der Material- und PAK-Lager sowie der Materialflüsse wird wiederum mittels kubischer Splinefunktionen, welche durch die oben erwähnten Punkte führen, interpoliert. Wichtig bei der Interpretation der Tabelle 3 ist, dass mit dem Eintrag der RC-Anteile jeweils der maximal mögliche Anteil für die Mischgut- und Kiesproduktion definiert wird (siehe Pfeil von Aufbereitung in Baustoffproduktion in der Abbildung 1).

Sollte aus der Aufbereitung weniger RC-Material vorhanden sein, werden die vorgegebenen Anteile nicht erreicht. Ist jedoch mehr RC-Material vorhanden, dann wird das RC-Granulat im Modell jeweils bis zum maximal definierten Anteil in den einzelnen Schichten eingesetzt, wobei bei der Schicht mit der tiefsten Qualitätsanforderung (Foundation) begonnen wird. Sobald der maximal definierte Anteil 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 RC-Material vorhanden sein, dann wird dieser im Modell in den Prozess «Deponie» geführt. (Abbildung 1: Pfeil von der Aufbereitung in die Deponie). Der Einsatz von RC-Asphaltgranulat erfolgt im Modell somit kaskadenartig von der Fundation mit den geringsten qualitativen Anforderungen bis zur Deckschicht mit den höchsten materialtechnischen Anforderungen.

Tabelle 3: Im unteren Tabellenteil des Excel-Blatts „GL_Belag_und_RC“ werden die maximalen Anteile der RC-Asphaltgranulate und RC-Kies/Sand an der jeweiligen Baustoffproduktion differenziert nach den verschiedenen Schichten (hier für das Referenzszenario) eingetragen. In der letzten Spalte ist jeweils der totale RC-Anteil aufsummiert, er darf nicht grösser als 100 sein.

Anteil RC-Produkte (total)		Anteil PAK	Anteil PAK	Anteil PAK	Anteil PAK	Anteil	
		< 1K	1-5K	5-20K	> 20K	RC-K/S	Total
Deckschicht							
0%	1960	0	0	0	0	0	0
0%	1980	0	0	0	0	0	0
0%	1990	0	0	0	0	0	0
5%	2010	2	2	1	0	0	5
5%	2035	3	1	1	0	0	5
Binderschicht							
0%	1960	0	0	0	0	0	0
0%	1980	0	0	0	0	0	0
10%	1990	2	5	3	0	0	10
30%	2010	12	11	7	0	0	30
30%	2035	17	8	5	0	0	30
Tragschicht							
0%	1960	0	0	0	0	0	0
0%	1980	0	0	0	0	0	0
10%	1990	2	5	3	0	0	10
60%	2010	25	22	13	0	0	60
60%	2035	33	17	10	0	0	60
Fundation							
0%	1960	0,0	0,0	0	0	20	20
0%	1980	0,0	0,0	0	0	50	50
10%	1990	3,1	6,9	0	0	60	70
20%	2010	10,5	9,5	0	0	80	100
20%	2035	13,3	6,7	0	0	80	100

2.1.4 Transferkoeffizienten im Triageprozess

Die aus dem Prozess «Strassen» anfallenden Outputflüsse gelangen in den Triageprozess. Bei diesem Prozess handelt es sich um einen virtuellen Verteilungsprozess. In der Praxis findet die Triage bereits auf der Baustelle oder teilweise bei den Aufbereitungsunternehmen statt. Im Modell kann diese Verteilung mittels sogenannter Transferkoeffizienten festgelegt werden. Diese beschreiben, wie gross die jeweiligen Anteile der Materialflüsse in die nächsten Prozesse sind: Z.B. 30 % des anfallenden Materials geht in den Prozess «Aufbereitung».

In den Tabelle 6 bis 9 im Anhang sind die Transferkoeffizienten für die vier gerechneten Szenarien aufgeführt. Die Szenarien werden weiter unten detailliert beschrieben. In den mit weisser Farbe hinterlegten Zellen in den Spalten „Aufbereitung“ und „Behandlung“ werden die

jeweiligen Materialflussanteile, welche in diese Prozesse fliessen sollen, eingetragen. Wie bei den bereits vorgestellten Parametern, wird auch hier wieder nach Zeit bzw. Jahren und nach PAK-Klassen differenziert. Beträgt die Summe aus der Aufbereitung und Behandlung weniger als 1, so gelangt die verbleibende Differenz zwischen 1 und der Summe in die Deponie². Die Summe aus allen Entsorgungsprozessen ergibt somit den Wert 1 (siehe letzte Spalte in der Tabelle).

Wichtige Bemerkung: Die aus den in den Tabelle 6 bis 9 eingetragenen Transferkoeffizienten hervorgehenden Materialflüsse in den Aufbereitungsprozess stehen potenziell für den Einsatz in der Produktion zur Verfügung (siehe vorheriger Abschnitt). Effektiv gelangt aber nur so viel Material in die Produktion, wie tatsächlich benötigt wird. Dieser Bedarf ergibt sich einerseits aus dem im Modell berechneten Materialbedarf für den Neubau und die Erneuerung (Unterhalt) und andererseits aus den in der Tabelle 2 festgelegten maximalen RC-Anteilen in der Baustoffproduktion. Übersteigt der Materialfluss in die Aufbereitung den Asphaltgranulatbedarf für die Produktion, gelangt der resultierende Überschuss im Modell unaufbereitet in die Deponie.

2.1.5 Parametrisierung des Moduls „Entsorgungskosten“

Das Modell soll in der Lage sein, die Entwicklung der Entsorgungskosten in Abhängigkeit von der gewählten Entsorgungsstrategie abzubilden. Dies wird erreicht, indem in einem weiteren Parametereingabeblatt die Entwicklung der Entsorgungspreise für die einzelnen Entsorgungsprozesse, differenziert nach PAK-Klassen und Jahren, eingetragen wird. In der Tabelle 10 im Anhang sind die Entsorgungspreise bzw. deren zeitabhängige Entwicklung beispielhaft aufgeführt. Diese Werte dienen wiederum als Stützstellen für die Berechnung der jährlichen Werte mittels kubischer Splinefunktionen.

Auch hier können verschiedene Szenarien gerechnet werden. Im vorliegenden Projekt wurden in allen Szenarien die gleichen Entsorgungspreise eingesetzt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Hier ist beizufügen, dass bei der Kostenbetrachtung allfällige Gutschriften bei den Produzenten nicht bzw. nicht vollständig berücksichtigt sind.

2.2 Kalibrierung und Validierung des Modells

In den vorangegangenen Kapiteln wurde erläutert, welche Modellparameter in das Modell einfließen. Die Wahl der Parameterwerte basiert auf den zur Verfügung stehenden Daten, auf Abschätzungen und auf verschiedenen Angaben von Spezialisten der Tiefbauämter. Zudem stehen Angaben zu den Produktionsdaten und angenommenen Ausbauasphaltfraktionen von den Produzenten zur Verfügung (Bürzle 2013, Gubler 2012, Klein 2012, Kunz 2012, Sauter 2012) Diese werden durch die Angaben der Umweltämter zur Entsorgung der entsprechenden Abfälle ergänzt (Bürzle 2013, Eugster 2012, Marugg 2013, Winzeler 2012).

² In den Tabellen 6 - 9 ist jeweils die dritte Spalte mit Deponie/Weitere bezeichnet. Unter dem Begriff „Weitere“ ist die nicht gesetzeskonforme Entsorgung zusammengefasst (z.B. Einsatz von PAK-belasteten Granulaten in Wald- und Feldwegen, Einsatz von Asphaltgranulat mit PAK-Gehalt grösser 20'000ppm im Kaltmischverfahren usw.).



Mittels eines iterativen Vorgehens werden die verschiedenen Modellparameter so angepasst, dass diese möglichst gut mit den zur Verfügung stehenden Daten übereinstimmen. Die vorhandenen Daten dienen somit der Kalibration des Modells (Tabelle 10 im Anhang).

In einem weiteren Schritt wurden die Modelle validiert. Dies geschah einerseits auf qualitative Weise, indem die jeweiligen Modelle den Spezialisten der Tiefbauämter und des ASTRA vorgestellt und die eingesetzten Modellparameter diskutiert wurden. Andererseits stellten die Tiefbauämter Daten zu den Bohrkernanalysen für eine quantitative Validierung des Modells zur Verfügung. Dabei konnten insgesamt über 9'000 Bohrkernanalysen ausgewertet und zur Validierung der PAK-Flüsse aus den Strassen verwendet werden. Die Auswertung erfolgte durch das Zuordnen der Analysedaten zu den entsprechenden PAK-Belastungskategorien und nachfolgende Aufsummierung der Anzahl Analysen pro Belastungskategorie. Daraus wird anschliessend die Verteilung der Stichproben berechnet.

In der Tabelle 4 sind diese Verteilungen für die drei Kantone und das Fürstentum Liechtenstein in den mittleren Spalten aufgeführt. Im Kopf der Spalte ist jeweils die Anzahl ausgewerteter Analysen angegeben. In der letzten Spalte sind zum Vergleich die Verteilungen der im Modell berechneten Stoffflüsse auf die vier Belastungskategorien «PAK <1'000ppm», «PAK 1'000 – 5'000ppm» bzw. «PAK 0 – 5'000ppm», «PAK 5'000 – 20'000ppm» und «PAK >20'000ppm» angegeben.

Tabelle 4: Vergleich der Verteilungen PAK-Fraktionen gemäss der Auswertung der Bohrkernanalysen beziehungsweise aufgrund der im Modell berechneten Ausbausphaltflüsse.

Kanton Zürich

	Auswertung Bohrkerne (n = 8616)	Modell
Verteilung der PAK	in Prozent	in Prozent
PAK <1'000ppm		55,7
PAK 1'000 - 5'000ppm		25,5
Summe PAK 0 - 5000ppm	82,0	81,2
PAK 5'000 - 20'000ppm	12,4	15,0
PAK >20'000ppm	5,6	3,8

Kanton Thurgau

	Auswertung Bohrkerne (n = 150)	Modell
Verteilung der PAK	in Prozent	in Prozent
PAK <1'000ppm		42,1
PAK 1'000 - 5'000ppm		31,5
Summe PAK 0 - 5000ppm	63,8	73,6
PAK 5'000 - 20'000ppm	24,8	21,8
PAK >20'000ppm	11,4	4,6

Kanton St. Gallen

Vergleich	Auswertung Bohrkerne (n = 197)	Modell
Verteilung der PAK	in Prozent	in Prozent
PAK <1'000ppm		48,0
PAK 1'000 - 5'000ppm		29,1
Summe PAK 0 - 5000ppm	71,6	77,1
PAK 5'000 - 20'000ppm	21,3	18,5
PAK >20'000ppm	7,1	4,4

Fürstentum

Liechtenstein

	Auswertung Bohrkerne (n = 141)	Modell
Verteilung der PAK	Prozent	Prozent
PAK <1'000ppm		62,0
PAK 1'000 - 5'000ppm		22,5
Summe PAK 0 - 5000ppm	82,3	84,5
PAK 5'000 - 20'000ppm	10,6	12,3
PAK >20'000ppm	7,1	3,2

Die Übereinstimmung der Verteilungen zwischen den Bohrkernanalysen und der im Modell abgeleiteten Verteilung ist relativ gut. Einzig im Kanton Thurgau bestehen deutlichere Unterschiede. Diese Werte basieren auf Analysen aus dem Zeitraum 2010 – 2012. Im Jahr 2010 ergab die Auswertung ungewöhnlich hohen Anteile von 45,2 % für die Fraktion «PAK 5'000 – 20'000ppm» und 25,0% für die Fraktion «PAK >20'000ppm». Werden nur die Werte aus den Jahren 2011 und 2012 verwendet, dann resultiert die folgende Verteilung: Anteil «PAK 0 – 5'000ppm» = 76,2%; Anteil «PAK 5'000 – 20'000ppm» gleich 17,1 und Anteil «PAK

>20'000ppm» gleich 6,7%. Damit ergäbe sich auch für den Kanton Thurgau eine bessere Übereinstimmung.

