

MINERALISCHE SEKUNDÄRRESSOURCEN

Potentiale von Recyclingprodukten aus Mischabbruchfraktionen



Florian Brunner, David Montalvo, Daniel Ott

Vertiefungsblock Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik
Umweltingenieurwissenschaften, Wintersemester 2005/06
D-BAUG, ETH Zürich

Leitung und Betreuung: Dr. Stefan Rubli

Zürich, März 2006

Danksagung

Dieser Bericht entstand im Rahmen des Vertiefungsblocks für Umweltingenieure in der Fachrichtung Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik im 9. Semester an der ETH Zürich.

Wir möchten uns bei folgenden Personen herzlich bedanken:

Stefan Rubli für die Betreuung der Arbeit und seine hilfreichen Beiträge.

Herrn P. Obrist (HASTAG) und Herrn J. Richi (Richi & Co. Weiningen) für die interessanten Führungen auf ihren Unternehmen, den Einblick in die vielfältigen Betriebsabläufe und die Beantwortung unserer Fragen.

Den Herren, die sich die Zeit genommen haben, um uns ausführlich Auskunft zu geben:

- Herrn H. Eberhard (Eberhard Unternehmungen)
- Herrn B. Suter (Aushub-, Rückbau- und Recycling-Verband ARV)
- Herrn Prof. T. Vogel (Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich)
- Herrn R. Wagner (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich)

Zürich, März 2006

Zusammenfassung

Bauabfälle haben ein grosses Potential zur Wiederverwertung. Eine Voraussetzung für den Einsatz dieser „Rohstoffe“ – sogenannte Sekundärressourcen – ist ein gezielter Rückbau von Gebäuden und eine saubere Trennung der anfallenden Fraktionen direkt auf der Baustelle. Im Jahr 2004 entstanden in der Schweiz rund 11 Millionen Tonnen Bauabfälle.

In der Vergangenheit wurde in der Schweiz ein Grossteil des mineralischen Abbruchmaterials aus dem Bauwerk Schweiz deponiert. Baumaterialien wurden damit zu Einwegprodukten und die Primärkiesressourcen wurden jährlich stärker belastet.

Heute gelten bezüglich einer zukunftsorientierten Abfallbewirtschaftung strengere Richtlinien. Der Deponieraum wird knapper, was die Situation zusätzlich verschärft.

In Zukunft ist mit einem erhöhten Rückbau zu rechnen, da im Sinne einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung der Bedarf an Neubauten auf der „grünen Wiese“ vermehrt durch eine Verdichtung der Ballungszentren kompensiert wird.

In der Folge sollten im Bauwerk Schweiz mineralische Bauabfälle möglichst vollständig als Recyclingprodukte im Bau weiterverwendet werden, um die Stoffkreisläufe zu schliessen. Dabei soll ein Downcycling verhindert werden, d.h. die anfallenden Abbruchmaterialien sollen zu möglichst hochwertigen Produkten weiterverarbeitet werden, um Nachhaltigkeit über mehrere Gebäudegenerationen zu garantieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist, das Potential von Recyclingprodukten aus Mischabbruchfraktionen zu bestimmen. Die stark schwankende Zusammensetzung des Mischabbruchs beeinflusst die Qualität des Recycling-Betons in grossem Masse. Die Feinfraktion im Mischabbruch kann mit Schadstoffen belastet sein und sollte daher entweder deponiert oder in gebundener Form eingesetzt werden. Ein hoher Feinfraktionsanteil im Beton hat jedoch negative Auswirkungen auf dessen statische Eigenschaften und Verarbeitbarkeit.

Mit Hilfe eines dynamischen Stoffflussmodells kann in dieser Arbeit gezeigt werden, dass das anfallende Abbruchmaterial bis spätestens 2023 nicht mehr nur im Tiefbau und bis spätestens 2028 nicht mehr nur lose verbaut werden kann. Diese Abschätzung bezieht sich ausschliesslich auf die Mengen. Einschränkungen (technische, gesetzliche usw.) werden dabei nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund kann das Abbruchmaterial schon deutlich früher nicht mehr vollständig im Tiefbau eingesetzt werden. Aus einer Analyse verschiedener alternativer Verwertungsmöglichkeiten resultiert, dass das grösste Absatzpotential für rückgebaute mineralische Baustoffe weiterhin im Recycling-Beton liegt. Eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung setzt folgende Entwicklungen voraus: Bis 2050 müssen mindestens 70% des im Hochbau verwendeten Betons durch RC-Beton B gedeckt werden. Dieser soll bis zu 80% Betongranulat als Zuschlagstoff enthalten. Weiter soll RC-Beton M in den nächsten 50 Jahren 10% des Betonbedarfs im Hochbau und 70% des Betonbedarfs im Tiefbau abdecken. Bis 2050 muss dabei der Zuschlagstoff zu 100% durch Mischabbruch, d.h. Mischabbruchgranulat mit zugehöriger Feinfraktion, ersetzt werden.

Die Umsetzung dieses Konzeptes bedingt jedoch den Abbau der Vorurteile gegenüber dem „Abfallprodukt“ RC-Beton und erfordert eine breite Akzeptanz durch alle beteiligten Parteien.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	II
1 Einleitung.....	1
1.1 Überblick	1
1.2 Definitionen	2
1.3 Fragestellung	2
1.4 Vorgehen	3
2 Systemaufbau 1990 – 2000	3
3 Modell	5
3.1 Modellaufbau und Annahmen.....	5
3.2 Kalibration des Modells (1990 bis 2000).....	7
3.3 Validierung	9
3.4 Modellierung der zukünftigen Baustoffflüsse (2000 bis 2050).....	11
3.5 Sensitivitätsanalyse	13
4 Beschreibung der Verwertungsmöglichkeiten.....	16
4.1 Erweitertes System.....	16
4.2 RC-Beton B.....	16
4.3 RC-Beton M.....	17
4.4 Selbstverdichtender Beton (SCC).....	17
4.5 Mörtel.....	17
4.6 Blähgranulate.....	17
4.7 Kalksandsteine	19
5 Potentialabschätzungen	20
5.1 RC-Produkte vs. Kiesbedarf	20
5.2 Betongranulat	21
5.3 Mischabbruchgranulat	22
5.4 Feinfraktion	23
5.5 Ökonomische Betrachtung.....	25
6 Diskussion	26
7 Ausblick	28
Literaturverzeichnis.....	29
A Anhang.....	31
A.1 Kalibrationsperiode von 1990 – 2000: Annahmen und Datengrundlage.....	31
A.2 Verwertungsmöglichkeiten: Entwicklung der Marktanteile und Zusammensetzungen.....	35
A.3 Modellbeschreibung	36
A.4 Auszüge aus der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle.....	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systemaufbau von 1990 – 2000.....	3
Abbildung 2: Lagerentwicklung und Abbruchquoten von Hochbau und Tiefbau.....	5
Abbildung 3: Zusammensetzung des Abbruchmaterials aus dem Hochbau.....	6
Abbildung 4: Marktanteile von RC-Beton B und M in Hochbau bzw. Tiefbau.....	8
Abbildung 5: Kalibration auf Primärkiesbedarf und Fluss in die Deponie.....	8
Abbildung 6: Baumaterialflüsse im Jahr 1997.....	10
Abbildung 7: Validierung des Modells: Zementverbrauch.....	11
Abbildung 8: Gesamter Materialbedarf in Hochbau und Tiefbau.....	12
Abbildung 9: Abbruchmaterialfluss vs. Kiesbedarf lose/gebunden bzw. Hochbau/Tiefbau.....	12
Abbildung 10: Sensitivitätsanalyse Abbruchzusammensetzung Hochbau.....	13
Abbildung 11: Sensitivitätsanalyse Abbruchquote Hochbau.....	14
Abbildung 12: Kombinierte Sensitivitätsanalyse.....	14
Abbildung 13: Systemaufbau von 2000 bis 2050.....	16
Abbildung 14: Marktanteile der Verwertungsmöglichkeiten.....	19
Abbildung 15: Abbruchmaterialfluss vs. Kiesbedarf gebunden.....	20
Abbildung 16: Potentiale der Verwertungsmöglichkeiten für Betongranulat.....	21
Abbildung 17: Betongranulat (in SCC, RC-Beton B) vs. Kiesbedarf gebunden im Hochbau.....	22
Abbildung 18: Potentiale aller Verwertungsmöglichkeiten für Mischabbruchgranulat.....	22
Abbildung 19: Potential von RC-Beton M für Mischabbruchgranulat.....	23
Abbildung 20: Potentiale aller Verwertungsmöglichkeiten für die Feinfraktion.....	23
Abbildung 21: Potential von RC-Beton M für die Feinfraktion.....	24
Abbildung 22: Lagerveränderung Hochbau: Berücksichtigung Konjunktur.....	34
Abbildung 23: Sekundärmaterialanteil in RC-Beton B und RC-Beton M.....	36
Abbildung 24: Verwendungsmöglichkeiten RC-Baustoffe: Einbauvorschriften.....	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzungen von Primärbeton und RC-Beton von 1990 – 2000	8
Tabelle 2: Lagerbestand in Hochbau und Tiefbau im Jahr 2000.....	31
Tabelle 3: Input in den Hochbau im Jahr 1997	31
Tabelle 4: Zusammensetzung RC-Produkte in Aufbereitung.....	31
Tabelle 5: Erwartete Abbruchzusammensetzung im 2050.....	31
Tabelle 6: Abbruchzusammensetzung aus Hoch- und Tiefbau im Jahr 1997	31
Tabelle 7: Entwicklung der Abbruchzusammensetzung aus Hoch- und Tiefbau	32
Tabelle 8: Zusammensetzung Baustoffbedarf im Jahr 1997	32
Tabelle 9: Rückfluss RC-Kies lose und Asphaltgranulat.....	33
Tabelle 10: Zusammensetzungen von Zement, Mauerwerk und Mörtel.....	33
Tabelle 11: Investitionen in den Neubau im Hochbau	33
Tabelle 12: Lagerveränderung und Abbruch Hochbau: Berücksichtigung Konjunktur	34
Tabelle 13: Lagerentwicklung und Abbruchquote von Hochbau und Tiefbau	34
Tabelle 14: Verwertungsmöglichkeiten: Zusammensetzungen.....	35
Tabelle 15: Logistische Wachstumsparameter der Verwertungsmöglichkeiten.....	35
Tabelle 16: Zusammensetzung Recyclingbaustoffe nach BLWAL.....	38

1 Einleitung

1.1 Überblick

Seit den 90er-Jahren hat in der Schweiz die Verwertung von Bauabfällen vermehrt an Bedeutung gewonnen. Der Bund möchte mit einer lenkenden Gesetzgebung die nachhaltige Entwicklung der Schweiz fördern. Dazu gehören das Umweltschutzgesetz (USG, 1983) und die Technische Verordnung über Abfälle (TVA, 1990), die unter anderem verhindern sollen, dass verwertbares Material deponiert wird. Das Ziel einer modernen Abfallwirtschaft ist eine intelligente Ressourcenbewirtschaftung mit möglichst weitgehender Schliessung von Stoffkreisläufen. Vorrangige Elemente dieser Zielsetzung sind die Bestrebungen zur Vermeidung, Verminderung und Verwertung der Abfälle. Die dafür notwendigen Massnahmen sollten ökologisch sinnvoll, technisch machbar und wirtschaftlich tragbar sein.

In der Schweiz fallen jährlich beträchtliche Mengen an Bauabfällen an. Im Jahr 2004 entstanden laut BUWAL rund 11 Mio. Tonnen Bauabfälle (ohne Aushub). Zum Vergleich: Die Siedlungsabfallmenge betrug in diesem Jahr etwa ein Viertel davon [5]. Das anfallende Material stellt somit eine wichtige Quelle für mineralische Sekundärressourcen dar, die wieder als Zuschlagstoffe im Beton verbaut werden können.