Interessant ist, dass die Unterschiede der Verteilung bei den Kantonen bzw. dem Fürstentum Liechtenstein sowohl in der Auswertung als auch im Modell festzustellen sind. Was einer zusätzlichen Validierung des Modells entspricht. Im Modell liegen die Anteile der Fraktion «PAK >20'000ppm» immer tiefer als bei den Bohrkernauswertungen. Ein möglicher Grund könnte sein, dass bei der Auswertung der Bohrkernkerne auch die sogenannten „Schottertränkungen“ mit einbezogen sind. Dies führt zu einem erhöhten Anteil der hoch belasteten Fraktion bei den ausgewerteten Bohrkernanalysen.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass die von den Kantonen angegebenen Mengen bzw. Anteile der entsorgten Fraktion «PAK >20'000ppm» deutlich tiefer liegen als jene in der Tabelle 4. Der Unterschied ist damit zu erklären, dass aufgrund der Resultate der Bohrkernanalysen bei den Sanierungsarbeiten die Schichten mit hohen PAK-Belastungen aus Kostengründen oft nicht ausgetauscht werden.

Leider lassen die Daten keine weitere Differenzierung nach den Belastungskategorien «PAK <1'000ppm» und «PAK 1'000 – 5'000ppm» zu, weshalb diese Kategorien zusammengefasst wurden. Allerdings dürften die angegebenen Modellwerte für die beiden Belastungskategorien «PAK <1'000ppm» und «PAK 1'000 – 5'000ppm» aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen dem Modell und der Auswertung der Bohrkernanalysen bei den ausgewerteten Kategorien relativ repräsentativ sein.

2.3 Definition der Szenarien

Bevor die Szenarien definiert werden, muss gewährleistet sein, dass die aus der Modellierung des Prozesses «Strasse» hervorgehenden Lagerbestände und Materialflüsse bzw. PAK-Flüsse mit den vorhandenen Datengrundlagen kalibriert und validiert (siehe Kapitel 2.2) sind. Ist dies der Fall, dann sollten die entsprechenden Parameter nicht mehr geändert werden (Parameter in den Excel-Blättern „GL_Str_2010“, „GL:Str“; GL_div“ und oberste Tabelle im Excel-Blatt „GL_Belag_und_RC“).

Die erwähnten Modellparameter werden für das regionale Modell aus den Modellparametern der Kantonsmodelle abgeleitet, indem die jeweiligen Modellparameter der Kantone mit den entsprechenden Strassenlängen anteilmässig gewichtet und anschliessend zu den korrespondierenden regionalen Modellparametern aufaddiert werden.

Mit dem Modell lässt sich eine Vielzahl an verschiedenen Szenarien rechnen. In der vorliegenden Studie interessiert insbesondere die Frage, welchen Einfluss die Erweiterung der thermischen Behandlungskapazitäten für den PAK-belasteten Ausbauasphalt auf die Materialflüsse im System und auf die Entsorgungskosten hat. Um diese Fragestellungen zu bearbeiten, werden die vier Szenarien «REFERENZ», «BEHANDLUNG >5000ppm», «BEHANDLUNG >1000ppm» und «MAXIMALES RECYCLING» definiert und gerechnet. Damit die Konsistenz und Vergleichbarkeit gewährleistet ist, werden für die drei Kantone, das Fürstentum Liechtenstein und für die gesamte Region jeweils die gleichen vier Szenarien gerechnet.

Nachfolgend sind die Szenarien kurz beschrieben:

Szenario REFERENZ:

In diesem Szenario werden die maximalen RC-Anteile in der Baustoff- bzw. 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 **20%** für die Jahre 2010 und 2035³

Wichtig beim Referenzszenario ist, dass kein Materialfluss in die Behandlung geht und die Fraktionen <20'000 ppm ab 2010 zu sehr hohen Anteilen (≥ 90%) in die Aufbereitung fliessen. Beläge mit PAK-Gehalten >20'000 ppm werden zu 100% deponiert.

Szenario PAK >5'000ppm in BEHANDLUNG:

In diesem Szenario werden die gleichen RC-Anteile wie im Szenario REFERENZ eingesetzt. **Die Fraktionen mit einem PAK-Gehalt von grösser 5000ppm werden einem thermischen oder chemischen Behandlungsprozess zugeführt.**

Szenario PAK >1'000ppm in BEHANDLUNG:

In diesem Szenario werden die gleichen RC-Anteile wie im Szenario REFERENZ eingesetzt. **Die Fraktionen mit einem PAK-Gehalt von grösser 1000ppm werden einem thermischen oder Behandlungsprozess zugeführt.**

Szenario MAXIMALES Recycling:

In diesem Szenario werden die folgenden RC-Asphaltgranulatanteile für die Jahr 2010 und 2035 eingesetzt:

RC-Anteil Deckschicht: 20%

RC-Anteil Binderschicht: 50%

RC-Anteil Tragschicht: 80%

RC-Anteil Foundation: 80%⁴

³ In der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle des BAFU gilt für RC-Kiessand A ein maximaler Anteil von 20%. Zudem dürfen Asphaltgranulate unter Einschränkungen als Planiermaterial unter bituminöser Deckschicht eingesetzt werden. Ein Einsatz des Asphaltgranulates ohne Deckschicht ist nur möglich, wenn die Schichtstärke maximal 7 cm beträgt und das Granulat gewalzt wird. In diesem Szenario wird ein maximaler RC-Asphaltgranulatanteil von 20% in der Foundation eingesetzt.

⁴ Bei der Foundation wird aus modelltechnischen Gründen kein Unterschied zwischen dem gebundenen und losen Einsatz gemacht.

Die PAK-belasteten Asphaltfraktionen im Output werden gleich entsorgt wie im Referenzszenario. Das heisst, die Ausbauasphaltfraktion mit PAK-Gehalten >20'000 ppm wird deponiert.

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind zur besseren Übersicht die in den vier Szenarien definierten, maximal möglichen RC-Anteile, die in der Produktion der Deck-, Binder- Trag- und Fundationsschicht erreicht werden können, zusammengefasst.

Tabelle 5: Zusammenfassende Tabelle mit den in den vier Szenarien definierten maximalen RC-Anteilen in der Produktion der Deck-, Binder- Trag- und Fundationsschicht.

	Referenz	PAK >5'000ppm in Behandlung	PAK >1'000ppm in Behandlung	MAXIMALES Recycling
RC-Anteil Deckschicht	5%	5%	5%	20%
RC-Anteil Binderschicht	30%	30%	30%	50%
RC-Anteil Tragschicht	60%	60%	60%	80%
RC-Anteil Fundation	20%	20%	20%	80%

3 Resultate

Die Resultate aus den Modellierungen der vier Szenarien liegen einerseits für die Kantone St. Gallen, Thurgau und Zürich sowie für das Fürstentum Liechtenstein und andererseits für die gesamte Region vor. Der Fokus der Untersuchung liegt auf der überregionalen Ebene, weshalb in den nachfolgenden Kapiteln im Wesentlichen auf die Resultate aus der Modellierung der gesamten Region (SG, TG, ZH, FL) eingegangen wird. Im Anhang (Kapitel A 3) sind die wichtigsten Ergebnisse aus den kantonalen Modellierungen und für das Fürstentum Liechtenstein aufgeführt.

3.1 Resultate zur überregionalen Betrachtung (SG, TG, ZH und FL): Szenario REFERENZ

3.1.1 Vergleich der Materialflüsse im Szenario REFERENZ für die Jahre 2012 und 2035

Das Szenario REFERENZ widerspiegelt in Bezug auf Materialflüsse (und Lager) im Grundsatz die heutige Situation in der betrachteten Region. In der Abbildung 3 sind die Materialflüsse für dieses Szenario zwischen den verschiedenen Prozessen für das Jahr 2012 dargestellt. Insgesamt werden jährlich rund 1,06 Mio. Tonnen Mischgut bzw. Asphaltbelag produziert und eingebaut. Gut zu erkennen ist, dass sich die Produktion relativ gleichmässig auf die Tragschicht (TS), Binderschicht (BS) und Deckschicht (DS) aufteilt. Der Materialbedarf (Kies/Sand) für die Foundation liegt bei knapp 1,9 Mio. Tonnen pro Jahr.

Der Materialoutput von Ausbauasphalt aus dem Strassenkörper beträgt mit rund 550'000 Tonnen pro Jahr rund der Hälfte des Mischgutinputs. Somit wächst das Materiallager heute noch immer stark. Noch deutlicher ist das Wachstum bei der Foundation. Rund 57% des anfallenden Ausbauasphalts weisen eine PAK-Belastung von unter 1'000 ppm im Bindemittel auf. Weitere 25% liegen im Bereich von 1'000 - 5'000ppm. Mit jährlich 84'000 Tonnen fallen rund 15% des Ausbauasphalts mit PAK-Gehalten von 5000 – 20'000 ppm an. Die restlichen 20'000 Tonnen (rund 3%) werden aufgrund der hohen PAK-Belastung von über 20'000 ppm deponiert oder wie im Kanton St. Gallen in Ausnahmefällen im Kaltmischverfahren wieder eingebaut. Der grösste Teil, das heisst rund 470'000 Tonnen pro Jahr (t/a) des anfallenden Ausbauasphalts mit PAK-Gehalten unter 20'000 ppm, wird zu Granulaten aufbereitet und der Produktion zugeführt. Rund 70% oder 332'000 t/a gelangen in die Produktion der Gesteinskörnung, welche in die Foundation eingebaut wird. Die restlichen 30% der aufbereiteten Asphaltgranulate werden der Mischgutproduktion zugeführt, wobei 113'000 t/a in die Tragschicht, 23'000 t/a in die Binderschicht und nur 4'000 t/a in die Deckschicht gelangen. Die Recyclinganteile nehmen somit von der Trag- zur Deckschicht aufgrund der materialtechnischen Anforderungen stark ab.

In der Abbildung 4 ist das gleiche Szenario für das Jahr 2035 dargestellt. Grundsätzlich sind erhebliche Unterschiede bei den Materialflüssen im Vergleich zum Jahr 2012 feststellbar. Der totale Asphalt- bzw. Mischgutinput in die Strassen reduziert sich um knapp 30% auf 722'000 Tonnen pro Jahr. Im Gegensatz dazu nimmt der Ausbauasphaltanfall auf 673'000 Tonnen pro Jahr zu. Damit liegen der Materialinput und –output im Jahr 2035 sehr nahe beieinander. Es wird somit beinahe ein Fliessgleichgewicht erreicht. Bei den im Szenario REFERENZ vorausgesetzten Recyclinganteilen in der Mischgutproduktion, könnte gemäss diesem Szenario im Jahr 2035 256'000 Tonnen Ausbauasphalt nicht aufbereitet werden, sondern müsste abgelagert oder anderweitig entsorgt werden (Pfeil von Aufbereitung in Deponie/Weitere).

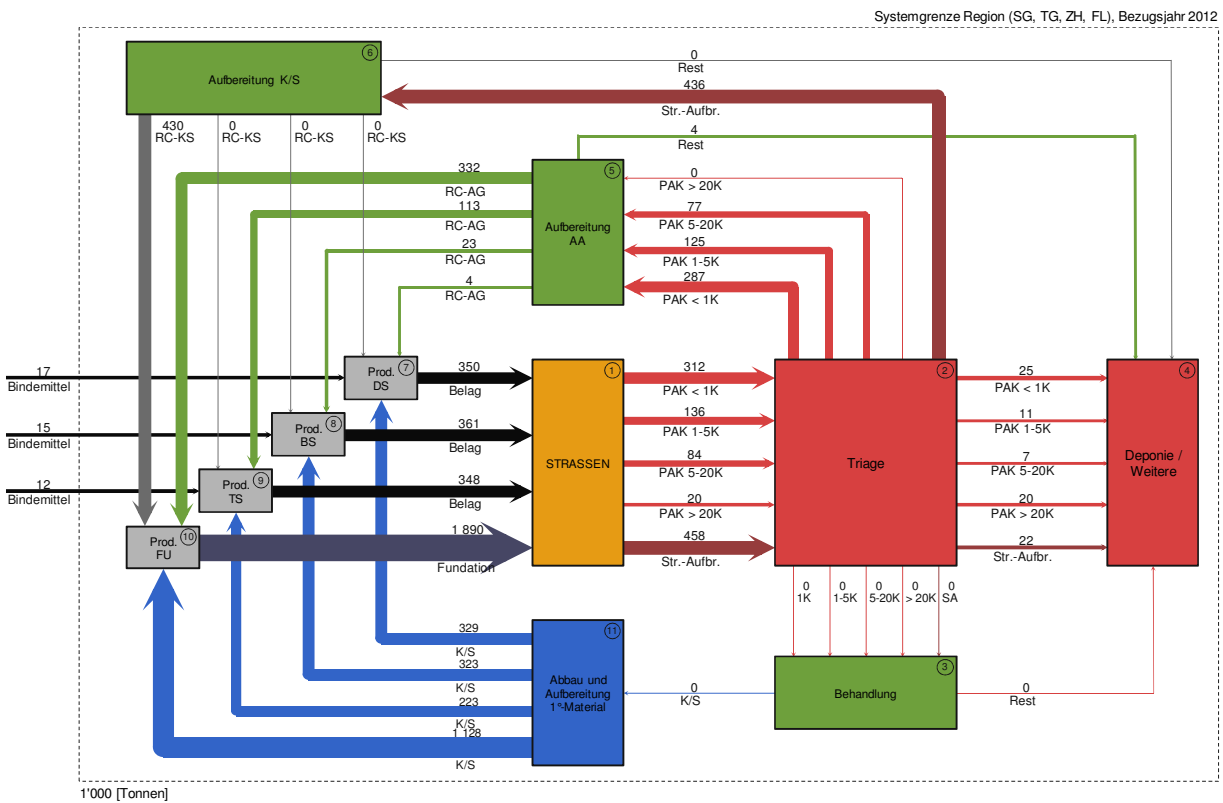


Abbildung 3: Materialflüsse im modellierten Szenario REFERENZ für die Region (SG, TG, ZH und FL) für das Bezugsjahr 2012. Die Flüsse sind in 1000 Tonnen pro Jahr angegeben.

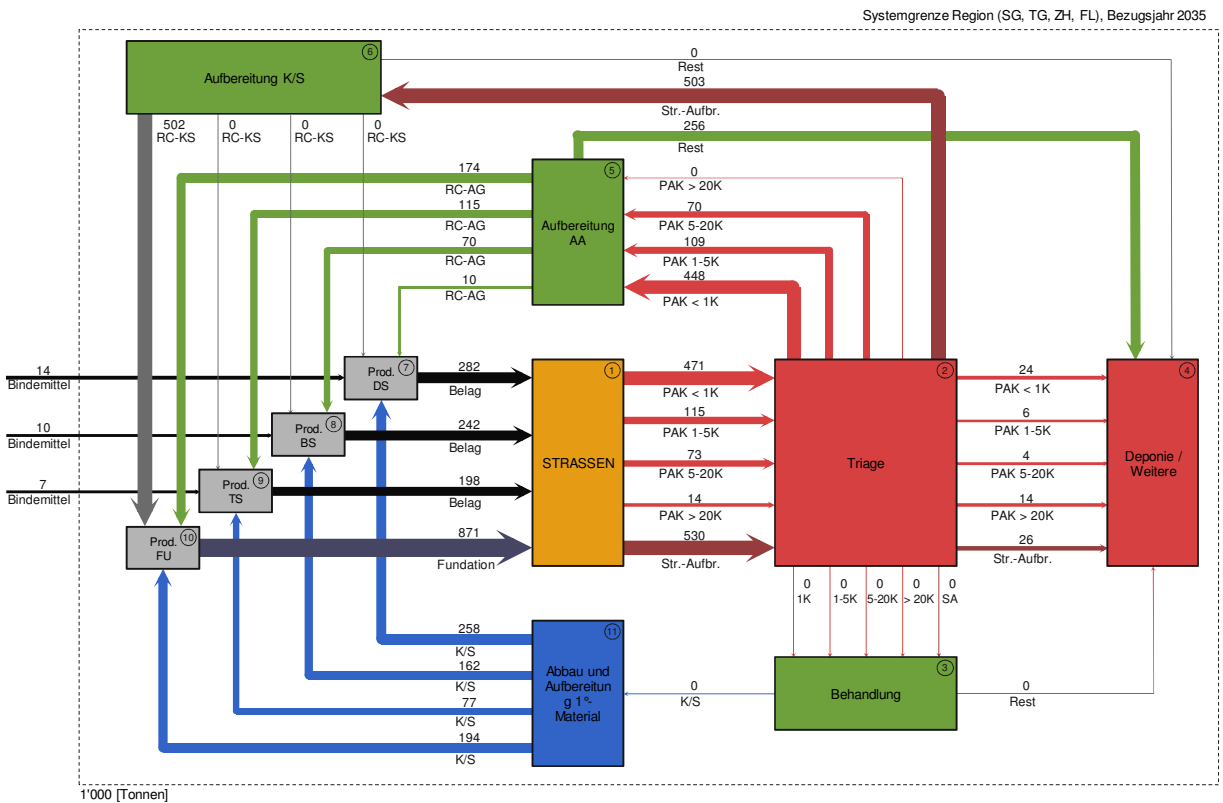
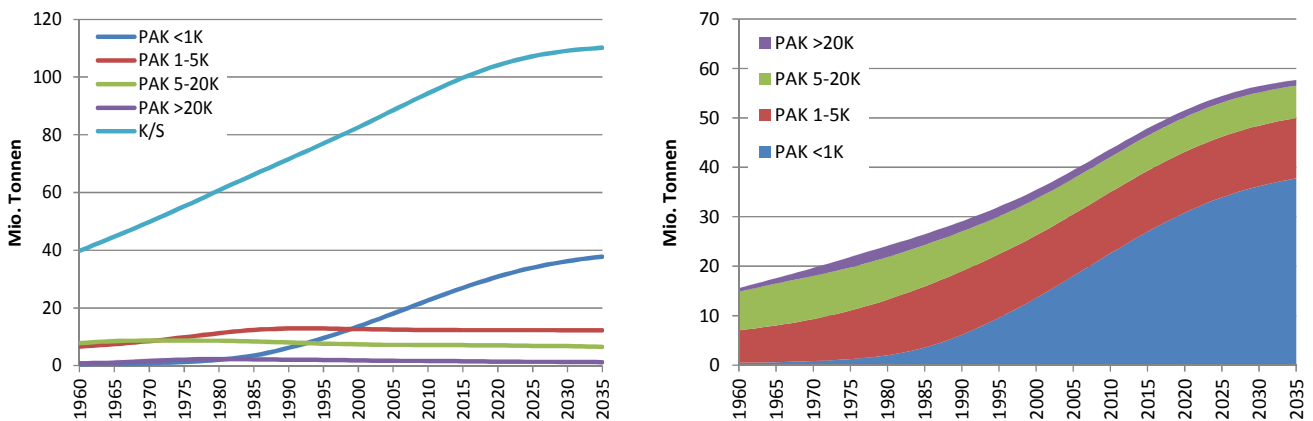


Abbildung 4: Materialflüsse im modellierten Szenario REFERENZ für die Region (SG, TG, ZH und FL) für das Jahr 2035. Die Flüsse sind in 1000 Tonnen pro Jahr angegeben.

3.1.2 Lagerentwicklung im Szenario REFERENZ

Im Modell wird zunächst der Materiallagerbestand für das Bezugsjahr 2010 bestimmt und von diesem Zeitpunkt die Lagerentwicklung rückwärts bis 1960 und vorwärts bis 2035 in Abhängigkeit von der Strassenlänge und weiteren zeitabhängigen Parametern berechnet. In den Abbildungen 5a+b ist diese Entwicklung dargestellt. In der Abbildung 5a ist gut zu erkennen, dass das Lager von Kies/Sand (K/S) sehr viel grösser ist als das Asphaltlager. Zwischen 1960 und 2035 verdreifacht sich das Kieslager beinahe von 40 auf rund 110 Mio. Tonnen. Beim Asphaltbelag sticht vor allem die Entwicklung der Materialkategorie PAK <1000 ppm (PAK <1K) hervor, während die restlichen Materiallager nach einer Zunahme bis Ende der 80er Jahre eher konstant bleiben (PAK 1-5k) oder leicht abnehmen (PAK 5-20k und PAK >20k). In der Abbildungen 5b ist die Entwicklung der gestapelten Materiallager ohne Berücksichtigung von Kies/Sand dargestellt. Das Asphaltlager nimmt demnach von knapp 16 Mio. Tonnen im Jahr 1960 auf rund 58 Mio. Tonnen im Jahr 2035 zu. Im Jahr 2012 beträgt das Lager rund 45 Mio. Tonnen. Somit nimmt das Lagerwachstum auch nach 2012 noch zu, allerdings in zunehmend abgeschwächter Form. Dies bedeutet, dass die Inputströme in die Strassen im Modell bis 2035 relativ stark abnehmen.



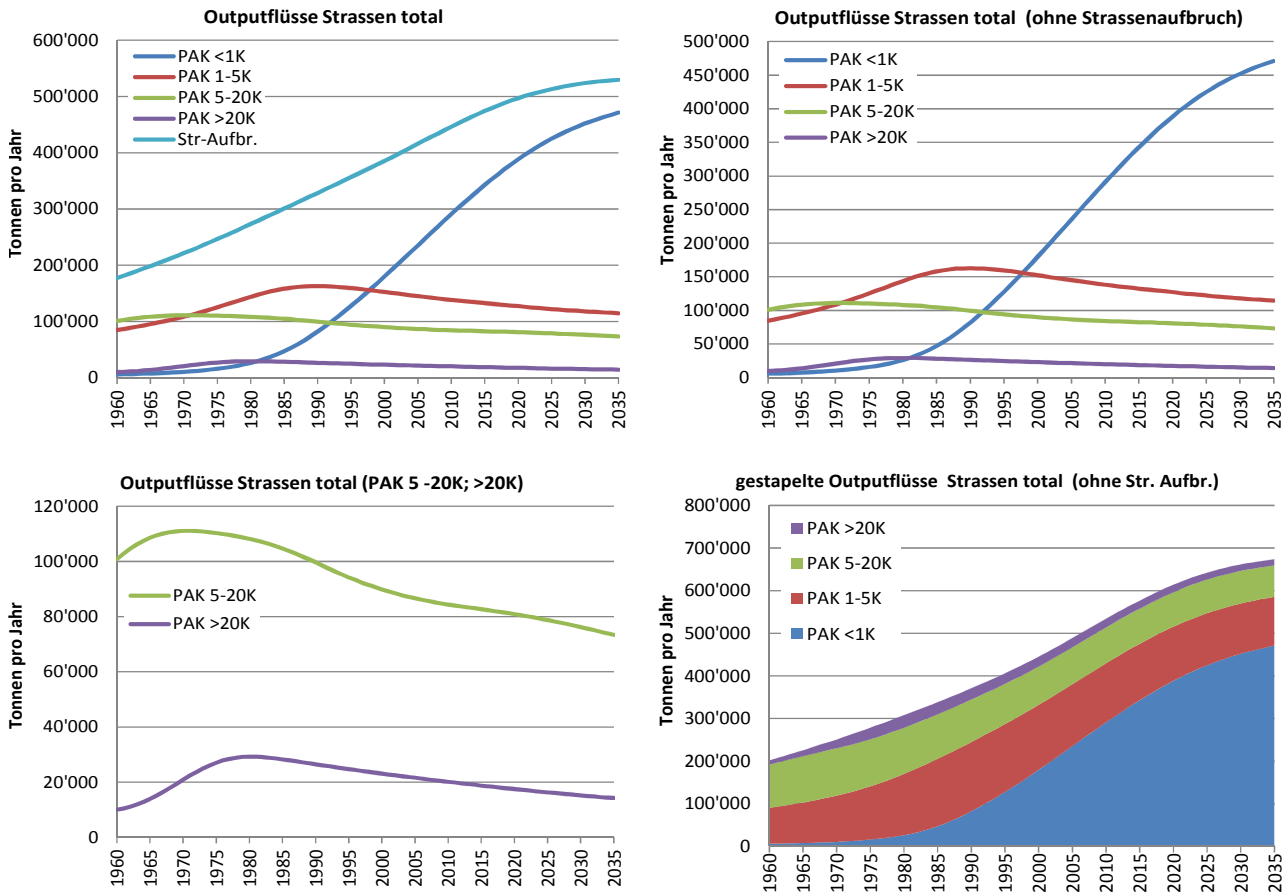
Abbildungen 5a + b: Entwicklung der Lager für die einzelnen Materialkategorien (links) und gestapelte bzw. summierte Entwicklung (rechts), wobei in der rechten Grafik das Materiallager für Kies/Sand (K/S) nicht berücksichtigt ist.