Es ist in Zukunft mit einem vermehrten Rückbau von Gebäuden zu rechnen, da der Anteil der versiegelten Flächen in der Schweiz nicht unbegrenzt wachsen kann und soll – in der Folge wird das Bauen auf der „grünen Wiese“ immer mehr abnehmen. Das Bauwerk Schweiz¹ befindet sich immer noch in einer Wachstumsphase und wird weiter verdichtet werden. Die Menge an rückgebautem Material – besonders die der mineralischen Bauabfälle, d.h. Beton, Mauerwerk und Ziegel etc., die neben dem Aushubmaterial den grössten Anteil ausmachen – wird weiter zunehmen. Durch einen vermehrten Einsatz von Recycling-Baustoffen können so das knappe Deponievolumen und die natürlichen Kiesvorräte geschont werden. Dabei soll darauf geachtet werden, dass die Sekundärrohstoffe in möglichst hochwertige Produkte verarbeitet werden, um ein Downcycling zu verhindern und einen geschlossenen Baustoffkreislauf über mehrere Gebäudegenerationen zu ermöglichen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass im Vergleich zu Betonabbruch vor allem der Mischabbruch durch seine wechselnde stoffliche Zusammensetzung für die Weiterverarbeitung problematisch ist. Die grössere Porosität und Oberfläche der gebrochenen Körner und ihre schwankende Grössenverteilung erfordern eine höhere Menge an Zement und Wasser, um einen gut verarbeitbaren Beton herzustellen. Es resultiert ein Produkt mit anderen mechanischen Eigenschaften bezüglich Frostbeständigkeit, Schwinden, Wasserleitfähigkeit und Druckfestigkeit [7, 8].

Der relativ hohe Anteil der Feinfraktion im Mischabbruch hat negative Auswirkungen auf die Betoneigenschaften. Zudem kann die Feinfraktion je nach Herkunft aufgrund ihrer grossen Oberfläche eine hohe Schadstoffbelastung aufweisen. Deshalb sollte sie auch gemäss der SN-Norm abgesiebt werden und wird heute in der Folge meist deponiert. Ökologisch wie auch ökonomisch wäre es jedoch sinnvoll, den Feinanteil in einem geeigneten Produkt weiter zu verwerten [18].

¹ Als Bauwerk Schweiz werden die rund zwei Millionen Gebäude und die gesamte infrastrukturelle Vernetzung (Strassen, Wasserversorgung und -entsorgung, Telekommunikation, Energieverteilung etc.) definiert.

1.2 Definitionen

Als Bauabfälle werden alle Abfälle bezeichnet, die bei Bautätigkeiten anfallen [19], nämlich:

- Unverschmutztes Aushubmaterial
- Bauschutt, d.h. mineralische Bauabfälle, die aus Steinen und gesteinsähnlichen Bestandteilen (Backsteine, Beton, Ziegel usw.) bestehen
- Brennbare Bauabfälle wie Holz, Karton, Kunststoffe und Textilien
- Bausperrgut, d.h. Bauabfall-Gemisch, das verschiedene Stoffe wie Altholz, Metalle, Kabel, Karton und Kunststoffe sowie mineralische Anteile enthält

Der Bauschutt wird weiter in folgende Fraktionen unterteilt [4]:

- *Ausbauasphalt*: Oberbegriff für den durch schichtweises Kaltfräsen eines Asphaltbelages gewonnenen, kleinstückigen Fräsasphalt und den beim Aufbrechen bituminöser Schichten in Schollen anfallenden Aufbruchasphalt.
- *Strassenaufbruch*: Durch Ausheben, Aufbrechen oder Fräsen von nicht gebundenen Fundationsschichten und von hydraulisch stabilisierten Fundations- und Tragschichten gewonnenes Material.
- *Betonabbruch*: Durch Aufbrechen oder Fräsen von bewehrten oder unbewehrten Betonbauten und Belägen gewonnenes Material.
- *Mischabbruch*: Gemisch mineralischer Fraktionen von Massivbauteilen wie Beton-, Backstein-, Kalksandstein- oder Natursteinmauerwerk.

Für die Sekundärbaustoffe sind bestimmte Qualitätsanforderungen (Tabelle 16 im Anhang) und Anwendungsbereiche (Abbildung 24 im Anhang) vorgeschrieben. Von grosser Bedeutung ist eine hohe Sortenreinheit der einzelnen Fraktionen. Verunreinigter Bauschutt ist nicht verwertbar und muss in einer geeigneten Anlage entsorgt werden.

1.3 Fragestellung

In dieser Arbeit sollen die Potentiale verschiedener Verwertungswege für den Mischabbruch und dessen Feinanteil in Bezug auf die Stoffflüsse und die damit verbundenen Aufbereitungs- und Produktionstechniken abgeschätzt werden. Es ist zu prüfen, für welche Produkte die besten Absatzchancen bestehen. Dabei ist auch darauf zu achten, dass der Mischabbruch in Anwendungen gelangt, die ein Mehrfachrecycling erlauben.

Die Abschätzungen sollen auf der zeitlichen Entwicklung der anfallenden Bauschutt mengen und den nachgefragten Mengen von Recyclingprodukten (RC-Produkten) in den nächsten 50 Jahren basieren. Um eine Beurteilung machen zu können ist es wichtig, die Mischabbruchflüsse nicht isoliert zu betrachten, sondern auch den Betonabbruch zu berücksichtigen. So kann eruiert werden, welche Prozesse wesentlich zur vollständigen Verwertung von mineralischen Bauabfallfraktionen beitragen.

Abschliessend soll ein Konzept zur Bewirtschaftung von Sekundärressourcen erstellt werden.

1.4 Vorgehen

Zu Beginn wird ein geeignetes Stoffflusssystem definiert, um die aktuellen Verhältnisse möglichst genau darzustellen. Das System beinhaltet die wichtigsten Prozesse und Flüsse von mineralischen Baumaterialien in der Schweiz. Es bildet die Basis für ein dynamisches Modell, mit welchem abgeschätzt werden soll, wie sich die Baumaterialflüsse in der Schweiz in Zukunft entwickeln werden.

Das Modell wird für eine Kalibrationsperiode von 1990 bis 2000 mit vorhandenen Daten geeicht. Die dabei geschätzten Parameter werden in einer Extrapolationsphase von 2000 bis 2050 weiterverwendet, um eine möglichst realistische Entwicklung vorauszusagen. Diese soll uns eine Idee geben, in welche Richtung sich unser System bewegen könnte und sollte im Sinne einer Tendenz oder eines möglichen Trends verstanden werden.

In der Folge werden verschiedene Verwertungsmöglichkeiten für die RC-Produkte definiert und als neue Prozesse im System eingeführt. Das dynamische Modell erlaubt nun eine Potentialabschätzung für jeden Prozess in Bezug auf die Masse, die pro Jahr umgesetzt werden könnte. Damit kann eine Aussage darüber gemacht werden, ob es sich lohnt, entsprechende Produktionen zu fördern.

2 Systemaufbau 1990 - 2000

In Abbildung 1 ist das System aufgeführt, welches als Grundlage für die Darstellung des „Ist-Zustandes“ von 1990 - 2000 verwendet wird. Die relevanten Prozesse und Flüsse werden schweizweit bestimmt und quantifiziert. Als Grundlage dienen Statistiken und Studien der Schweiz, Interviews mit Experten und Unternehmern.

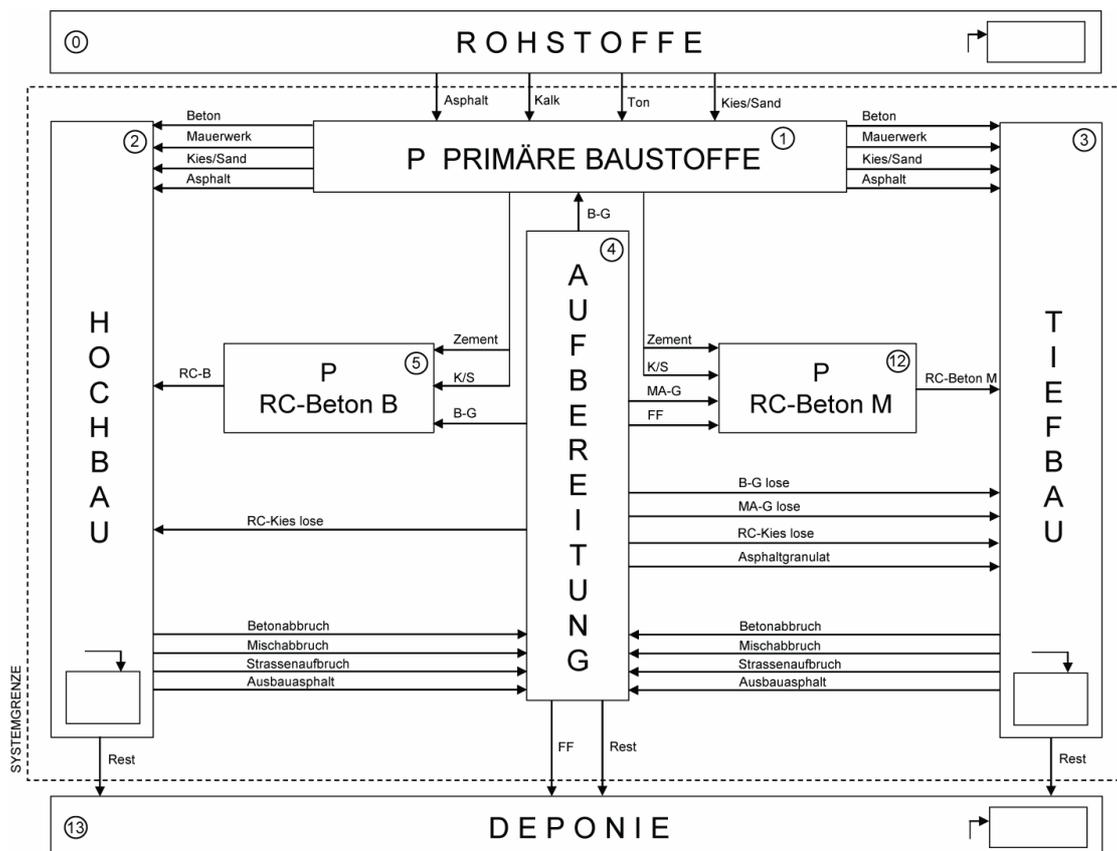


Abbildung 1: Systemaufbau von 1990 - 2000. Es werden folgende Abkürzungen verwendet: Betongranulat (B-G), Mischabbruchgranulat (MA-G), Feinfraktion (FF), Kies/Sand (K/S).

Das Bauwerk Schweiz ist in die Prozesse Hoch- und Tiefbau (HB, TB) unterteilt. Zum Hochbau wird auch die Parzelle mitgezählt, auf der ein Gebäude steht (z.B. Parkflächen, Vorplätze etc.). Es handelt sich also um den Tiefbau im Hochbau, in

dem loser RC-Kies als Kofferung verwendet werden kann. Im Tiefbau werden neben dem RC-Kies auch Beton- und Mischabbruchgranulat lose verbaut.

Der Bedarf an mineralischen Baustoffen (Beton, Mauerwerk, Kies/Sand und Asphalt) wird zum grössten Teil vom Prozess Primäre Baustoffe gedeckt. Kalk und Ton werden für die Zementherstellung verwendet, Ton auch für die Produktion von Mauerwerk (Backsteine). Die Prozesse RC-Beton B (HB) und RC-Beton M (TB) ersetzen einen Teil des Betonbedarfs durch Beton aus Abbruchmaterial und Primärrohstoffen. RC-Beton B bezeichnet dabei Recyclingbeton mit über 25% Betongranulatanteil (bezogen auf die Masse der Zuschlagstoffe). Analog ist RC-Beton M als Recyclingbeton mit über 25% Mischabbruchgranulat und Feinfraktion definiert.

In der Aufbereitung wird Betonabbruch zu Betongranulat, Mischabbruch zu Mischabbruchgranulat und Feinfraktion, Strassenaufbruch zu RC-Kies lose und Ausbauasphalt zu Asphaltgranulat.

Die Flüsse „Rest“ aus dem Hochbau und dem Tiefbau bezeichnen verunreinigte Abbruchmaterialien, welche nicht aufbereitet und deshalb deponiert werden. Der Fluss „Rest“ aus der Aufbereitung in die Deponie hingegen beinhaltet alle Abbruchmaterialien, die in den Prozessen 1, 5 und 12 keinen Absatz finden. Die aus dem Mischabbruch abgetrennte Feinfraktion (FF) wird wenn möglich im RC-Beton M zusammen mit dem Mischabbruchgranulat verbaut, während der Überschuss in die Deponie geht.