Die Lager der für diese Untersuchung wichtigen Materialfraktionen liegen für das Jahr 2012 bei 12,4 Mio. Tonnen (PAK 1-5K), 7,1 Mio. Tonnen (PAK 5-20K) und 1,6 Mio. Tonnen (PAK >20K). Da die Lagerentwicklung bis 2035 weiter zunehmen wird und die Instandsetzungsintervalle im Bereich von 20 bis 60 Jahren für die Deck-, Binder- und Tragschicht liegen, ist weiterhin mit relativ stark zunehmenden Outputflüssen zu rechnen.

3.1.3 Entwicklung der Outputflüsse im Szenario REFERENZ

Die oben erwähnte Entwicklung lässt sich anhand der Abbildungen 6a-d gut aufzeigen. In der Abbildung 6a ist die zeitliche Entwicklung sämtlicher Materialflüsse dargestellt: Der Output von Strassenaufbruch ist wiederum am grössten und steigt im betrachteten Zeitraum von knapp 200'000 t/a auf über 500'000 t/a an. Noch extremer ist die Zunahme beim Ausbausphalt mit PAK-Gehalten <1'000 ppm. Dieser Materialfluss nimmt von wenigen Tonnen pro Jahr auf rund 460'000 t/a im Jahr 2035 zu (Abbildungen 6a+b). 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

(Abbildung 6b). Um diese Abnahme bei den Materialfraktionen 5'000 - 20'000 ppm und >20'000 ppm besser zu sehen, ist die Entwicklung dieser Materialflüsse in der Abbildung 5c nochmals separat aufgeführt. In der Abbildung 6d sind die Materialflüsse ohne den Strassenaufbruch aufsummiert (gestapelt).



Abbildungen 6a-d: Entwicklung der Outputflüsse aus dem Prozess «Strasse». Abbildung oben links: Zeitliche Entwicklung sämtlicher Materialien. Oben rechts: Materialflüsse ohne Strassenaufbruch. Unten links: Materialflüsse Ausbausphalt mit PAK-Gehalten 5000 - 20'000 ppm bzw. >20'000 ppm. Unten rechts: Gestapelte Outputflüsse ohne Strassenaufbruch.

Bei der Betrachtung der Entwicklung der Materialflüsse fällt auf, dass sich die PAK-belasteten Materialfraktionen zwar zurückbilden. Aufgrund der langen Verweilzeiten der Materialien und der relativ grossen Lagermengen in den Strassen, werden diese Fraktionen aber auch im Jahr 2035 noch in erheblichen Mengen anfallen. Dies bedeutet wiederum, dass die entsprechenden Entsorgungsprozesse zur Verfügung stehen müssen, weil das Material ansonsten in den Deponien abgelagert werden muss.

3.1.3.1 Materialflüsse in die Aufbereitung/Behandlung/Deponie im Szenario REFERENZ

Wie verteilen sich nun die Outputflüsse unter den vorgegebenen Bedingungen des Szenarios REFERENZ auf die drei Entsorgungsprozesse «Aufbereitung», «Behandlung» und «Deponierung»? Die Abbildung 7 gibt Aufschluss darüber. Die zeitlichen Verläufe sind sehr wechselhaft. So steigt der Materialfluss in den Aufbereitungsprozess von 1980 bis 2018 relativ kontinuierlich von einigen wenigen Tonnen auf knapp 550'000 t/a an. Danach erfolgt eine Abnahme bis auf rund 370'000 t/a im Jahr 2035. Demgegenüber steigt der Materialfluss in die

Deponie im Zeitraum 2018 bis 2035 von knapp 60'000 t/a (2018) auf rund 300'000 t/a (2035) an (siehe auch Abbildung 8).

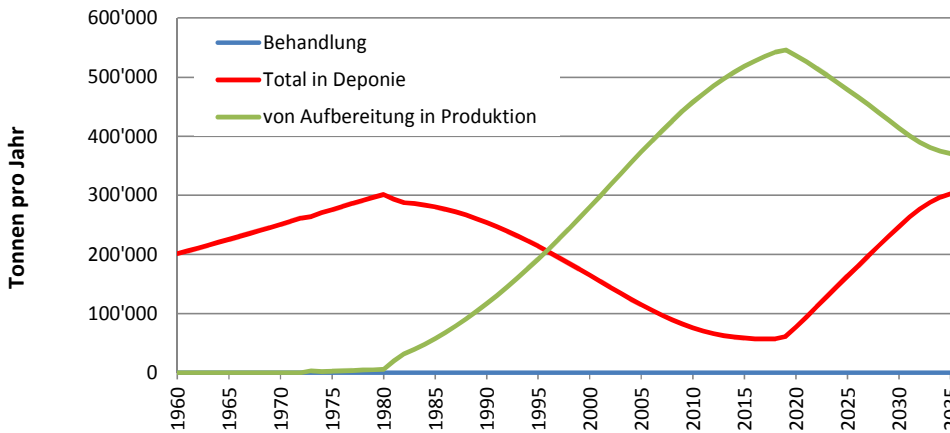


Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der Materialflüsse (ohne Strassenaufbruch) in die drei Entsorgungsprozesse Aufbereitung (grüne Linie), Behandlung (blaue Linie; liegt bei null) und Deponierung (rote Linie).

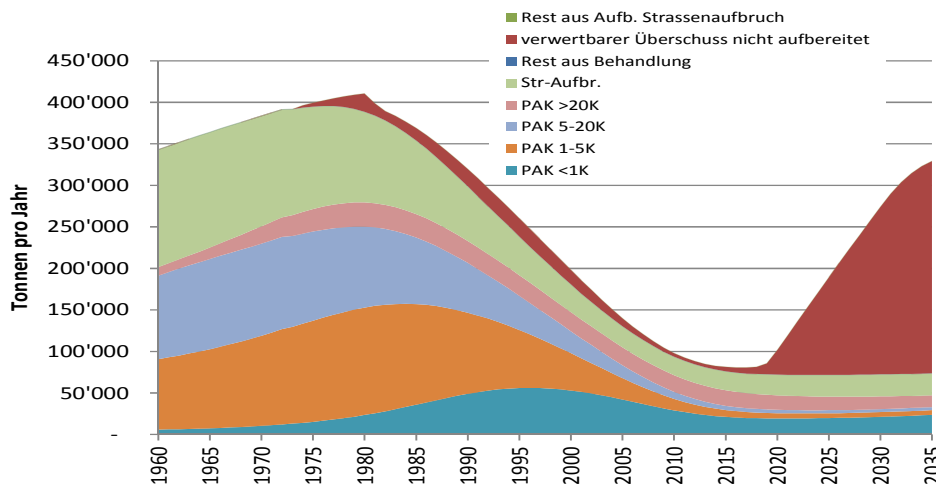


Abbildung 8: Entwicklung der kumulierten Materialflüsse in die Deponien in Tonnen pro Jahr.

Die Abnahme des Materialflusses in die Aufbereitung bzw. die Zunahme des Materialflusses in die Deponie ab dem Jahr 2018 lässt sich damit erklären, dass der anfallende Ausbauasphalt nicht mehr vollständig in die Produktion geführt werden kann, weil die Recyclinganteile in der Produktion im Jahr 2018 voll ausgeschöpft werden. Die zusätzlich anfallenden Ausbauasphaltmengen müssen somit zwischengelagert beziehungsweise deponiert werden (braune Fläche in der Abbildung 8). Im Szenario REFERENZ findet keine thermische oder chemische Behandlung des anfallenden Ausbauasphalts statt. Aus diesem Grund verläuft die blaue Linie in der Abbildung 7 auf der x-Achse entlang.

3.1.3.2 Entwicklung der Materialflüsse in die Foundation

Ein wesentlicher Aspekt in Bezug auf das Recycling der anfallenden Asphaltgranulate ist der Einsatz dieser Granulate in der Foundation. Wie aus der Abbildung 3 hervorgeht, ist der Materialfluss in die Foundation verhältnismässig gross. Dementsprechend ist das Recyclingpotenzial in diese Anwendung gross. Allerdings gibt es rechtliche Rahmenbedingungen, die beim

Einsatz von RC-Kiessand A zu berücksichtigen sind. Aus diesem Grund wird im Szenario REFERENZ ein maximaler Anteil an Asphaltgranulat von 20% am gesamten Input in die Fundation vorgegeben.

In den Abbildungen 9a+b sind die Entwicklungen der Materialflüsse in die Fundation (Abbildung 9a) und der entsprechenden Zusammensetzung (Abbildung 9b) dargestellt. Gut zu erkennen sind die starke Abnahme des Primärmaterials (Kies/Sand) ab 2005 und die Zunahme des RC-Kies/Sandes aus dem Strassenaufbruch. Zudem ist in Abbildung 9a zu erkennen, dass der Materialbedarf für die Fundation künftig abnehmen wird. Der Grund dafür ist die im Modell vorgegebene Abnahme der Neubaurate bis 2035 (siehe Tabelle 1, rechte Spalte), welche allgemein zu einem geringeren Materialbedarf führen wird.

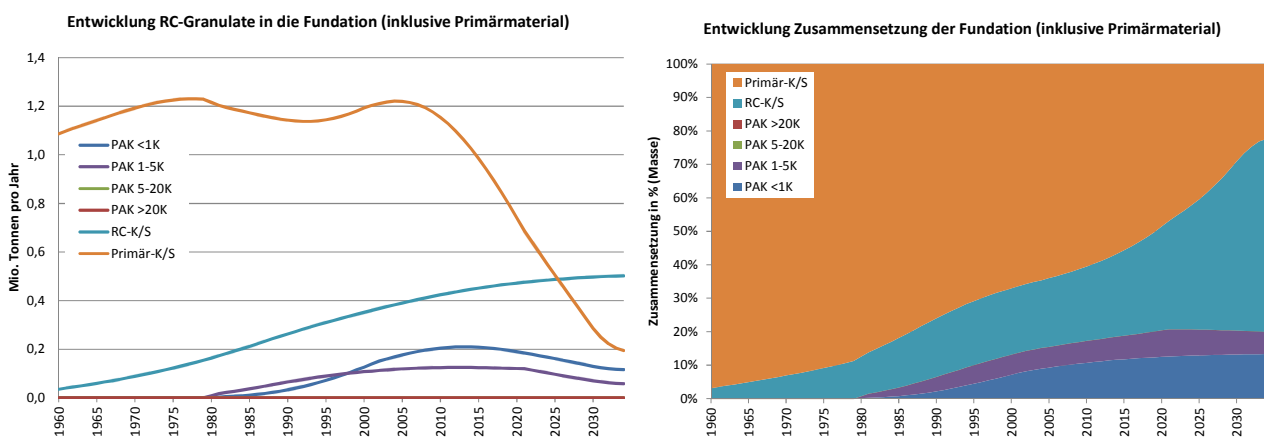


Abbildung 9a+b: Entwicklung der Materialflüsse in die Strassenfundation (links) und der diesbezüglichen prozentualen Verteilung der Materialflüsse (rechts).

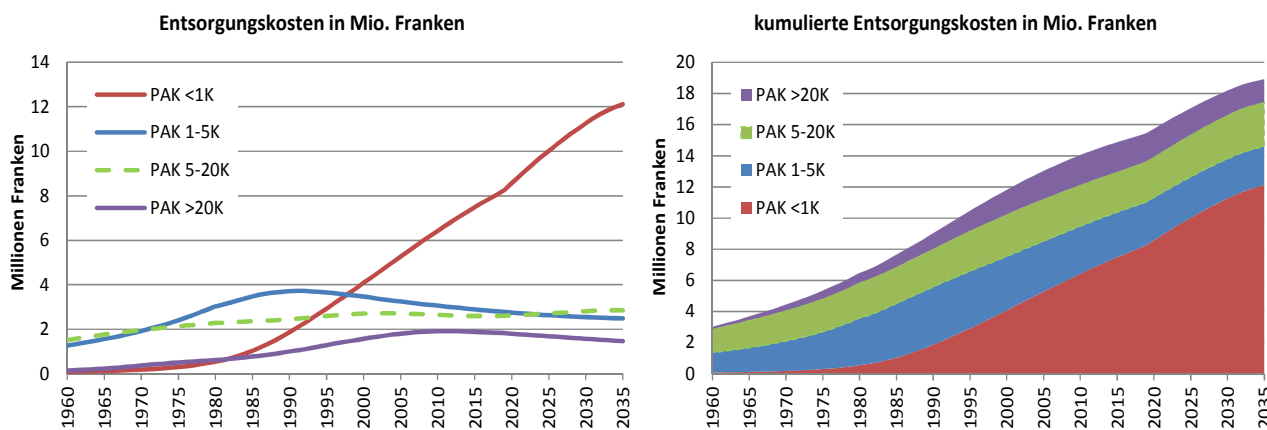
Die Entwicklung der Zusammensetzung des Inputs in die Fundation unterliegt einer starken Veränderung. So nimmt der Anteil des Primärmaterials stetig ab und erreicht im Jahr 2035 nur noch einen Anteil von rund 20%. Im Gegensatz dazu erreicht der RC-Kies/Sand einen Anteil von knapp 60%. Die restlichen 20% werden durch die Fraktionen PAK1-5K und PAK<1K gedeckt. Die Fraktionen PAK 5-20K und PAK>20K dürfen in der Fundation nicht eingesetzt werden und erscheinen deshalb nicht in den Abbildungen.

3.1.4 Entwicklung der Entsorgungskosten im Szenario REFERENZ

Ein wichtiger Aspekt in einer umfassenden Betrachtung ist die Entwicklung der Kosten für die Entsorgung die anfallenden Ausbaus asphaltfraktionen. Diese sind von verschiedenen Faktoren wie die Entwicklung der Mengen, der Preise sowie den gewählten Entsorgungswegen, jeweils bezogen auf die einzelnen Fraktionen, abhängig. Mit dem Szenario REFERENZ lässt sich vorerst der Einfluss der ersten beiden Faktoren, das heisst, der Einfluss der Entwicklung der Mengen und Preise auf die Kostenentwicklung darstellen. Der Einfluss der Verteilung der Fraktionen auf die verschiedenen Entsorgungsvarianten und der damit verbundenen Kosten wird im Kapitel 3.3 thematisiert. In den Abbildungen 10a+b sind die Entwicklung der Entsorgungskosten für die einzelnen Fraktionen (Abb. 10a) und der kumulierten Kosten dargestellt.

Die totalen Entsorgungskosten liegen heute (Jahr 2012) bei etwas über 14,3 Mio. Franken für die betrachtete Region. Bis 2035 ist gemäss dem Modellszenario mit einer Zunahme auf knapp 20

Mio. Franken zu rechnen. Während die Entsorgung der Fraktion PAK <1000 ppm heute rund 50% der gesamten Entsorgungskosten beansprucht, liegt dieser Anteil im Jahr 2035 bei rund 65%. Die Entsorgungskosten der stärker belasteten Fraktionen bewegen sich mit 2,6 Mio. Franken (PAK 5-20K) und 1,9 Mio. Franken (PAK >20K), was einem Anteil von knapp 30% an den gesamten Entsorgungskosten im Jahr 2012 entspricht.



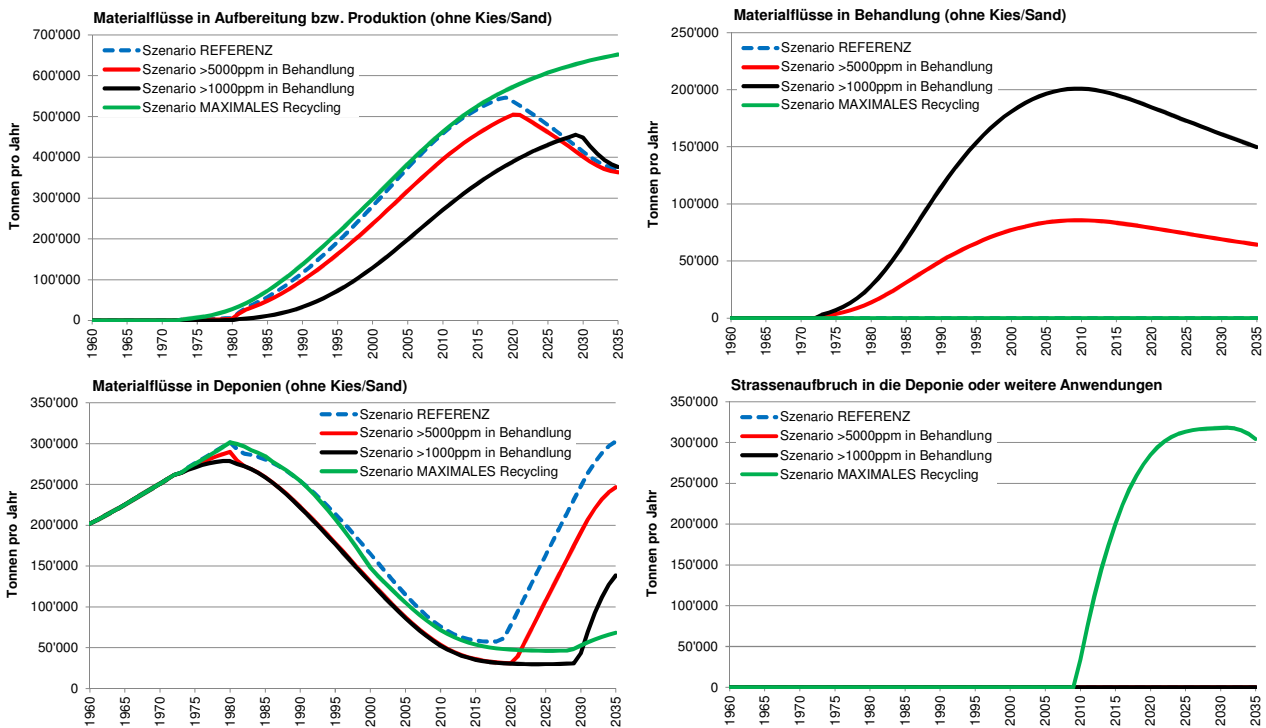
Abbildungen 10a+b: Entwicklung der Entsorgungskosten für die einzelnen Ausbausphalfrac-tionen (links, Abb. 10a) und der kumulierten Entsorgungskosten (rechts, Abb. 10b).Angaben in Millionen Franken.

Hervorzuheben ist somit, dass in Zukunft insbesondere die Kosten für die Entsorgung der Fraktion PAK <1'000 ppm aufgrund der steigenden Materialflüsse deutlich ansteigen werden. Die Entsorgungskosten für die anderen Fraktionen bleiben in etwa gleich hoch (PAK 5'000 – 20'000 ppm) oder nehmen aufgrund der abnehmenden Mengen leicht ab (PAK 1'000 – 5'000 ppm und PAK >20'000 ppm). Zu erwähnen ist dabei, dass die im Modell vorgegebenen Entsorgungspreise zwischen 2010 und 2035 in diesem und den weiteren Szenarien konstant gehalten werden (Kapitel 2.1.5).

3.2 Vergleich der Resultate aus den Szenarienrechnungen im überregionalen Modell

Insgesamt wurden für jeden Kanton sowie für die gesamte Region die vier im Kapitel 2.3 definierten Szenarien gerechnet. Dabei interessiert insbesondere der Vergleich der Entwicklung der szenarioabhängigen Materialflüsse in die Entsorgungsprozesse sowie die Entwicklung der damit verbundenen Entsorgungskosten.

In der Abbildung 11a sind die zeitlichen Entwicklungen der Materialflüsse in die Aufbereitung, welche grösstenteils dem Input von Asphaltgranulaten in die Produktion entsprechen, für die vier Szenarien dargestellt. In den Abbildungen 11b und 11c sind zudem die Materialflüsse in einen thermischen oder chemischen Behandlungsprozess bzw. in die Deponien aufgeführt. Obwohl heute kaum Material in einen Behandlungsprozess geführt wird, wird in diesen Szenarien ein solcher hypothetischer Input bereits ab den 80er Jahren angenommen. Begründen lässt sich dies mit der Formulierung der Szenarien, in denen einerseits dargelegt werden soll, welche Auswirkungen eine Verschiebung von der Aufbereitung zur Behandlung rückwirkend gehabt hätte und andererseits, welche Konsequenzen bei einer Änderung der Entsorgungsstrategie künftig zu erwarten sind.



Abbildungen 11a-d: Zeitliche Entwicklung der Materialflüsse in die Aufbereitung für die vier Szenarien REFERENZ, >5000 ppm in Behandlung, >1000 ppm in Behandlung und MAXIMALES Recycling (Abb. 11a, oben links), in die Behandlung (Abb. 11b, oben rechts) und in die Deponie (Abb. 11c, unten links). In den Abbildungen ist der Kies-/Sand-Fluss aus der Fundation (Strassenaufbruch) nicht berücksichtigt. In der Abb. 11d (unten rechts) ist der Materialfluss (Strassenaufbruch) für die vier Szenarien in die Deponie oder weitere Anwendungen aufgeführt.

Die szenarioabhängigen Unterschiede der Entwicklung der Materialflüsse in die Aufbereitung sind in der Abbildung 11a gut erkennbar. Im Vergleich zum Szenario REFERENZ gelangt beim Szenario «>5'000 ppm in Behandlung» bis zum Jahr 2018, d.h. beim Knick der Kurve des Szenarios REFERENZ, deutlich weniger Material in die Aufbereitung. Danach ist der Unterschied zwischen den Materialflüssen in den beiden Szenarien nur noch gering. Im Szenario «>1'000 ppm in Behandlung» wird bis zum Jahr 2018 tendenziell immer weniger Material aufbereitet als im Szenario REFERENZ. Ab dem Jahr 2027, d.h. beim Schnittpunkt der schwarzen und blau gestrichelten Kurven kehrt sich die Situation um, nun wird im Szenario «>1'000 ppm in Behandlung» etwas mehr Material aufbereitet als im Szenario REFERENZ. Bei allen drei Szenarien ist ein Knick in der Kurve zu unterschiedlichen Zeitpunkten erkennbar. Ab diesen Zeitpunkten (Szenario REFERENZ im Jahr 2018, Szenario «>5'000 ppm in Behandlung» im Jahr 2020, Szenario «>1'000 ppm in Behandlung» im Jahr 2029) entsteht in diesen Szenarien ein Überschuss an Ausbausphal, welcher aufgrund der bereits ausgeschöpften Recyclinganteile in der Produktion nicht mehr verwertet werden kann und deshalb deponiert werden muss (Abbildung 11c). Im Szenario REFERENZ muss deshalb im Jahr 2035 knapp 250'000 t/a zusätzlich deponiert werden, weil das Material nicht in der Produktion eingesetzt werden kann. In den beiden anderen Szenarien liegt dieser Materialfluss bei etwas über 200'000 t/a («>5'000 ppm in Behandlung») bzw. 100'000 t/a («>1'000 ppm in Behandlung»).

Die Situation sieht anders aus, wenn die Recyclinganteile in der Produktion wie im Szenario MAXIMALES Recycling stark erhöht werden. Der Knick in der Kurve (grüne Linie) in der Abbildung 11a ist nicht mehr vorhanden, weil nun sämtlicher anfallende Ausbausphal der

Verwertung zugeführt werden kann (siehe auch Abbildung 11c). Allerdings verschiebt sich bei diesem Szenario nun die Entsorgungsproblematik zum Strassenaufbruch. Dieser kann nun nicht mehr vollständig in die Produktion der Fundation zurückgeführt werden und muss deshalb deponiert (Abbildung 11d) oder anderweitig (z.B. für die Betonproduktion im Hochbau) verwertet werden.