Ausserhalb der Systemgrenze befinden sich die Prozesse Rohstoffe und Deponie, welche die Quelle bzw. Senke von Stoffen darstellen.

Ausbauasphalt und Strassenaufbruch werden der Vollständigkeit halber mitberücksichtigt, es wird aber in der Auswertung nicht näher auf sie eingegangen.

3 Modell

Der Modellaufbau basiert auf dem in Abbildung 1 beschriebenen System. Das Modell wird in Microsoft EXCEL mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr implementiert und die einzelnen Prozesse mittels Massenbilanzen verknüpft.

Die getroffenen Annahmen werden im folgenden Kapitel detailliert beschrieben.

3.1 Modellaufbau und Annahmen

3.1.1 Logistisches Wachstum

Die meisten zeitlichen Entwicklungen, welche in dem Modell verwendet werden, basieren auf einer sogenannten logistischen Wachstumskurve [2]. Diese beruht auf der Funktion, wie sie in Gleichung 1 beschrieben ist und wird verwendet, um Wachstumsprozesse mit Sättigung zu modellieren.

$$\alpha(t) = \alpha_0 \cdot \left(1 + \frac{(1 - \mu) \cdot (1 - e^{-\omega t})}{\mu - (\mu - 1) \cdot e^{-\omega t}} \right) \quad (\text{Gleichung 1})$$

α_0	Startwert
α_{\max}	Endwert
$\mu = \frac{\alpha_0}{\alpha_{\max}}$	
ω	Formparameter
t	Zeit

Als Beispiel einiger Kurven sei hier auf die Abbildung 14 verwiesen.

3.1.2 Lagerwachstum und Abbruch

Die Materiallager in Hoch- und Tiefbau werden auf der Materialflussrechnung für die Schweiz abgestützt [15], d.h. im Jahr 2000 werden im Hochbau 1'390, im Tiefbau 810 Mio. Tonnen Kies und Sand, Asphalt, Beton und Mauerwerk gelagert (Tabelle 2 im Anhang).

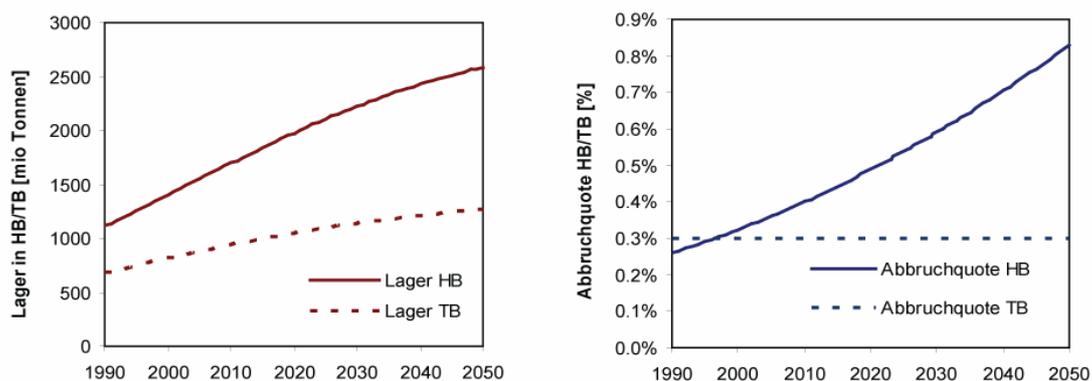


Abbildung 2: Lagerveränderungen in Hochbau und Tiefbau (links) und Abbruchquoten in Hochbau und Tiefbau von 1990 bis 2050.

Abbildung 2 zeigt die angenommene Entwicklung von Lager und Abbruchquote in Hoch- und Tiefbau, welche auf einem logistischen Wachstum beruht. Bis im Jahr 2050 wird das Lager im Hochbau auf knapp 2'600 Mio. Tonnen wachsen; im Tiefbau steigt das Lager auf knapp 1'300 Mio. Tonnen an. Wir gehen davon aus, dass die Lager der Schweiz auch in 50 Jahren noch einen Zuwachs verzeichnen, d.h. ein „steady state“ wird auch 2050 nicht erreicht, auch wenn der Lagerzuwachs stetig abnimmt.

Die Abbruchquote im Tiefbau bleibt bei konstanten 0,3%, während sie im Hochbau von 0,26% im Jahr 1990 logistisch auf 0,8% im Jahr 2050 steigt.

Die genauen Parameter der Kurven für die Lagerveränderungen und die Abbruchquoten sind in Tabelle 13 im Anhang dargestellt.

3.1.3 Zusammensetzung des Abbruchs

Die Zusammensetzung des Abbruchs aus dem *Hochbau* verändert sich über die Zeit. Der Anteil an Betonabbruch am Gesamtabbruch im Hochbau nimmt bis ins Jahre 2050 stetig zu, derjenige des Mischabbruchs dagegen ab. Diese Entwicklung beruht auf der Annahme, dass die Zusammensetzung des Inputs von 1997 die Zusammensetzung des Outputs in 50 Jahren (durchschnittliche Lebensdauer eines Gebäudes) bestimmt. Die genaue Berechnung der Abbruchzusammensetzung im Jahr 2050 ist in Tabelle 3 bis Tabelle 7 im Anhang beschrieben. Abbildung 3 zeigt die Veränderung der Zusammensetzung grafisch. Die Anteile an Strassenaufbruch und Ausbauasphalt werden für die betrachtete Zeitspanne als konstant angenommen.

Die Zusammensetzung des Abbruchmaterials aus dem *Tiefbau* (Betonabbruch, Mischabbruch, Strassenaufbruch und Ausbauasphalt) bleibt über die gesamte Zeitspanne konstant.

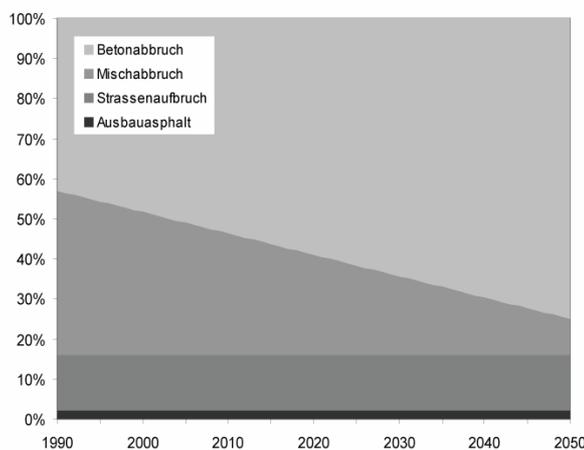


Abbildung 3: Veränderung der Zusammensetzung des Abbruchmaterials aus dem Hochbau.

3.1.4 Materialbedarf

Der Bedarf in Hoch- und Tiefbau berechnet sich wie folgt:

$$\text{Materialbedarf} = \text{Lagerwachstum} + \text{mineralisches Abbruchmaterial}$$

Es wird angenommen, dass die Anteile der jeweiligen Baustoffe, die in Hoch- und Tiefbau verwendet werden, konstant bleiben (Tabelle 8 im Anhang).

3.1.5 Aufbereitung

Der aus dem Tiefbau stammende *Ausbauasphalt* wird nach der Aufbereitung vollständig einer Wiederverwertung im Tiefbau zugeführt.

Der aus dem Hochbau stammende *Strassenaufbruch* wird nach der Aufbereitung zu 50% in Form von *RC-Kies lose* einer Wiederverwertung im HB zugeführt. Der aus dem Tiefbau stammende Strassenaufbruch geht zu 100% wieder in den TB zurück.

Betonabbruch wird zu Betongranulat.

Mischabbruch wird zu Mischabbruchgranulat (70%) und Feinfraktion kleiner 8 mm (30%).

Die Materialflüsse von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Feinfraktion von der Aufbereitung in die Deponie hängen vollständig von der Wiederverwertungsquote des Prozesses Aufbereitung ab, d.h. alles was nicht wieder in Hoch-, Tiefbau,

Produktion Primäre Baustoffe oder den jeweiligen alternativen Verwertungsprozess zurückgeführt wird, wird in einer Deponie abgelagert.

Betongranulat und Mischabbruchgranulat können lose im Strassenbau als Kofferung verwendet werden.

3.1.6 Deponie

Im Bezug auf Material, welches direkt von der Baustelle in die Deponie gelangt, d.h. Material welches nicht wieder aufbereitet werden kann, werden folgende Annahmen getroffen: Sowohl im Hoch- wie auch im Tiefbau gehen 5% des Betonabbruchs und 10% des Mischabbruchs nicht in die Aufbereitung, sondern werden direkt deponiert.

3.2 Kalibration des Modells (1990 bis 2000)

3.2.1 Vorgehen

Mit Hilfe der Funktion „Solver“ in EXCEL werden diejenigen Parameter geschätzt, die nur über gewisse Rahmenbedingungen definiert, jedoch nicht direkt bestimmt werden konnten. Zusätzlich wird das Modell mittels Zielgrössen kalibriert.

Als Zielgrössen werden betrachtet:

1. Die Differenz zwischen den bekannten Daten des Kiesverbrauches (Primärkies) und des mit dem Modell berechneten Flusses.
2. Die Differenz zwischen den bekannten Daten des Flusses in die Deponie und des mit dem Modell berechneten Flusses.

Aus dieser Differenz wird jeweils die Summe der Quadrate über die Jahre 1990-2000 berechnet. Diese Summe soll unter Einhaltung von verschiedenen Nebenbedingungen minimal werden (Methode der kleinsten Quadrate).

Neben diesen zwei Zielgrössen wird auch auf eine Übereinstimmung mit diversen anderen Daten wie z.B. den Abbruchmengen, dem Gesamtbetonbedarf und dem Tonverbrauch, geachtet [3, 15].

3.2.2 Resultate

Im Wesentlichen unbekannt und schwierig zu definierende Grössen sind die durchschnittlichen schweizweiten Zusammensetzungen von Primärkiesbeton, RC-Beton M und RC-Beton B (Tabelle 1). Die zeitlichen Entwicklungen des Marktanteils von RC-Beton M und RC-Beton B sind ebenfalls unbekannt. Sie werden so bestimmt, dass die resultierenden Flüsse in der richtigen Grössenordnung liegen. Der Verlauf der Entwicklung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Tabelle 1: Durchschnittliche Zusammensetzung von „Standardbeton“ in Hoch- und Tiefbau und der Produkte RC-Beton B im HB und RC-Beton M im TB, die für die Kalibrationsperiode von 1990 – 2000 verwendet wurden.

	Zement	Primärkies	MA-G	B-G	FF	Summe
Primärbeton HB (I)	300	1950	-	50	-	2300
Primärbeton TB (I)	200	2000	-	-	-	2200
RC-Beton B HB (5)	320	1500	-	500	-	2320
RC-Beton M TB (12)	150	1600	280	-	120	2150

Die Zusammensetzungen von Zement, Mauerwerk und Mörtel sind im Anhang in Tabelle 10 gegeben.

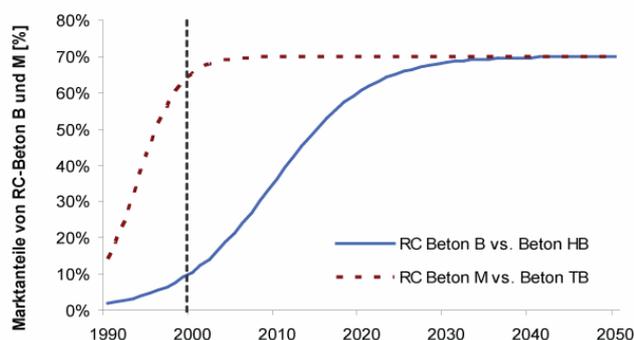


Abbildung 4: Durchgezogene Linie: Anteil von RC-Beton B am Gesamtbetonbedarf im HB. Gestrichelt: Anteil von RC-Beton M am Gesamtbetonbedarf im TB. Die Zusammensetzungen von RC-Beton B bzw. RC-Beton M sind in Tabelle 1 beschrieben.

In der Abbildung 5 sind die für die Kalibration verwendeten Zielgrößen abgebildet. Sie zeigt einen Vergleich zwischen den bekannten Daten und dem modelliertem Primärkiesbedarf bzw. Deponiefluss. Bei beiden ist rein optisch eine gute Übereinstimmung erkennbar.

Die minimierte Summe beträgt im Falle des:

- Deponieflusses $5.3 \text{ (Mio. Tonnen)}^2$ über die betrachteten 10 Jahre, was umgerechnet pro Jahr etwa einer Abweichung von 0.23 Mio. Tonnen entspricht.
- Primärkiesbedarfs zwischen 1990 und 2000 $18.9 \text{ (Mio. Tonnen)}^2$, was pro Jahr 0.43 Mio. Tonnen entspricht.

Diese Übereinstimmung wird für beide Zielgrößen als zufrieden stellend betrachtet. Die für die Kalibrationsphase geschätzten Parameter sind im Anhang aufgeführt und werden in der Folge auch für die Extrapolationsphase von 2000 bis 2050 verwendet.

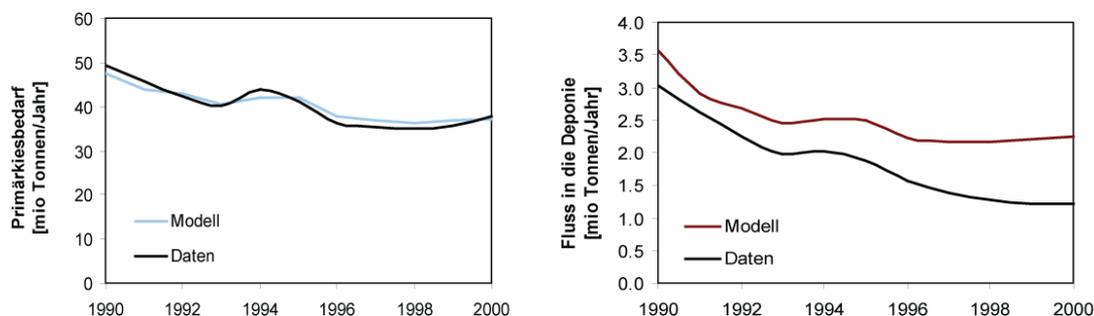


Abbildung 5: Tatsächlicher und modellierter Primärkiesbedarf (links), bzw. tatsächlicher und modellierter Fluss in die Deponie (rechts).

Anmerkung: Für die Kalibrationsphase wird die modellierte Kurve des Primärkiesbedarfs mit vorhandenen Daten der Investitionen in den Neubau im Hochbau [12] gekoppelt, um die in den 90er Jahren stark ausgeprägten Konjunkturschwankungen zu berücksichtigen. Dabei wird vom Modellwert des Jahres 2000 ausgegangen, dieser als 100%

definiert und danach über die prozentualen Veränderungen der Investitionen gemäss Abbildung 22, Tabelle 11 und Tabelle 12, welche im Anhang zu finden sind, bis ins Jahr 1990 zurückgerechnet. Der Abbruch aus dem Hochbau wird in gleicher Art der Baukonjunktur angepasst.

3.3 Validierung

3.3.1 Situation 1997

Nach der erfolgten Kalibration auf die zwei Zielgrössen sollten nun sämtliche Flüsse die Realität möglichst genau abbilden. Für den Vergleich mit den „realen“ Massenflüssen wird das Jahr 1997 gewählt, da dieses die beste Datengrundlage bietet [6, 12, 17]. Abbildung 6 zeigt das Resultat unserer Berechnungen für das Jahr 1997.

Das Modell stimmt in allen Belangen gut mit den vorhandenen Daten überein. Nicht dargestellt sind innere Flüsse, wie zum Beispiel die direkte Wiederverwertung von Kies im Tiefbau. Das Lager im Hochbau ist fast doppelt so gross wie das Lager im Tiefbau. Im Jahr 1997 werden im Hochbau knapp 0.3% des gesamten Lagers abgebrochen, d.h. es gehen 3.8 Mio. Tonnen in den Aufbereitungsprozess. Die Abbruchquote beim Tiefbau beträgt 0.3%. Es gelangen somit 2 Mio. Tonnen in die Aufbereitung.

Fast 90% des verbauten Betons gelangen in den Hochbau, 10% in den Tiefbau.

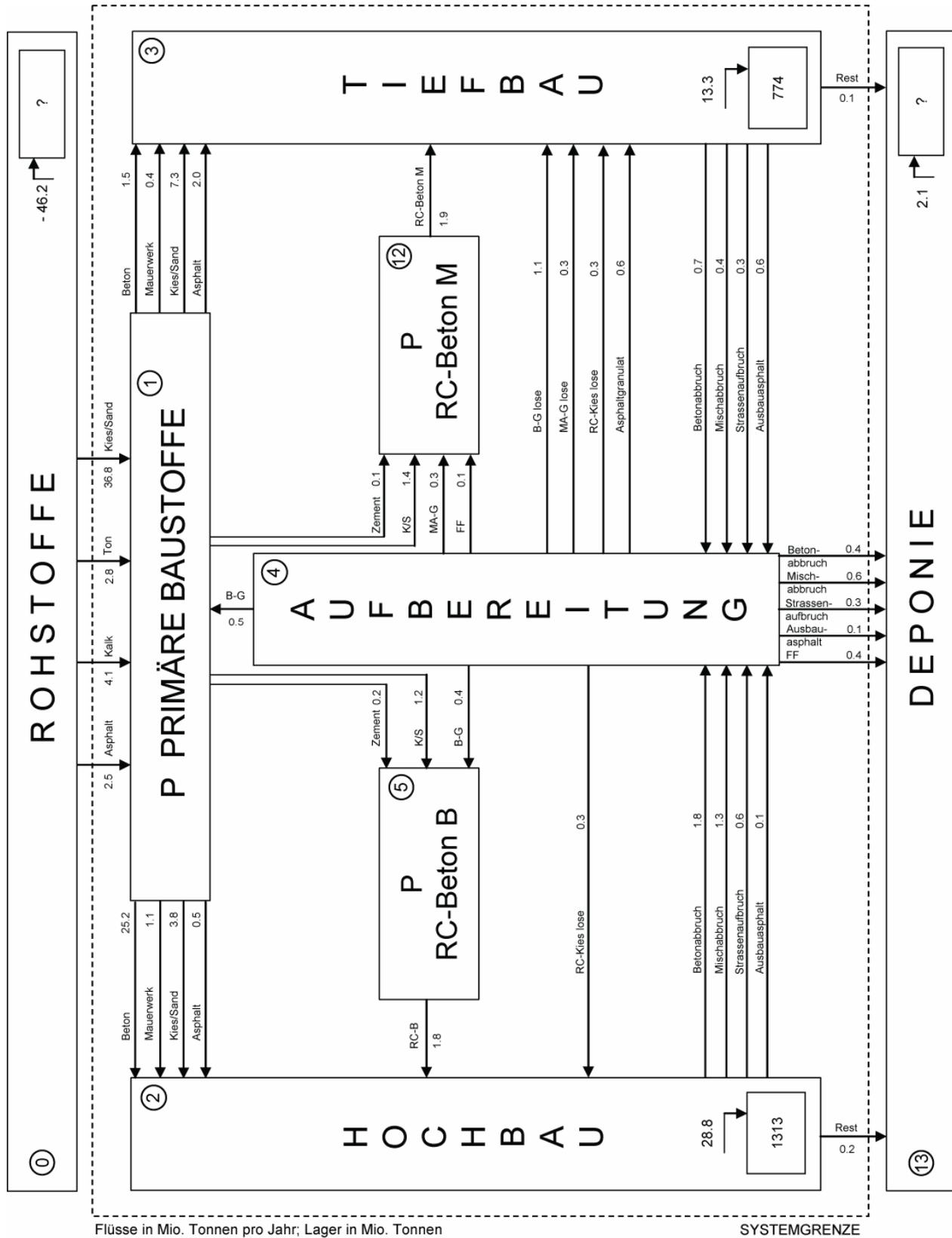


Abbildung 6: Berechnungen des Modells für das System für das Jahr 1997.

3.3.2 Validierung mit Zementbedarf

Obiges Kapitel hat gezeigt, dass die Baumaterialflüsse in einem bestimmten Jahr sehr gut abgebildet werden können. Um das Modell nun auch in Bezug auf den zeitlichen Verlauf einer unabhängigen Grösse zu validieren, wird ein Vergleich der modellierten Daten mit dem schweizerischen Gesamtbedarf von Zement (*cemsuisse*, Import berücksichtigt [20]) für die Periode 1990 bis 2005 gemacht. In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass die Kalibrationsphase den Zementbedarf zufrieden stellend abzubilden vermag. Auch in den Jahren 2001 bis 2005 wird eine gute Übereinstimmung erreicht, obwohl die konjunkturbedingten Schwankungen nicht erfasst werden.

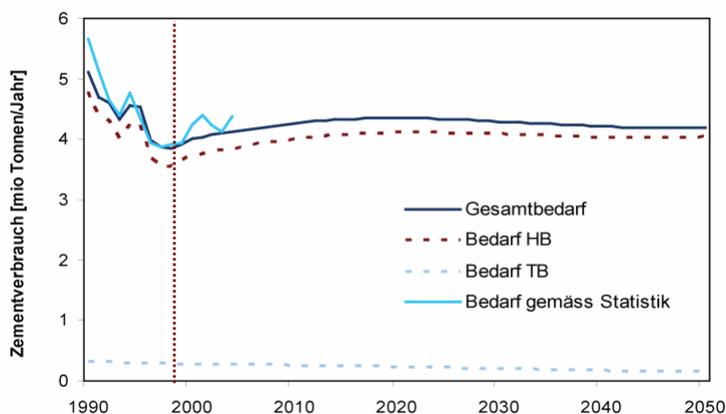


Abbildung 7: Berechneter und realer Zementverbrauch für die Kalibrationsperiode von 1990 – 2000.

3.4 Modellierung der zukünftigen Baustoffflüsse (2000 bis 2050)

Nach der Kalibration des Modells soll nun in einem weiteren Schritt eine Abschätzung der Stoffflüsse für die Periode zwischen 2000 und 2050 durchgeführt werden. Mit Hilfe der Extrapolation der Kalibrationsphase wird auf die Potentiale der später definierten Verwertungsmöglichkeiten für Mischabbruchfraktionen geschlossen.

3.4.1 Gesamter Materialbedarf

Wenn man nun den gesamten daraus resultierenden Bedarf an Baumaterialien (im System: Beton, Mauerwerk, Kies/Sand und Asphalt) betrachtet, ist zu erkennen, dass dieser gemäss Abbildung 8 sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau in den nächsten 50 Jahren nicht bedeutend sinken wird. Dies ist der Fall, da sich auch das Wohnraumbedürfnis pro Person in dieser Zeitspanne nicht signifikant ändert und wir damit rechnen, dass zwar in Zukunft weniger auf der „grünen Wiese“ gebaut wird, jedoch die Ersatzbauten in den Ballungszentren voluminöser, d.h. entweder höher oder dichter, als ihre Vorgänger gebaut werden.

Im Gegensatz zur Kalibrationsperiode, bei welcher der Primärkiesbedarf für den Hochbau an die Konjunkturschwankungen gekoppelt wird, können diese bei einer Extrapolation über 50 Jahre nicht berücksichtigt werden. Die Kurve ist ab 2000 also im Sinne einer Trendlinie zu verstehen. In Wirklichkeit dürfte sich der gesamte Materialbedarf im Bereich der Trendlinie bewegen, jedoch ebenfalls konjunkturbedingt um diese schwanken.

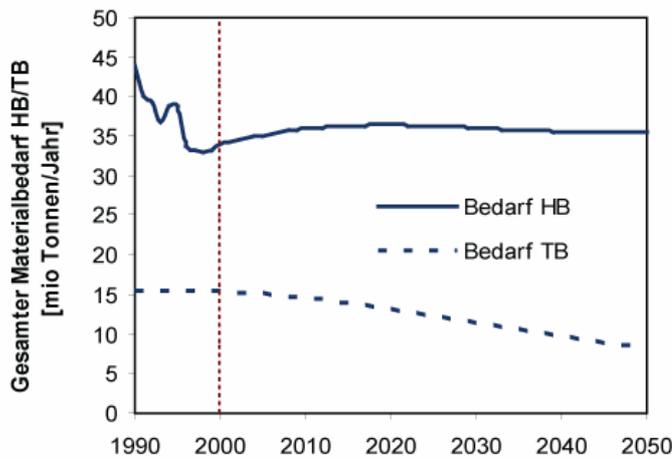


Abbildung 8: Materialbedarf in Hoch- und Tiefbau von 1990 – 2050. Die horizontale rote Linie bezeichnet das Ende der Kalibrationsperiode. Der Bedarf ist die Summe von Beton, Mauerwerk, Kies/Sand und Asphalt.