In der Abbildung 11b ist die Entwicklung der Materialflüsse in den Behandlungsprozess dargestellt. Es resultieren nur in den Szenarien «>5'000 ppm in Behandlung» und «>1'000 ppm in Behandlung» Materialflüsse in diesen Prozess. Die maximalen Behandlungsmengen werden mit 200'000 t/a (>1000 ppm in Behandlung) und 86'000 t/a (>5000 ppm in Behandlung) um das Jahr 2010 erreicht. Danach nehmen die Materialmengen bis 2035 um ca. 20 - 25% ab. Auf den ersten Blick erstaunlich ist die Feststellung, dass in den Szenarien mit einer thermischen Behandlung trotzdem Ausbauasphalt deponiert werden muss. Der Hauptgrund dafür ist die künftig starke Zunahme der Fraktion <1'000 ppm (siehe Abbildung 6b). Diese gelangt in den beiden Szenarien nicht die Behandlung sondern in die Aufbereitung. Da sich die Recyclinganteile in der Produktion in diesen Szenarien auf relativ tiefem Niveau bewegen, entsteht trotz der thermischen Behandlung ein Überschuss an Ausbauasphalt der deponiert werden oder in andere Anwendungen gehen muss. Um diese Situation zu verdeutlichen sind in der Abbildung 12 die Materialflüsse für das Szenario «>1000 ppm in die Behandlung» im Jahr 2035 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass durch den im Vergleich zu heute deutlich geringeren Materialbedarf beim Input in die Strassen sowie die tiefen RC-Anteile in der Produktion zu einem Überschuss an Ausbauasphalt führen, der deponiert werden muss (grüner Pfeil von der Aufbereitung in die Deponie).

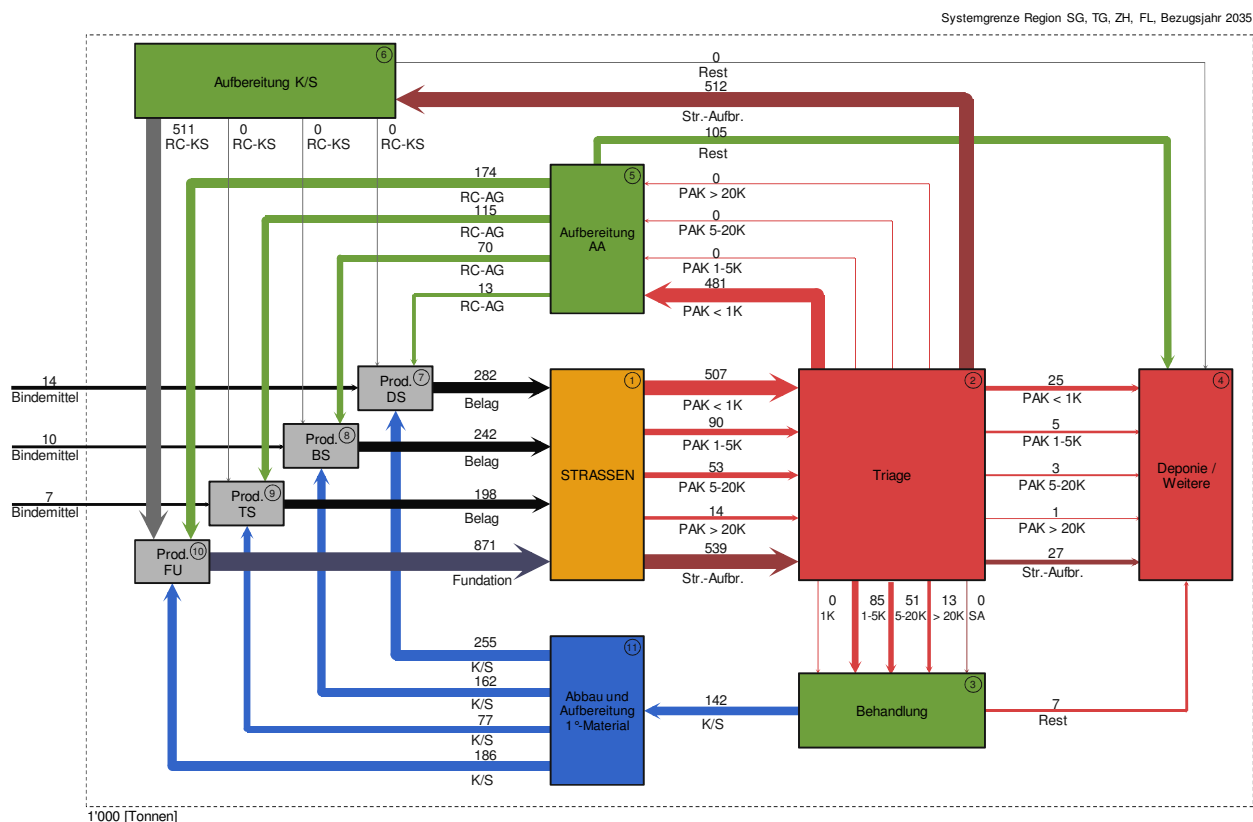
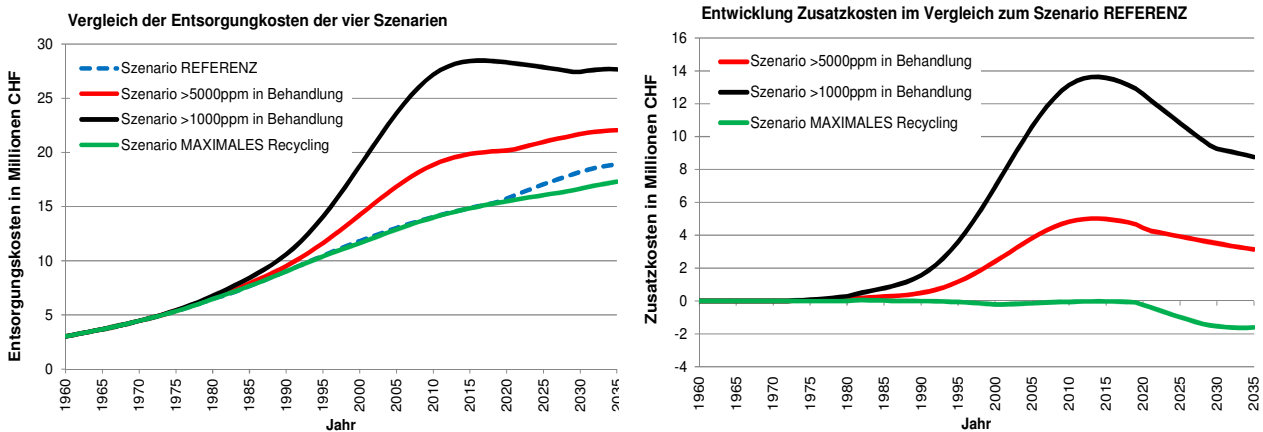


Abbildung 12: Materialflüsse im Jahr 2035 für das Szenario «>1000 ppm in die Behandlung».

3.3 Vergleich der Entsorgungskosten im überregionalen Modell

Die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien auf die Kostenentwicklung für die Entsorgung des anfallenden Ausbausphalts sind in den Abbildungen 13a+b gut zu erkennen. Während die Entsorgungskosten im Szenario MAXIMALES Recycling in etwa gleich hoch sind wie im Szenario REFERENZ, liegen die Entsorgungskosten in den anderen Szenarien höher (Abbildung 13a). Im Jahr 2012 würden sich die jährlichen Entsorgungskosten für die Szenarien REFERENZ und MAXIMALES Recycling bei rund 14,5 Mio. Franken bewegen. Würden die Ausbausphaltfraktionen mit PAK-Gehalten >5000 ppm der thermischen Behandlung zugeführt, ergäbe dies totale Entsorgungskosten von 19,4 Mio. Franken, was Zusatzkosten von 4.9 Mio. Franken entspricht (Abbildung 13b). Ein weiterer Anstieg der Entsorgungskosten auf 27,9 Mio. Franken bzw. der Zusatzkosten von 13,4 Mio. Franken ergäbe sich, falls in der gesamten Region sämtliche Ausbausphaltfraktionen mit PAK-Gehalten von über 1000 ppm einem Behandlungsprozess zugeführt würden.



Abbildungen 13a bzw. b: Entwicklung der Entsorgungskosten in Abhängigkeit der gewählten Szenarien (Abb. 13a) sowie die zeitliche Entwicklung der jährlichen Zusatzkosten im Vergleich zum Szenario REFERENZ (Abb. 13b).

In der Abbildung 13b ist zudem zu erkennen, dass die Zusatzkosten bei der Umsetzung der Szenarien «>5'000 ppm in Behandlung» bzw. «>1'000 ppm in Behandlung» gegenüber dem Szenario REFERENZ künftig wieder abnehmen würden. Der Grund dafür ist die kontinuierliche Zunahme der Entsorgungskosten für die Fraktion PAK < 1'000 ppm aufgrund der ansteigenden Mengen bei konstanten Preisen, währenddessen die Materialflüsse der anderen Fraktionen abnehmen. Allerdings ist auch im Jahr 2035 noch mit Zusatzkosten bei diesen beiden Szenarien gegenüber dem Szenario REFERENZ zu rechnen.

4 Diskussion

4.1 Die wichtigsten Erkenntnisse

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt und aus den Modellierungen der Szenarien zusammengefasst:

4.1.1 Modellspezifische Aspekte

Mit der Entwicklung des Modells werden die im Kapitel 1.2 aufgeführten Anforderungen und Ziele in Bezug auf die modellspezifischen Aspekte erfüllt:

- Jeder der am Projekt beteiligten Kantone sowie das Fürstentum Liechtenstein verfügt über ein Modell, welches auf kantons- bzw. landesspezifischen Datengrundlagen basiert.
- Die Modelle mit den vier Szenarien REFERENZ, >5K in BEHANDLING, >1K in BEHANDLING und MAXIMALES Recycling sind jeweils als voneinander unabhängige Dateien abgespeichert. Falls Änderungen in den Szenarien vorgenommen werden, sollten diese als neue Szenarien abgespeichert werden.
- In der Datei „Vergleich der Szenarien“ sind die wichtigsten Abbildungen zum Vergleich der Ergebnisse der Szenarien zusammengefasst. Falls Änderungen in den Szenarien vorgenommen werden, lassen sich die Ergebnisse in der Datei automatisch aktualisieren.
- Mit den Modellen lässt sich eine Vielzahl von kantons- bzw. landesspezifischen Szenarien rechnen. Die vier Szenarien dienen als Beispiele und wurden entsprechend der Fragestellung in diesem Projekt definiert.
- Da der Systemaufbau und die methodischen Grundlagen sowie die Szenarien gleich sind, lassen sich die Ergebnisse aus den Modellierungen bei Bedarf vergleichen.
- Dank der Visualisierung der Materialflüsse lassen sich die Zusammenhänge auch nicht fachkundigen Personen sehr schnell aufzeigen.

4.1.2 Erkenntnisse aus den Modellierungen

Die Ergebnisse der Modellierungen bestätigen bekannte Entwicklungen, sie liefern aber teilweise auch überraschende Ergebnisse.

4.1.2.1 Entwicklung der Materiallager in der Region

Für die meisten Akteure wird es keine Überraschung darstellen, dass das Materiallager in den Strassen insgesamt weiterhin wächst und dieses Wachstum auf die Entwicklung der Fraktion mit PAK-Gehalten von unter 1'000 ppm zurückzuführen ist. Unter den vorgegebenen Modellannahmen schwächt sich das Lagerwachstum gegen Ende des Betrachtungszeitraums (bis 2035) ab, weil davon ausgegangen wird, dass das Strassennetz künftig immer langsamer in die Länge bzw. Breite wächst.

4.1.2.2 Langsamer Rückgang der PAK-belasteten Fraktionen (PAK 5-20K und PAK >20K)

Der totale Materialoutput von Ausbauasphalt wird auch künftig weiterhin zunehmen, wobei die Entwicklung für die einzelnen Fraktionen unterschiedlich verläuft. Das Wachstum ist ausschliesslich auf die starke Zunahme der Fraktion PAK <1'000 ppm zurückzuführen. Der Materialfluss wird bis 2035 im Vergleich zu heute rund 50% zunehmen (Abbildung 6b). Die anderen Fraktionen, welche erhöhte PAK-Belastungen aufweisen, nehmen zwar kontinuierlich ab (Abbildungen 6a-c), der Rückgang erfolgt jedoch relativ langsam. Der Grund dafür sind die im Verhältnis zum Lager geringen Materialoutputs (Abbildung 14), was mit den langen Verweilzeiten der Materialfraktionen in den Strassen zu erklären ist. In der Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die Ausbauraten, bezogen auf die entsprechenden Lagermengen, im Szenario REFERENZ bei den Fraktionen PAK 5-20K und PAK 1-5K im zeitlichen Verlauf weiter zurückgehen. Diese Fraktionen verbleiben im Kreislauf und somit reduziert sich der Output und die entsprechende Rate. Bei der Fraktion PAK >20K verbleibt das Material nicht im Lager sondern wird dem Kreislauf entzogen. Die Output-Rate verläuft auf einem höheren Niveau und nimmt geringer ab, wie bei den anderen Fraktionen.