3.4.2 Materialbedarf vs. Abbruchmaterial

In Bezug auf zukünftige Verwendungsmöglichkeiten von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und zugehöriger Feinfraktion können bereits wichtige Aussagen gemacht werden (Abbildung 9).

- Ab ungefähr 2028 können die anfallenden sekundären Baustoffe nicht mehr nur lose verbaut werden (Abbildung 9, links).
- Ab ungefähr 2023 können die anfallenden sekundären Baustoffe nicht mehr nur im Tiefbau verbaut werden (Abbildung 9, rechts).
- Auch im Jahr 2050 wird nicht der gesamte Materialbedarf mit Abbruchmaterial gedeckt werden können, es sind noch immer etwa 50% Primärkies bzw. -sand (17.5 Mio. Tonnen) nötig.

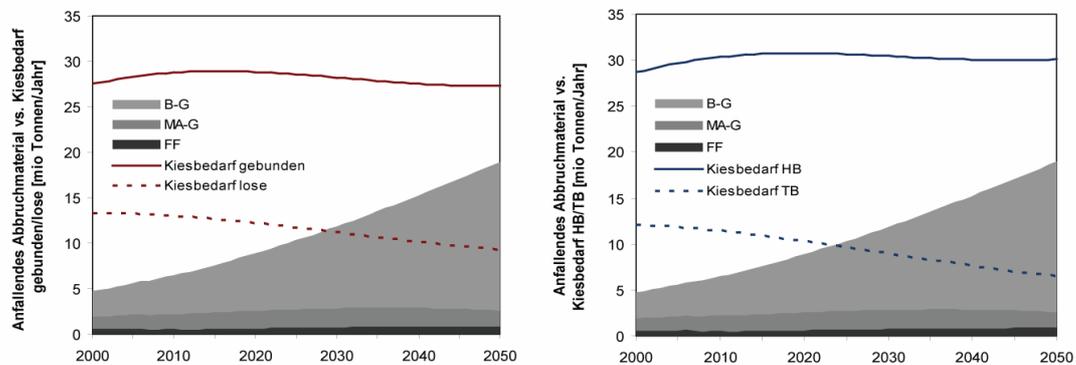


Abbildung 9: Links: Abbruchmaterialfluss von 2000 – 2050 verglichen mit dem Kiesbedarf lose/gebunden. Rechts: Abbruchmaterialfluss verglichen mit dem Kiesbedarf HB/TB.

Vor allem die ersten beiden Punkte sind wegweisende Rahmenbedingungen, die im Folgenden bei der Definition der Verwertungsmöglichkeiten berücksichtigt werden müssen.

3.5 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, wie stark ein Modellresultat auf die Veränderung einzelner Parameter reagiert. Die Mengen der über die nächsten 50 Jahre anfallenden Abbruchfraktionen (wie zum Beispiel Mischabbruch und Betonabbruch) hängen stark von der Abbruchtätigkeit und der Zusammensetzung der abgebrochenen Bauten ab. Dem Hochbau ist dabei mehr Beachtung zu schenken, da er für den Haupt-Materialfluss verantwortlich ist.

Die Abbruchquote und die Zusammensetzung des Abbruchs aus dem Hochbau sind demnach zentrale Parameter für die Modellierung der zukünftigen Flüsse an Abbruchmaterialien.

Daher sollen im Folgenden betrachtet werden, wie sensitiv das Modell auf diese Grössen reagiert.

3.5.1 Zusammensetzung des Abbruch aus dem Hochbau

Wie bereits oben erwähnt, wird für die Potentialabschätzungen davon ausgegangen, dass sich die Zusammensetzung des Outputs gemäss Abbildung 3 verändern wird. Bei der Modellierung hat sich gezeigt, dass das Modell sensitiv auf eine Veränderung dieser Annahme reagiert. Deshalb soll nun betrachtet werden, wie sich die anfallenden Mengen der RC-Produkte entwickeln, falls von einer konstanten Zusammensetzung des Abbruchs aus dem Hochbau über die nächsten 50 Jahre ausgegangen wird (Werte von 1990). Alle anderen Annahmen und Parameter werden festgehalten.

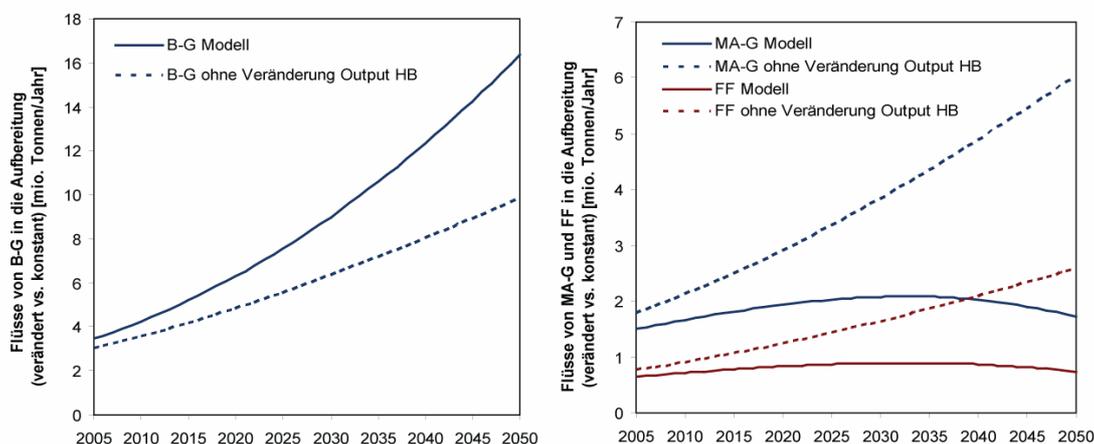


Abbildung 10: Auswirkungen der Veränderung der Abbruchzusammensetzung auf die Flüsse von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Feinfraktion in die Aufbereitung. Durchgezogene Linien: Für die Berechnung verwendete Werte. Gestrichelte Linien: Anfallende Abbruchmengen bei konstanter Zusammensetzung des Abbruchs aus dem Hochbau.

Abbildung 10 zeigt, dass dadurch bis ins Jahr 2050 rund 30% weniger Betongranulat anfallen werden, jedoch fast 50% mehr Mischabbruchgranulat respektive Feinfraktion.

Diese Resultate bestätigen, dass die Entwicklung der Zusammensetzung des Hochbaus entscheidend ist im Bezug auf eine möglichst realistische Vorhersage der Mengen an RC-Produkten, welche in Zukunft verwertet werden müssen.

3.5.2 Entwicklung der Abbruchquote des Hochbaus

Ein weiterer zentraler und schwer abzuschätzender Parameter ist die Abbruchquote des Hochbaus. Für das Modell wird angenommen, dass diese weiterhin stark ansteigen und sich in 50 Jahren mehr als verdreifachen wird. Es soll nun betrachtet werden, wie sich die anfallenden Mengen der RC-Produkte entwickeln, falls die Abbruchquote konstant auf dem Wert von 2005, d.h. 0.36%, bleibt. Alle anderen Annahmen und Parameter werden festgehalten.

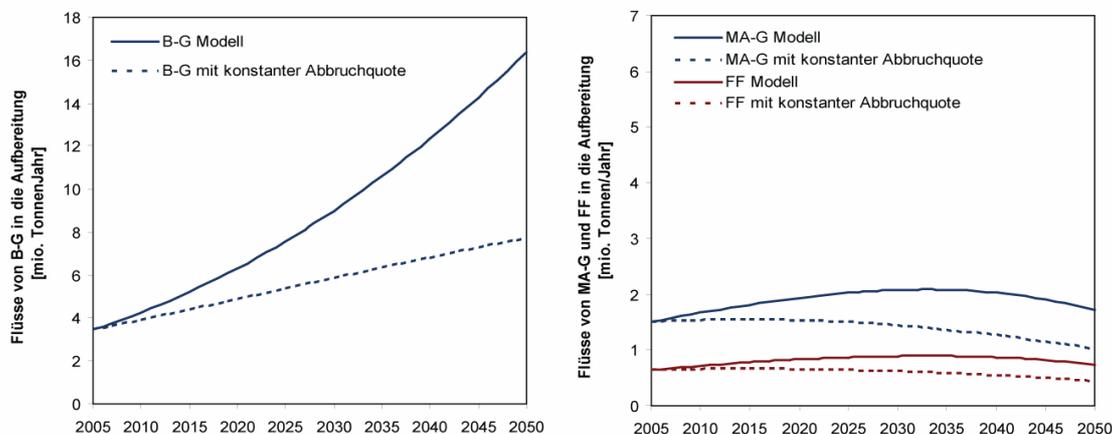


Abbildung 11: Auswirkungen der Veränderung der Abbruchquote auf die Flüsse von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Feinfraktion in die Aufbereitung.

In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass sich die Menge an anfallendem Betongranulat über die nächsten 50 Jahre um rund 37% verringern wird. Durch die verminderten Materialflüsse beim Abbruch sinken aber auch die Flüsse von Mischabbruch: Bis 2050 fallen ca. 26% weniger Mischabbruchgranulat und Feinfraktion an.

Auch diese Betrachtung bestätigt, dass wir es im Bezug auf die Abbruchquote mit einer zentralen und unsicheren Größe zu tun haben, welche entscheidenden Einfluss auf zukünftige Entwicklungen hat.

3.5.3 Kombination

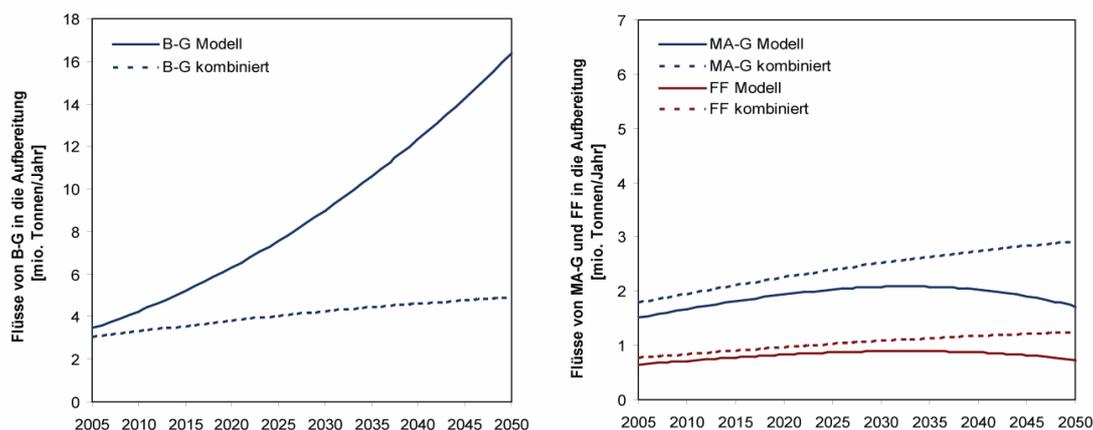


Abbildung 12: Flüsse von Betongranulat, Mischabbruchgranulat und Feinfraktion in die Aufbereitung. Durchgezogene Linien: für die Berechnung modellierte Flüsse. Gestrichelte Linien: modellierte Flüsse bei konstanter Abbruchquote des Hochbaus und konstanter Abbruchzusammensetzung aus dem Hochbau.

Eine Kombination der beiden oben erwähnten veränderten Modellannahmen zeigt, dass das Modell sensitiver auf die Abbruchzusammensetzung des Hochbaus als auf die Entwicklung der Abbruchquote des Hochbaus anspricht. In Abbildung 12 ist ersichtlich, dass dadurch die anfallende Menge an Betongranulat in den nächsten 50 Jahren stark verringert wird. Die jährlichen Mengen an Mischabbruchgranulat und Feinfraktion nehmen hingegen leicht zu.

In den folgenden Berechnungen werden die Abbruchquote im Hochbau wie auch die Abbruchzusammensetzung des Hochbaus auf den ursprünglichen Werten belassen. Diese beruhen auf unseren Abschätzungen (siehe Tabelle 3 – 7 im Anhang) und sind durchaus plausibel. Man muss sich jedoch bewusst sein, dass sie mit Unsicherheiten behaftet sind und das Modellresultat wesentlich beeinflussen.

Optimale Entwicklung:

Die in der Kalibrationsperiode vorausgesagte Entwicklung des Marktanteils wird übernommen: Während im Jahr 2000 etwa 10% des ganzen Betonbedarfes im Hochbau mit RC-Beton B gedeckt wurden, wird dieser Anteil bis ins Jahr 2050 auf 70% ansteigen (Abbildung 4). Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass der durchschnittliche Anteil von Betongranulat von 25% im Jahr 2005 auf 80% im Jahr 2050 steigt (Abbildung 23 im Anhang).

4.3 RC-Beton M

Heute wird RC-Beton M vor allem als Magerbeton verwendet. Es wird zwar schon erfolgreich Beton aus 100% Mischabbruch hergestellt, trotzdem macht die schwankende Mischabbruchzusammensetzung noch immer Probleme. Die hohen Qualitätsanforderungen, die von RC-Beton B erfüllt werden können, wird RC-Beton M auch in Zukunft nicht erreichen. Darum ist es wichtig, dass Betongranulat gezielt in „höherwertigen“ Anwendungen eingesetzt wird, damit die Marktnachfrage nach Betonen mit niedrigeren Qualitätsanforderungen weiterhin durch RC-Beton M gedeckt werden kann. Es wird also in der Berechnung davon ausgegangen, dass RC-Beton M sowohl im Hochbau als auch im Tiefbau verwendet wird, jedoch nur als Magerbeton.

Optimale Entwicklung:

Im *Tiefbau* wird RC-Beton M 70% des Gesamtbedarfes an Beton abdecken. Die Entwicklung des Marktanteils folgt dabei der in der Kalibrationsperiode bestimmten Kurve (Abbildung 4). Der Anteil an Mischabbruchgranulat erhöht sich, wie in Abbildung 23 im Anhang dargestellt, von 25% im Jahr 2005 auf 100% im Jahr 2050, wobei die Feinfraktion nicht abgesiebt wird.

Im *Hochbau* steigt der Anteil von RC-Beton M am Gesamtbedarf ab dem Jahr 2000 von praktisch Null auf 10% (in 30 Jahren, siehe Abbildung 14). Die Betonzusammensetzung entwickelt sich dabei dem RC-Beton M im Tiefbau entsprechend (Abbildung 23 im Anhang).

4.4 Selbstverdichtender Beton (SCC)

Im Vergleich zu herkömmlichem Beton erlaubt selbstverdichtender Beton (SCC steht für „self compacting concrete“) eine weniger arbeitsintensive und schnellere Bauproduktion. Das zeitraubende Vibrieren des Betons entfällt und spart den Einsatz von teuren Arbeitskräften. Dänemark erreicht bereits heute einen Anteil von 20% SCC am Gesamtbetonverbrauch [16]. Das ambitionöse Ziel in Dänemark ist es, in Zukunft bis zu 50% aller Konstruktionen mit SCC ausführen zu können. In der Schweiz sind die Anteile an SCC-Konstruktionen im Hoch- wie auch im Tiefbau noch unbedeutend, dies aufgrund teurer Zusatzstoffe; welche den Preis im Vergleich zu herkömmlichem Beton hoch halten. Gemäss Abschätzungen beträgt das Marktpotential in der Schweiz im Hochbau maximal 15% [9]. Im Instandsetzungsbau im Tiefbau wird ein Marktpotential von 30 – 60% geschätzt [9].

Optimale Entwicklung:

In Hoch- und Tiefbau wachsen die Marktanteile von SCC Beton auf 25% (Abbildung 14). Im Hochbau dauert die Entwicklung 25 Jahre (ab 2005), im Tiefbau 15 Jahre (ab 2005). Der Primärkies wird zu knapp 40% durch Betongranulat ersetzt, anstelle von Fillern wird die abgesiebte und gemahlene Feinfraktion des Mischabbruchs zugegeben (Tabelle 14 im Anhang) [11]. Ob die gemahlene Feinfraktion wirklich alle für einen Filler erforderlichen puzzolischen Eigenschaften aufweist, muss in zukünftigen Versuchen noch abgeklärt werden.

4.5 Mörtel

Anstelle des Fillers könnte eventuell auch beim Mörtel gemahlene Feinfraktion verwendet werden. Um das Potential abzuschätzen wird in der Folge angenommen, dass der gesamte Fillerbedarf für Mörtel im Hoch- und Tiefbau durch gemahlene Feinfraktion ersetzt wird. Die Entwicklung wird als eher unwahrscheinlich eingeschätzt, soll im Folgenden aber trotzdem berücksichtigt werden. Die Zusammensetzung des Mörtels ist in Tabelle 14 im Anhang gegeben.

4.6 Blähgranulate

Blähtone wie LIAPOR® finden vielseitige Verwendung. Wie eine Arbeit aus Deutschland zeigt, ist die Produktion von Blähgranulaten aus gemahlenem Mischabbruch möglich und das Produkt ist LIAPOR® technisch und ökonomisch ebenbürtig [14]. Bei vorhandener Marktnachfrage könnten Blähgranulate zu einer guten Absatzmöglichkeit für Mischabbruch werden. Zur Produktion wird 100% gemahlener Mischabbruch mit entsprechender Feinfraktion verwendet.

Es sollen zwei unterschiedliche Produkte betrachtet werden, welche aus Blähgranulaten hergestellt werden: Speicherziegel und Leichtbeton.

4.6.1 Speicherziegel

Speicherziegel sind durch ihre guten Wärmedämmeigenschaften geeignet für Häuser, die MINERGIE-Standard erfüllen sollen. Heute werden sie unter anderem aus Blähton und Zement hergestellt. Eine Produktion aus den oben beschriebenen Blähgranulaten ist denkbar.

Mittlerweile werden bereits aus Ton Backsteine produziert, die MINERGIE-Standard erfüllen können. Die Speicherziegel werden auf dem Markt kaum konkurrenzfähig sein, da die Produktion wesentlich kostenintensiver ist als diejenige der Backsteine.

Optimale Entwicklung:

In knapp 20 Jahren (ab 2005) werden 10% des Mauerwerkbedarfs im Hochbau mit Speicherziegeln aus Mischabbruch-Blähgranulaten gedeckt (Abbildung 14, Tabelle 14 im Anhang).

4.6.2 Leichtbeton

Leichtbeton eignet sich aufgrund seiner geringen Rohdichte unter anderem für den Bau von Hochhäusern oder im Brückenbau. Ein möglicher Zuschlag, der die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte entscheidend verringern kann, ist Blähgranulat. Heute liegt der Anteil an Leichtbetonkonstruktionen am Gesamt-Betonverbrauch gemäss Aussagen von Fachleuten im Hochbau jedoch im Promillebereich.

Optimale Entwicklung:

Leichtbetonkonstruktionen werden in etwa 15 Jahren (ab 2005) 3% des Gesamt-Betonbedarfs im Hochbau decken. Die Zuschläge werden dabei zu 100% aus Mischabbruch-Blähgranulaten bestehen (Abbildung 14, Tabelle 14 im Anhang).

4.7 Kalksandsteine

Kalksandsteine werden heute aus Kalk, Sand und Wasser (ohne chemische Zusätze) hergestellt. Sie werden für Innen- und Aussenwandkonstruktionen und Sichtmauerwerk verwendet.

Die Hard AG in Volketswil hat bereits versucht, die Kalksandsteine vollständig mit Mischabbruchmaterial herzustellen. Obwohl es technisch ein Erfolg war, blieb der kommerzielle Durchbruch aus, da beim Kunden die stark gefleckte Steinoberfläche nicht erwünscht war und die Herstellungskosten nur unwesentlich tiefer waren. Auch im Keller wird heute oft Sichtmauerwerkqualität verlangt, weil praktisch keine Mauern mehr verputzt oder gestrichen werden.

Optimale Entwicklung:

Im Jahr 2005 wurden in der Schweiz etwa 0.3 Mio. Tonnen Kalksandsteine aus Primärprodukten produziert. Dies entspricht massenmässig 25% des Gesamtbedarfs an Mauerwerk im Hochbau. Auch in Deutschland lag im Jahr 1997 der Anteil bei 27 Massen-%. Das optimale Szenario geht nun davon aus, dass wir zum einen die heutige Kalksandsteinproduktion in 10 Jahren komplett mit Mischabbruch (inkl. Feinfraktion) bewerkstelligen können, zum anderen, dass der heutige Bedarf an Kalksandsteinen (im Vergleich zum gesamten Mauerwerk-Bedarf im Hochbau) bereits ein Maximum erreicht hat. Die Produktion beginnt im Jahr 2005 und es werden ausschliesslich Vollsteine (keine Lochsteine) produziert. Die Entwicklung des Marktanteils ist in Abbildung 14, die Zusammensetzung der Kalksandsteine in Tabelle 14 im Anhang gegeben.

Viele Prozesse unterstehen einer Entwicklung, durch die sie in einer gewissen Zeitspanne ihr maximales Potential erreichen. 14 zeigt die angenommenen zeitlichen Entwicklungen der Marktanteile bis zum Jahr 2050. Die schwarze durchgezogene Linie „SCC vs. Beton TB“ zeigt zum Beispiel, wie sich der Marktanteil von SCC am gesamten Betonbedarf im Tiefbau verändert: Zwischen 2010 und 2025 steigt er von knapp 3 auf 25%.

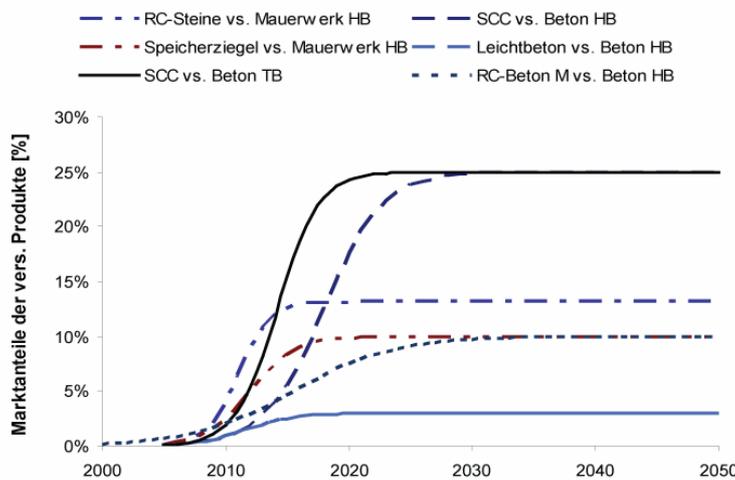


Abbildung 14: Zeitliche Entwicklung der Marktanteile einzelner Verwertungsmöglichkeiten. Die detaillierte Zusammenfassung aller logistischer Wachstumsparameter ist in Tabelle 15 aufgeführt.

5 Potentialabschätzungen

Im Folgenden sollen die Potentiale der Verwertungsmöglichkeiten von Mischabbruchfraktionen abgeschätzt und diskutiert werden. Die ausgewählten Prozesse werden gemäss dem eingeführten, erweiterten System (Abbildung 13) in das erweiterte Modell implementiert. Dadurch können nun die quantitativen Beiträge der unterschiedlichen Verwertungswege berechnet und untereinander verglichen werden.

5.1 RC-Produkte vs. Kiesbedarf

Als Einstieg wollen wir jedoch zuerst das Ganze aus einem anderen Blickwinkel betrachten und auf die Frage eingehen, wie sich eigentlich die anfallenden Mengen im Bezug auf den gesamten in gebundener Form eingesetzten Kiesbedarf verhalten.

Gemäss SIA-Norm 262 (Betonbau) ist RC-Beton erst als solcher zu deklarieren, wenn der Anteil an sekundären Komponenten 25% überschreitet. Dieser Grenzwert ist in Abbildung 15 (rechts) mit einer roten Linie gekennzeichnet. Als Erstes soll nun betrachtet werden, wie lange die anfallenden sekundären mineralischen Baustoffe (Betongranulat, Mischabbruchgranulat und zugehörige Feinfraktion) im Sinne eines möglichen „Entsorgungsweges“ in den Beton gebracht werden können, bis deren Anteil die 25%-Grenze überschreitet.