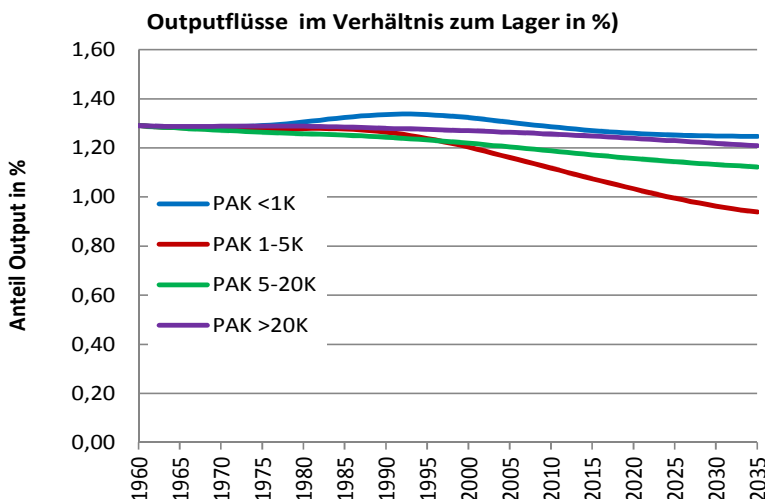


Abbildung 14: Entwicklung Ausbauraten bezogen auf die entsprechenden Materiallager für das Szenario REFERENZ. Angaben in Prozenten bezogen auf die Materiallager.

4.1.2.3 Auch bei der thermischen Behandlung von PAK >1'000ppm entsteht Überschuss

Während die Ergebnisse des Szenarios REFERENZ in Bezug auf den künftigen Überschuss von Ausbauasphalt aufgrund der tiefen Recyclinganteile in der Produktion den Erwartungen entspricht, überrascht vor allem das Ergebnis des Szenarios «>1'000 ppm in Behandlung». Denn auch hier entsteht ein Überschuss, wenn auch zu einem späteren Zeitpunkt (im Jahr 2029), welcher gemäss Szenarioannahme deponiert wird. Zudem ist der Materialüberschuss weniger ausgeprägt als in den Szenarien REFERENZ und «>5'000 ppm in Behandlung». Wie im Kapitel 3.2 bereits beschrieben, entsteht der Überschuss im Szenario «>1'000 ppm in Behandlung» aufgrund des starken Wachstums der Fraktion PAK< 1'000ppm und bei gleichzeitigem Rückgang der anderen Outputfraktionen und der Reduktion der Verwendung. Dies führt dazu, dass weniger Material in die Behandlung gelangt, aber gleichzeitig der Materialfluss in die Aufbereitung zunimmt und zwar so stark, dass ab dem Jahr 2029 nicht mehr alles anfallende Material in die Produktion geführt werden kann.

4.1.2.4 Kombination von Massnahmen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement

Die Modellergebnisse zeigen, dass bei einer allfälligen Einführung der thermischen Behandlung weitere Massnahmen wie die Erhöhung der RC-Anteile in der Produktion notwendig sind, um ein nachhaltiges Baustoffmanagement bei der Bewirtschaftung unserer Strassen zu erreichen. Das Szenario MAXIMALES Recycling zeigt, dass bei hohen RC-Anteilen in der Produktion das anfallende Asphaltgranulat im betrachteten Zeitraum und unter den getroffenen Annahmen beinahe vollständig recycelt werden kann. Allerdings sind dabei zwei wichtige Aspekte zu berücksichtigen:

- Es entsteht ein Überschuss an Strassenaufbruch. Um eine Deponierung dieses Materials zu verhindern, muss dieses in anderen Anwendungen, wie beispielsweise als Zuschlagstoff im Beton im Hoch- oder Tiefbau eingesetzt werden. Der Vorteil dabei ist, dass dies beim Strassenaufbruch mit erheblich weniger Aufwand verbunden ist, als beim Ausbauasphalt, der wie erwähnt, thermisch oder nasschemisch behandelt werden muss.
- Voraussetzung für den Einsatz des Strassenaufbruchs als Zuschlagstoff im Beton ist allerdings, dass dieser nicht mit Asphaltgranulaten vermischt wird. Denn nur „sauberere“, das heisst, kiesiger Strassenaufbruch ohne Asphaltgranulate ist für diesen Verwertungsweg geeignet.
- Der Einbau von Asphaltgranulaten in die Foundationsschicht ist zwar über einen längeren Zeitraum von mehreren Jahrzehnten möglich. Doch verschiebt man bei diesem Vorgehen das Problem in die Zukunft. Langfristig müsste die Foundationsschicht immer dicker werden, um die anfallenden Asphaltgranulate vollständig verwerten zu können.

Aus der Perspektive eines nachhaltigen Materialkreislaufes müsste deshalb längerfristig zusätzlich ein Teil der Ausbauasphaltfraktion mit PAK-Gehalten unter 1'000 ppm thermisch oder nasschemisch behandelt werden. Die daraus entstehende Gesteinskörnung könnte dann teilweise wieder in die Asphaltproduktion zurückgeführt werden, wobei Primärmaterial ersetzt würde. Allerdings kann nur mit dem Einsatz in anderen Anwendungen, wie beispielsweise als Kiesersatz in loser oder gebundener Form im Hoch- oder Tiefbau, eine in Bezug auf den Materialkreislauf nachhaltige Lösung erreicht werden.

Der Zeitpunkt der Umsetzung dieser Massnahme dürfte von der künftigen Preis- und Kostenentwicklung der verschiedenen Entsorgungsoptionen abhängig sein. Heute ist es aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll, diese schwach belasteten Fraktionen thermisch zu behandeln. Künftig könnten aber die Preise für die Deponierung ansteigen, so dass eine thermische Behandlung dieses Materials konkurrenzfähig werden könnte. Im nachfolgenden Kapitel werden die ökonomischen Aspekte nochmals kurz diskutiert.

4.1.2.5 Entsorgungskosten nehmen unabhängig von den Szenarien weiterhin zu

Unabhängig von den Szenarien werden die Entsorgungskosten weiterhin steigen (Abbildungen 10a+b). In den verschiedenen Szenarien werden die Preise für die Deponierung, Aufbereitung und Behandlung im Zeitraum zwischen 2010 und 2035 konstant gehalten. Der rund 20%ige Anstieg der totalen Entsorgungskosten bis 2035 ist deshalb nicht auf die Preisentwicklung, sondern auf die mengenmässige Zunahme der Ausbauasphaltfraktion „PAK <1'000ppm“ zurückzuführen.

4.1.2.6 Entwicklung der Zusatzkosten der Szenarien im Vergleich zum Referenzszenario

Im Kapitel 3.3 sind die Entwicklungen der Entsorgungskosten für die einzelnen Szenarien aufgeführt. Die beiden Szenarien «>5'000 ppm in Behandlung» und «>1'000 ppm in Behandlung» führen zu Zusatzkosten gegenüber den anderen beiden Szenarien. In der Abbildung 15 ist die Entwicklung der Zusatzkosten der Szenarien im Verhältnis zum Szenario REFERENZ in Prozenten dargestellt. Im Szenario «>5'000 ppm in Behandlung» liegen die Zusatzkosten für die Entsorgung des anfallenden Ausbausasphalts im Jahr 2012 um knapp 37% über den Kosten des Szenarios REFERENZ. Diese reduzieren sich danach bis zum Jahr 2035 auf rund 16%. Mit deutlich höheren Zusatzkosten ist im Szenario «>1'000 ppm in Behandlung» zu rechnen. Diese erreichen um das Jahr 2012 ein Maximum von über 94% und gehen dann aufgrund abnehmender Mengen auf rund 46% im Jahr 2035 zurück.

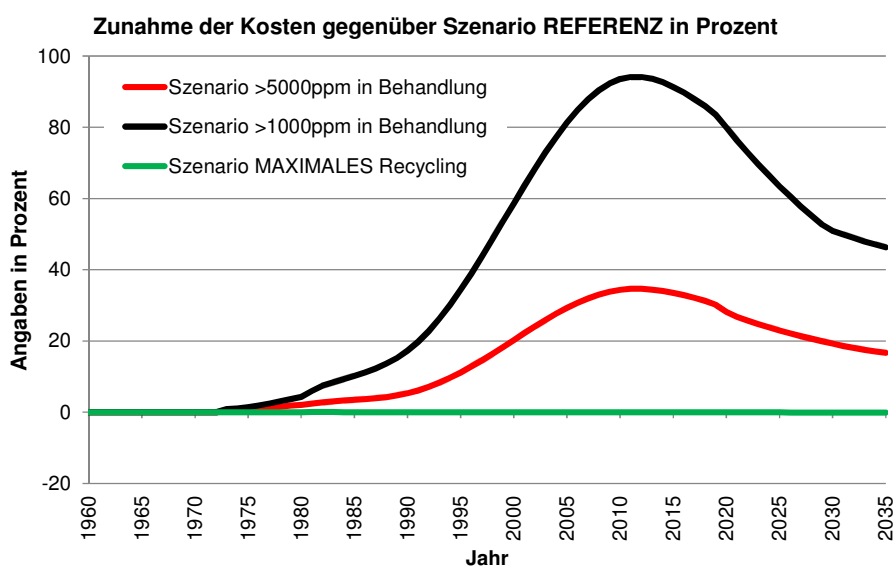


Abbildung 15: Entwicklung der prozentualen Zunahme der Mehrkosten der drei Szenarien «>5'000 ppm in Behandlung», «>1'000 ppm in Behandlung.» und MAXIMALES Recycling gegenüber dem Szenario REFERENZ.

Die beschriebenen Kostenentwicklungen sind in dieser Form nicht vollständig auf die realen Verhältnisse übertragbar. Sollten Anlagen zur thermischen oder chemischen Behandlung geplant werden, dann stellt sich für die Investoren unter anderem die Frage, welche Behandlungskapazitäten bereitzustellen sind. Da die Materialflüsse der zu behandelnden Fraktionen künftig abnehmen werden, würden vermutlich ab einem gewissen Zeitpunkt Überkapazitäten geschaffen. Oder anders formuliert, wenn beispielsweise gesetzliche Vorgaben gemacht werden, welche ab einem bestimmten Zeitpunkt eine thermische Behandlung für definierte Ausbausphaltfraktionen zwingend vorschreiben, dann hätte dies zur Folge, dass die Annahmepreise in Abhängigkeit der sinkenden Mengen steigen müssen. Ansonsten können die Investoren die Behandlungsanlagen später nicht mehr rentabel betreiben. Die abnehmenden Mengen könnten alternativ auch mittels einer Behandlungspflicht für den überschüssigen Asphalt, welcher sonst deponiert werden müsste (Abbildung 11c), kompensiert werden. Diese Aspekte sind im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt.

4.2 Schlussbemerkungen

Oft können die langfristigen Auswirkungen von zu definierenden Massnahmen aufgrund der komplexen Zusammenhänge mit den heute zur Verfügung stehenden Grundlagen nicht ausreichend fundiert abgeschätzt werden. Gerade im Bereich der Entsorgung der PAK-belasteten Ausbauasphaltfraktionen gehen die Meinungen, in welche Richtung sich eine nachhaltige Entsorgungsstrategie entwickeln soll, weit auseinander.

Mit den nun vorliegenden Material- bzw. Stoffflussmodellen können die diversen Fragestellungen, welche sich im Zusammenhang mit der Entwicklung einer solchen Strategie ergeben, auf einer relativ fundierten Basis bearbeitet werden. Zudem lassen sich mit Hilfe des Modells die zeitlichen Entwicklungen sämtlicher für die Bewirtschaftung der Strassen relevanten Materialflüsse berechnen, womit der gesamte Materialkreislauf im Modell im Zeitraum zwischen 1960 bis 2035 berücksichtigt ist. Durch den Einbezug der Entsorgungspreise sind zudem erste Aussagen zur Kostenentwicklung möglich. Auch wenn die modellierten Kostenentwicklungen mit Unsicherheiten behaftet sind, können zumindest die unterschiedlichen Tendenzen der verschiedenen Szenarien abgebildet werden.