In Abbildung 15 sind sowohl die prozentualen Anteile als auch die effektiven Flüsse dargestellt. Beim Betrachten der prozentualen Anteile ist zu erkennen, dass es etwa bis ins Jahr 2013 – im Falle einer idealen schweizweiten Verteilung der RC-Produkte – möglich sein wird, alles anfallende Material in den primären Beton zu mischen.

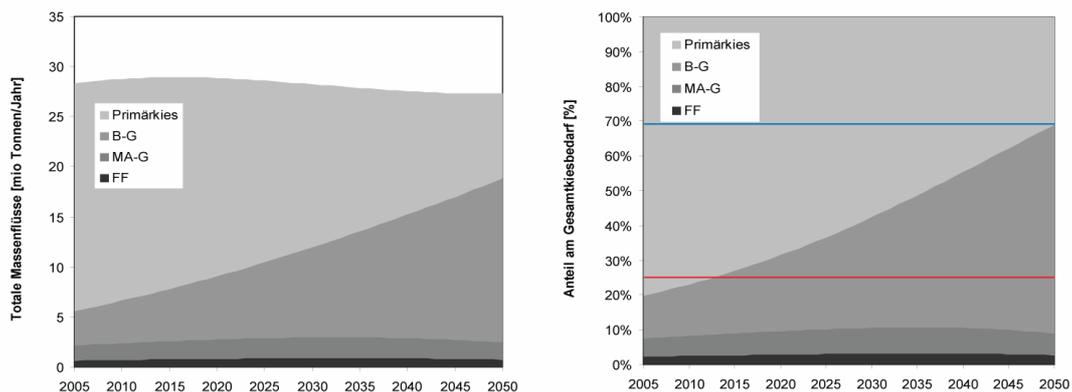


Abbildung 15: Beide Abbildungen zeigen den Gesamtkiesbedarf in gebundener Form (in HB und TB) unter der Voraussetzung, dass alle Sekundärrohstoffe in der Betonproduktion eingesetzt werden. Links: Vergleich der totalen Massenflüsse von B-G, MA-G und FF mit dem daraus resultierenden Primärkiesbedarf. Rechts: Vergleich der Anteile an B-G, MA-G und FF mit dem Gesamtkiesbedarf in gebundener Form.

5.2 Betongranulat

Da laut Modellvorhersage das in Zukunft anfallende Betonabbruchgranulat zumindest mengenmässig die grösste Herausforderung darstellen wird, soll zuerst etwas näher auf das in Bezug auf die Verwertung „unproblematischste“ der drei betrachteten RC-Produkte eingegangen werden.

Gemäss der Annahme, dass sich die Zusammensetzung des Outputs aus dem Hochbau (Abbildung 3) verändert und der Abbruch zusätzlich zunimmt, wird sich die anfallende Menge an Betongranulat aus dem Abbruch von Hoch- und Tiefbau bis ins Jahr 2050 etwa vervierfachen.

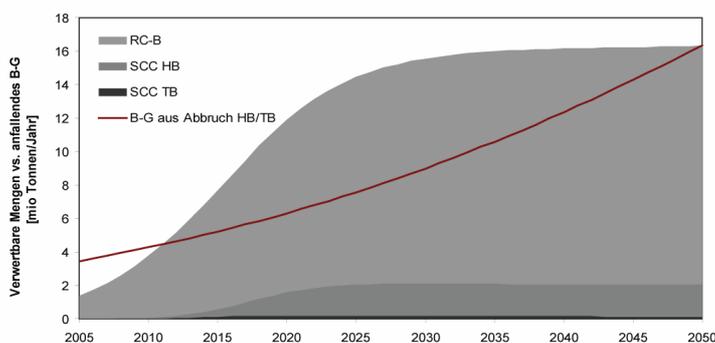


Abbildung 16: Potential der drei definierten Verwertungsmöglichkeiten für Betongranulat, verglichen mit dem Fluss von B-G, der in die Aufbereitung geht.

In Abbildung 16 ist das anfallende Betongranulat dem Potential der drei Verwertungswege, d.h. den im Optimalfall mit den getroffenen Annahmen verwertbaren Mengen, gegenübergestellt. Die Linie entspricht dem anfallenden Betongranulat (aus HB und TB), die Flächen stellen die maximalen Mengen an Betongranulat dar, die mit den definierten Verwertungsmöglichkeiten RC-B, SCC HB und SCC TB verbaut werden können. Der zeitliche Verlauf beruht auf den oben bestimmten optimalen Entwicklungen.

Dazu sind folgende Punkte zu bemerken:

- Erst etwa ab dem Jahr 2011 wird das anfallende Betongranulat von den definierten Verwertungsmöglichkeiten in Hoch- und Tiefbau vollständig verbraucht. In Abbildung 16 erkennt man dies am Schnittpunkt zwischen der Linie des abgebrochenen Betongranulats und der Fläche des RC-Betons.
- Die Verwertung von Betongranulat sollte jedoch in den nächsten 50 Jahren generell keine Probleme hervorrufen.
- Der Prozess SCC TB hat ein vernachlässigbar geringes Potential.
- Der Prozess SCC HB hat ein gewisses Potential, dieses ist jedoch im Vergleich zum Potential, welches in der Verwertung des Betongranulats in Form von RC-Konstruktionsbeton steckt, relativ unbedeutend. Zudem ist es unseren „optimalen“ Annahmen zufolge bereits ausgeschöpft.

Nicht berücksichtigt ist in der Abbildung 16 das Betongranulat, welches zusammen mit Kies lose verbaut werden kann. Es ist also in Wirklichkeit nicht einmal im Jahr 2005 ein Problem, das Betongranulat vollständig zu verwerten.

Für die Mengen an Betongranulat, welche in der Folge als Ersatz für Primärkies in gebundener Form im Hochbau eingesetzt werden müssen, um alles anfallende Material wieder in den Kreislauf zurückzuführen, ergibt sich das in der folgenden Abbildung 17 dargestellte Bild. Im Moment liegt dieser Anteil noch bei 15%, wird aber in den nächsten 50 Jahren auf rund 70% ansteigen (vgl. rot gestrichelte Linie).

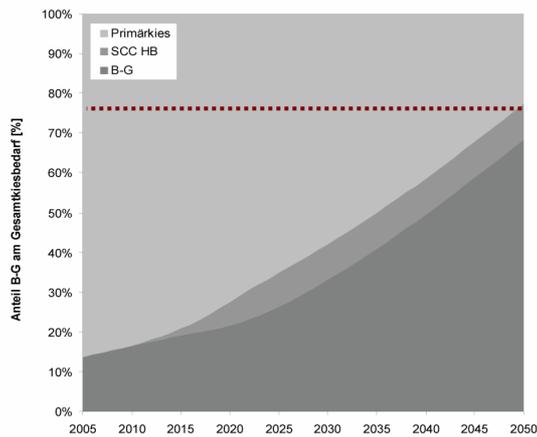


Abbildung 17: Anteil des B-G am Gesamtkiesbedarf (gebunden) im Hochbau, falls B-G nur in den zwei Prozessen SCC HB und RC-Beton B verwertet wird.

5.3 Mischabbruchgranulat

Für die Verwertung der Fraktion Mischabbruch grösser 8 mm sind fünf mögliche Verwertungswege definiert worden: Speicherziegel, Leichtbeton, Kalksandsteine, RC-M TB, RC-M HB. Analog zur Abbildung 16 ist in der untenstehenden Abbildung 18 die anfallende Menge Mischabbruchgranulat den Potentialen gegenüber gestellt. Die Verwertung von Mischabbruchgranulat in Speicherziegeln und im Leichtbeton weist nur ein sehr geringes Potential auf. Auch über die Substitution der Kalksandsteine kann nur marginal mehr Mischabbruch abgesetzt werden. Darum soll auf diese drei Möglichkeiten nicht weiter eingegangen werden. Die beiden Verwertungsmöglichkeiten mit dem grössten Potential sind deutlich im RC-Beton M zu finden, mit Schwergewicht im Hochbau. Für die Modellierung werden die Zuschlagstoffe im Verlauf der betrachteten Zeitspanne bis zu 100% durch Mischabbruchgranulat ersetzt (vgl. Abbildung 23). Es ist jedoch anzumerken, dass mit einem Einsatz des Mischabbruchgranulates im Hochbau allein die anfallenden Mengen nicht bewältigt werden können (Abbildung 19). Eine Kombination von Hoch- und Tiefbau ist daher notwendig.

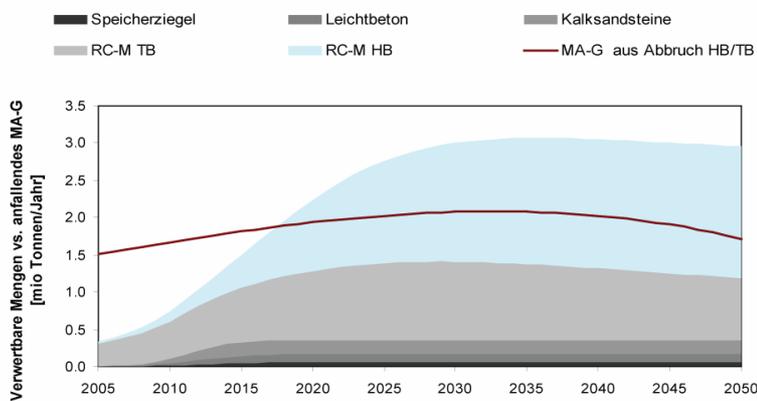


Abbildung 18: Potentiale der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten von MA-G, verglichen mit dem Fluss von MA-G in die Aufbereitung.

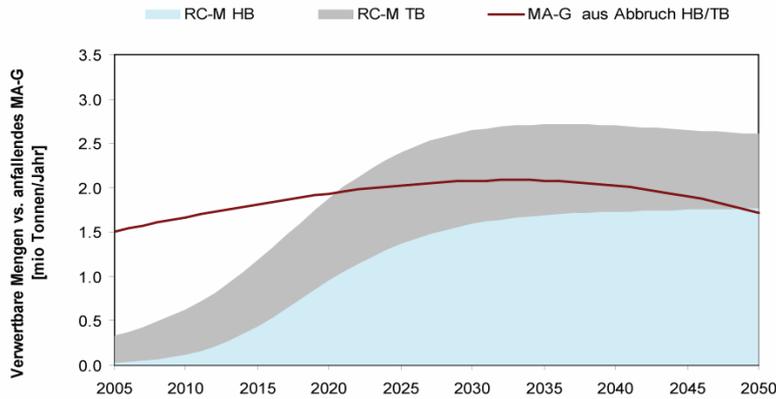


Abbildung 19: Potentiale der Produkte RC-Beton M im HB und TB, verglichen mit dem Fluss von MA-G in die Aufbereitung.

5.4 Feinfraktion

Gemäss unseren Abschätzungen macht die Feinfraktion (FF) kleiner 8mm rund 30 Massen-% des Mischabbruchs aus. Um eine optimale Verwertung des Mischabbruchgranulates abschätzen zu können, sollte nun vor allem auch das Potential der Verwertungsoptionen der Feinfraktion betrachtet werden. Dies ist gerade darum wichtig, weil es uns auch Erkenntnisse darüber liefern soll, ob die Zukunft der Verwertung der Feinfraktion in separaten Anwendungen, welche spezifisch auf diese zugeschnitten sind, oder aber in Anwendungen zusammen mit der Fraktion grösser 8 mm liegen wird.