Den Umwelt- und Tiefbauämtern der teilnehmenden Kantone und des Fürstentums Liechtenstein steht mit dem nun vorliegenden Modell ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem nicht nur die künftige Entsorgung der PAK-haltigen Ausbauasphaltfraktionen untersucht werden kann. Vielmehr lässt sich nun die Entwicklung des gesamten Materialkreislaufs in Abhängigkeit definierter Szenarien modellieren. Dies wird für die Anwender des Modells zu einem deutlich besseren Systemverständnis führen, welches die Grundlagen bildet, um allfällige Massnahmen zur Steuerung der Materialflüsse zu definieren.

5 Literatur

- Bundesamt für Statistik, 2012a: *Strassenlänge 1980 - 2011, Stand Ende Jahr. Tabelle: T11.3.1.4*; <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/03/blank/key/infrastruktur.html>, Neuchâtel.
- Bundesamt für Statistik, 2012b: *Länge der National-, Kantons- und Gemeindestrasse 1950-2011. Tabelle: T 11.3.1.3*; <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/03/blank/key/infrastruktur.html>, Neuchâtel.
- Bundesamt für Umwelt, 2008: *Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege: Teilbereich: Tiefbau – Kennwerte und kantonale Werte - Update 2008*, Bern.
- Bundesamt für Umwelt, 2001: *Luftschadstoff-Emissionen von Strassenbaustellen – Teil I: PAH und VOC*, Umweltmaterialien Nr. 126, Bern.
- Bürzle S. 2013: *Diverse Datengrundlagen zur Mischgutbedarf und Ausbauasphaltnalle im Fürstentum Liechtenstein*. Unterlagen und Tabellen im E-Mail vom 20.2.2013 von Herrn Sven Bürzle vom AfU des Fürstentums Liechtenstein. Vaduz.
- Eugster M. 2012: *Ausbauasphalt im Kanton Thurgau 2008 – 2011 gemäss VeVA-Auswertung*. Excel-Tabelle im Anhang des E-Mails vom 11.5.2012 von Herrn Martin Eugster vom AfU des Kantons Thurgau, Frauenfeld.
- Gubler Ch. 2012: *Mengenangaben Werk Hinwil 2008 - 2011*. FBB Frischbeton + Baustoff AG Hinwil, Hinwil.
- Klein G. 2012: *Massenströme der Produktionswerke der MOAG 2007 - 2011*. Weitergeleitete Angaben der MOAG Baustoffe Holding AG im E-Mail vom 11.12.2012 von Frau Daniela Marugg vom AfU des Kantons St. Gallen, St. Gallen.
- Kunz B. 2012: *Annahmemengen Asphaltgranulat und Mischgutausstoss der Produktionswerke der BHZ, 2007 -2011*. BHZ Baustoff Verwaltungs AG, Zürich.
- Marugg D. 2013: *Deponiestatistik der Reaktorstoffdeponien Tüfentobel und Lienz*. Weitergeleitete Excel-Tabelle im E-Mail vom 05.02.2013 von Frau Daniela Marugg vom AfU des Kantons St. Gallen, St. Gallen
- Sauter Ch. 2012: *Mischgutproduktion 2011 der Turbag und MIFAG*. Weitergeleitete Angaben der BHT Baustoff Holding Thur AG im E-Mail vom 22.10.2012 von Hr. Christian Sauter an Herrn Peter vom AfU des Kantons Thurgau., Müllheim-Wigoltingen.
- Winzeler R. 2012: *Materialflüsse der Ausbauasphaltfraktionen mit PAK-Gehalten 5'000-20'000ppm und >20'000ppm aus den Angaben der VeVA-Datenbank*. Geopartner AG im Auftrag des AWEL, Zürich.

Anhang

A 1. Definierte Transferkoeffizienten für die vier Szenarien

A 1.1 Transferkoeffizienten aus dem Prozess Traige im Szenario „REFERENZ“

Tabelle 6: Im Excel-Blatt „TK_TRI“ können die verschiedenen Transferkoeffizienten in den mit weisser Farbe hinterlegten Feldern eingegeben werden. Die hier aufgeführten Transferkoeffizienten wurden im Szenario „REFERENZ“ des regionalen Modells verwendet.

Transferkoeffizienten aus der Triage (102_TRI) in die weiteren Prozesse

	In die Aufbereitung	In die Behandlung	Dep/Weitere (wird auf 1 ergänzt)	Total (=1)
Anteil PAK < 1K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 1-5K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 5-20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK > 20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	-	1,00	1,00
1990	-	-	1,00	1,00
2010	-	-	1,00	1,00
2020	-	-	1,00	1,00
2035	-	-	1,00	1,00
K/S				
1960	0,20	-	0,80	1,00
1970	0,40	-	0,60	1,00
1980	0,60	-	0,40	1,00
1990	0,80	-	0,20	1,00
2010	0,95	-	0,05	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00

A 1.2 Transferkoeffizienten aus dem Prozess Traige im Szenario „PAK >5'000ppm in Behandlung“

Tabelle 7: Die hier aufgeführten Transferkoeffizienten wurden im Szenario „PAK >5000ppm in Behandlung“ des regionalen Modells verwendet.

Transferkoeffizienten aus der Triage (102_TRI) in die weiteren Prozesse

	In die Aufbereitung	In die Behandlung	Dep/Weitere (wird auf 1 ergänzt)	Total (=1)
Anteil PAK < 1K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 1-5K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 5-20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	0,10	0,90	1,00
1990	-	0,40	0,60	1,00
2010	-	0,90	0,10	1,00
2020	-	0,95	0,05	1,00
2035	-	0,95	0,05	1,00
Anteil PAK > 20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	0,10	0,90	1,00
1990	-	0,40	0,60	1,00
2010	-	0,90	0,10	1,00
2020	-	0,95	0,05	1,00
2035	-	0,95	0,05	1,00
K/S				
1960	0,20	-	0,80	1,00
1970	0,40	-	0,60	1,00
1980	0,60	-	0,40	1,00
1990	0,80	-	0,20	1,00
2010	0,95	-	0,05	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00

A 1.3 Transferkoeffizienten aus dem Prozess Traige im Szenario „PAK >1'000ppm in Behandlung“.

Tabelle 8: Die hier aufgeführten Transferkoeffizienten wurden im Szenario“ PAK >1'000ppm in Behandlung“ des regionalen Modells verwendet.

Transferkoeffizienten aus der Triage (102_TRI) in die weiteren Prozesse

	In die Aufbereitung	In die Behandlung	Dep/Weitere (wird auf 1 ergänzt)	Total (=1)
Anteil PAK < 1K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 1-5K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	0,10	0,90	1,00
1990	-	0,40	0,60	1,00
2010	-	0,90	0,10	1,00
2020	-	0,95	0,05	1,00
2035	-	0,95	0,05	1,00
Anteil PAK 5-20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	0,10	0,90	1,00
1990	-	0,40	0,60	1,00
2010	-	0,90	0,10	1,00
2020	-	0,95	0,05	1,00
2035	-	0,95	0,05	1,00
Anteil PAK > 20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	0,10	0,90	1,00
1990	-	0,40	0,60	1,00
2010	-	0,90	0,10	1,00
2020	-	0,95	0,05	1,00
2035	-	0,95	0,05	1,00
K/S				
1960	0,20	-	0,80	1,00
1970	0,40	-	0,60	1,00
1980	0,60	-	0,40	1,00
1990	0,80	-	0,20	1,00
2010	0,95	-	0,05	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00

A 1.4 Transferkoeffizienten aus dem Prozess Traige im Szenario „MAXIMALES Recycling“ in Behandlung

Tabelle 9: Die hier aufgeführten Transferkoeffizienten wurden im Szenario "MAXIMALES Recycling" des regionalen Modells verwendet.

Transferkoeffizienten aus der Triage (102_TRI) in die weiteren Prozesse

	In die Aufbereitung	In die Behandlung	Dep/Weitere (wird auf 1 ergänzt)	Total (=1)
Anteil PAK < 1K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 1-5K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK 5-20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	0,10	-	0,90	1,00
1990	0,40	-	0,60	1,00
2010	0,90	-	0,10	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00
Anteil PAK > 20K				
1960	-	-	1,00	1,00
1970	-	-	1,00	1,00
1980	-	-	1,00	1,00
1990	-	-	1,00	1,00
2010	-	-	1,00	1,00
2020	-	-	1,00	1,00
2035	-	-	1,00	1,00
K/S				
1960	0,20	-	0,80	1,00
1970	0,40	-	0,60	1,00
1980	0,60	-	0,40	1,00
1990	0,80	-	0,20	1,00
2010	0,95	-	0,05	1,00
2020	0,95	-	0,05	1,00
2035	0,95	-	0,05	1,00

A 1.5 Definierte Entwicklung der Entsorgungspreise in allen Szenarien

Tabelle 10: Im Excel-Blatt „GL Kosten“ können die Entsorgungspreise pro Tonne für die Aufbereitung, Behandlung und Deponierung angegeben werden. Wichtige Bemerkung: Bei den Jahreswerten handelt es sich jeweils um sogenannte Stützwerte, welche für die Erstellung der kubischen Splinefunktionen verwendet werden. Dies bedeutet, dass die resultierende Kurve eventuell nicht durch die Punkte sondern nur im Bereich der eingetragenen Werte verläuft.

	Aufbereitung			Behandlung			Deponierung		
		Fr/t		Fr/t		Fr/t		Fr/t	
Kosten PAK < 1K									
	1960	10,00		15,00		15,00			
	1970	12,73		25,00		17,73			
	1980	15,00		30,00		21,21			
	1990	17,73		35,00		26,21			
	2010	21,21		95,00		30,00			
	2020	21,21		100,00		30,00			
	2035	21,21		100,00		30,00			
Kosten PAK 1-5K									
	1960	10,00		15,00		15,00			
	1970	12,73		25,00		17,73			
	1980	15,00		30,00		21,21			
	1990	17,73		35,00		26,21			
	2010	21,21		95,31		30,00			
	2020	21,21		100,31		30,00			
	2035	21,21		100,31		30,00			
Kosten PAK 5-20K									
	1960	10,00		15,00		15,00			
	1970	12,73		25,00		17,73			
	1980	15,00		30,00		21,21			
	1990	17,73		35,00		26,21			
	2010	28,84		97,76		45,72			
	2020	28,84		102,76		46,90			
	2035	28,84		102,76		46,90			
Kosten PAK > 20K									
	1960	10,00		15,00		15,00			
	1970	12,73		25,00		17,73			
	1980	15,00		30,00		21,21			
	1990	31,37		35,00		37,58			
	2010	91,21		112,03		95,00			
	2020	100,00		122,18		102,76			
	2035	100,00		122,18		102,76			

A 2. Kalibration des Modells mittels den Produktionsdaten

Tabelle 11: Vergleich der Modelldaten (linke Tabelle) mit den Produktionsdaten und dem Ausbauasphaltenanfall (rechte Tabelle) für die gesamte Region. Angaben in Tonnen.

Daten aus dem Modell		Produktionsdaten gemäss Angaben der Mischgutproduzenten					
Input	Modell	Jahr	Thurgau	St. Gallen	Zürich	FL	Total
Deckschicht	347'669	2007		225'325	404'285		
Binderschicht	362'262	2008		135'307	595'908		
Tragschicht	350'000	2009		232'478	710'764		
Input Belag Total	1'059'931	2010		231'435	851'827		
		2011	139'119	324'989	806'083	38'663	
		Mittelwert	139'119	229'907	673'773	38'663	1'081'462
Output Belag	Modell	ARV-Daten 2010	Output	Output	Output	Output	Total
PAK <1K	290'802	Ausbauasphalt					
PAK 1-5K	138'371	<5000 ppm	75'300	82687	220'000	21'442	399'429
PAK 5-20K	84'377	5-20'000ppm	1'000	3280	23'000		27'280
PAK >20K	20'126	>20'000ppm	1'600	1064	26'000	262	28'926
Total	533'676	Total	77'900	87031	269000	21704	455'635