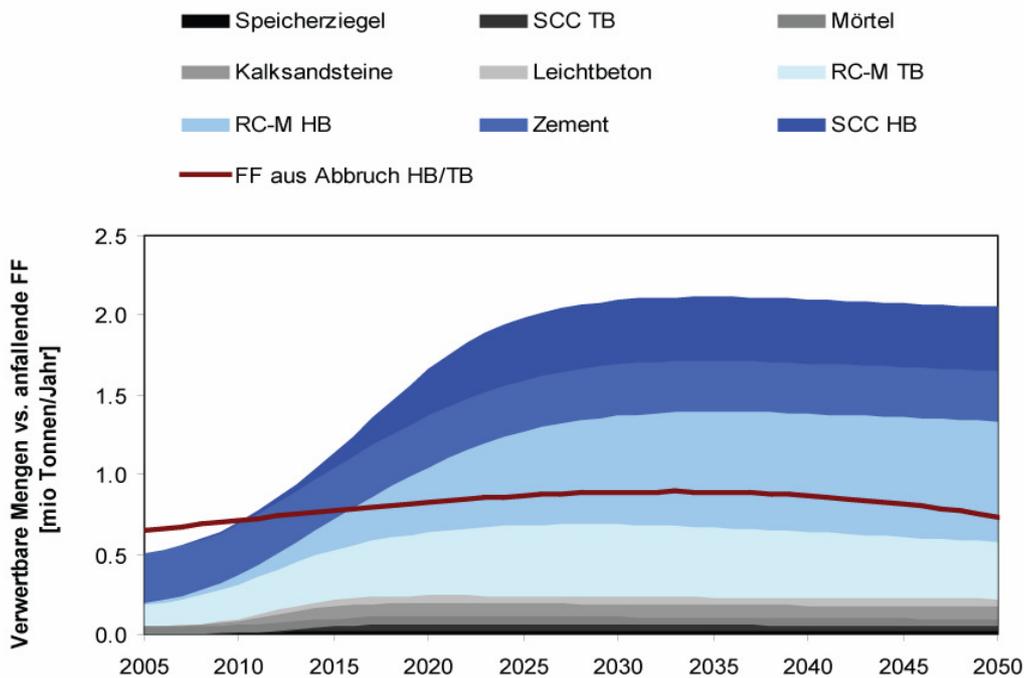


Abbildung 20: Potentiale der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten von FF, verglichen mit dem Fluss von FF, der in die Aufbereitung geht.

Abbildung 20 zeigt auf, dass auch im Bereich der Feinfraktion für die Verwertung in den Prozessen Mörtel, Blähgranulate (Speicherziegel und Leichtbeton), SCC TB und Kalksandsteine keine grossen Potentiale zu erwarten sind. Im Jahr 2030 können beispielsweise über den Prozess „Leichtbeton“ lediglich 0.05 Mio. Tonnen Feinfraktion pro Jahr abgesetzt werden. Dieser Menge stehen rund 0.9 Mio. Tonnen Feinfraktion aus dem Abbruch pro Jahr gegenüber.

Auf die aussichtsreichsten vier Prozesse (Rohmaterial für Zementherstellung, SCC HB, RC-M HB und RC-M TB) soll im Folgenden kurz einzeln eingegangen werden:

- *Rohmaterial für Zementherstellung:* In der Abbildung 20 ist das Potential für die Verwertung als Ersatz von Rohmehl bei der Zementherstellung ebenfalls aufgeführt, welche mehr im Sinne einer alternativen Entsorgung zu verstehen ist. Dabei handelt es sich um einen Anteil von 5% Mischabbruch-Feinfraktion am gesamten Rohmehl. Diese 5% werden deshalb als obere Grenze betrachtet, weil die Zusammensetzung der Feinfraktion grossen Schwankungen unterworfen ist und eine Beeinträchtigung der Zementqualität möglichst verhindert werden sollte. Bei diesem Verwertungsweg handelt es sich im Gegensatz zu den übrigen um eine Variante, welche mit einem gewissen Mehraufwand für den Rückbau- und Recycling-Unternehmer verbunden ist. Da die Feinfraktion nur gegen Bezahlung an die Zementwerke abgegeben werden kann, wird diese Art des Recyclings für die weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt.
- *SCC HB:* Für den SCC, welcher im Hochbau eingesetzt wird, ist laut der gemachten Materialflussanalyse durchaus ein gewisses Potential vorhanden. Im Falle einer problemlosen technischen Machbarkeit, könnte sogar rund die Hälfte der anfallenden Feinfraktion in dieser Verwertung zur Anwendung kommen. Da diese Machbarkeit jedoch nicht gewährleistet ist, wird auf eine eingehende Betrachtung in der Folge verzichtet.

Somit bleiben nur noch die beiden Verwertungsmöglichkeiten RC-Beton M HB und TB übrig. Eine isolierte Betrachtung dieser beiden Prozesse wird in Abbildung 21 gegeben.

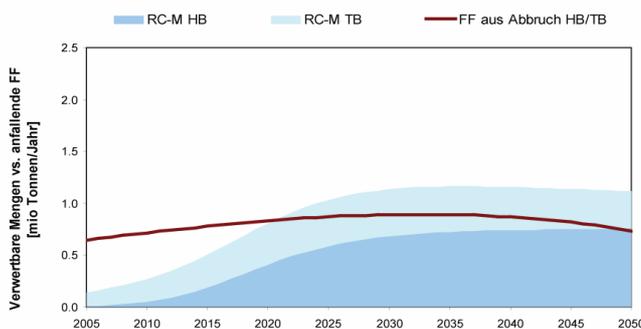


Abbildung 21: Potentiale der Produkte RC-Beton M im HB und TB, verglichen mit dem Fluss von FF, der in die Aufbereitung geht.

- *RC-Beton M in Hoch- und Tiefbau:* Obwohl davon auszugehen ist, dass im Tiefbau der Anteil an verbauten Magerbeton viel höher liegt als im Hochbau, beträgt das Potential für den Tiefbau nur rund ein Drittel des Potentials im Hochbau. Dies begründet sich damit, dass die Gesamtmenge an Beton, welche im Tiefbau verwendet wird, nur ein Bruchteil des Hochbaus beträgt. Generell ist jedoch gut zu erkennen, dass eine alleinige Verwertung der Feinfraktion im RC-Beton M im Hochbau nicht ausreicht, um die gesamten anfallenden Mengen abzudecken.

5.5 Ökonomische Betrachtung

Zusätzlich zu diesen massenmässigen Potentialabschätzungen sollte auch noch eine Analyse der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten unter ökonomischen Aspekten durchgeführt werden.

Aus Zeitgründen wird darauf in dieser Arbeit nicht detailliert eingegangen. Allgemein lassen sich jedoch folgende Punkte zusammenfassen:

- Verwertungsmöglichkeiten, welche Produkte betreffen, die in Hoch- oder Tiefbau eher selten und meist sehr gezielt zur Anwendung kommen wie z.B. Speicherziegel oder Leichtbeton, weisen einerseits tendenziell ein massenmässig eher beschränktes Potential auf, andererseits ist ihre Produktion auch mit höheren Kosten verbunden.
- Kalksandsteine aus gemahlenem Mischabbruch haben aus ökonomischer Sicht durchaus Potential, da sich ihre Produktion im Bezug auf Aufwand und Kosten kaum von herkömmlichen Kalksandsteinen unterscheidet. Wie bereits oben erwähnt spielt diese Verwendungsart jedoch massenmässig nur eine untergeordnete Rolle.
- Die Verwertung der Feinfraktion in Zementwerken ist eine finanziell eher ungünstige Lösung, aber sowohl aus ökonomischer wie auch ökologischer Sicht sicher sinnvoller als eine Deponierung.
- Die Produktion von RC-Beton mit Mischabbruch ist für die Rückbau- und Recycling-Unternehmen sogar rentabler als mit Betongranulat [10]. Daher haben die in diesem Kapitel gezeigten Ansätze für die Verwertung von Mischabbruchgranulat und zugehörige Feinfraktion auch ökonomisch durchaus Potential.

6 Diskussion

Unsere Berechnungen zeigen, dass keine der vorgeschlagenen alternativen Verwertungsmöglichkeiten für das Mischabbruchgranulat und die Feinfraktion ein hohes Potential hat.

Es ist weiterhin nötig, den Grossteil des Abbruchs im RC-Beton in Hoch- und Tiefbau einzusetzen, wobei die Kapazität eines alleinigen Einsatzes im Tiefbau spätestens ab 2023 überschritten sein wird. Werden die RC-Fractionen nur in loser Form als Primärkiesersatz verwendet, wird spätestens ab 2028 die Menge an anfallendem Sekundärmaterial den Bedarf übersteigen. Es ist wichtig, dass der RC-Beton aus Betongranulat in möglichst hochwertige Anwendungen gelangt, um den aus Mischabbruch hergestellten Magerbeton nicht zu konkurrenzieren.

Das Konzept einer nachhaltigen Sekundärressourcenbewirtschaftung kann unter folgenden *Voraussetzungen* erfüllt werden:

- *Betongranulat*: Bis ins Jahr 2050 müssen 70% des für den Hochbau produzierten Betons RC-Beton B sein, der zu 25% (2005) bis 80% (2050) aus Betongranulat produziert wird. Bis 2050 sind keine grossen Lagerbildungen (in Deponien) von Betongranulat zu erwarten, da B-G auch lose weiterverwendet werden kann.
- *Mischabbruchgranulat*: Bis ins Jahr 2050 müssen im Tiefbau 70% des Betonbedarfs mit RC-Beton M in Form von Magerbeton gedeckt werden. Im Hochbau sollen bis 2050 10% der Betonproduktion RC-Beton M sein. Die Zusammensetzung sollte sich dabei so entwickeln, dass bis ins Jahr 2050 der Zuschlagstoff zu 100% durch Mischabbruch, d.h. Mischabbruchgranulat mit zugehöriger Feinfraktion, ersetzt wird.
- *Feinfraktion*: Unter den oben beschriebenen Bedingungen für Mischabbruchgranulat wird auch die FF vollständig abgesetzt werden können.

Die Verwertung aller RC-Produkte unter den oben beschriebenen Voraussetzungen ist allerdings nur gewährleistet, wenn ein funktionierender Markt für Sekundärprodukte vorhanden ist. In seiner Rolle als Bauherr müssen die Kantone den Einsatz von Recyclingbeton verstärkt fördern und andere öffentliche und private Bauherrschaften für dessen Verwendung gewinnen.

Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die breite Akzeptanz von Recyclingbaustoffen seitens der Bauherren, Bauingenieure und Architekten. Schon in der Ausbildung sollte vermehrt auf die Notwendigkeit des Einsatzes von Recyclingbaustoffen, dessen Möglichkeiten und Grenzen eingegangen werden. Zusätzlich würde ein verstärkter Austausch zwischen den Parteien dazu beitragen, die bestehenden Vorurteile gegenüber dem „Abfallprodukt“ RC-Beton abzubauen.

Die Preise für Baustoffe aus Primärrohstoffen und von solchen aus Sekundärrohstoffen sind heute praktisch gleich hoch. Bei gleichen Preisen werden die Primärrohstoffe bevorzugt. Dieser scheinbare Wettbewerbsnachteil muss mittels Marketingmassnahmen aufgeholt werden.

Eine unserer zentralen Annahmen im Modell ist der kontinuierliche Rückgang des Mischabbruchanteils am Gesamtabbruchmaterial aus dem Hochbau. Es wird jedoch häufig auch die Meinung vertreten, der Mischabbruchanteil steige in Zukunft sogar noch an. Wäre dies der Fall, könnte auch unter den erwähnten Voraussetzungen nicht alles anfallende Material verwertet werden.

Bleibe hingegen die Abbruchquote des Hochbaus konstant auf dem Wert von 2005, würde sich das Problem mit dem Mischabbruch in Zukunft eher entschärfen. Das Modell reagiert dabei sensitiver auf die Zusammensetzung des Abbruchs aus dem Hochbau, d.h. eine Veränderung der Abbruchzusammensetzung des Hochbaus zugunsten des Mischabbruchs erhöht den Mischabbruchfluss stärker, als ihn eine Erniedrigung der Abbruchquote des Hochbaus verringert.

In dieser Arbeit konnte die Notwendigkeit des Baustoffrecyclings aufgezeigt werden. Alternative Verwertungsmöglichkeiten für Mischabbruchgranulat (Speicherziegel, Leichtbeton, Kalksandsteine) und dessen Feinfraktion (Speicherziegel, Leichtbeton, Kalksandsteine, SCC und Mörtel) weisen aber ein beschränktes Potential auf. Der Mischabbruch wird hauptsächlich in der Betonproduktion eingesetzt werden müssen, wobei die stetig schwankende Zusammensetzung und der Feinfraktionsanteil es schwer machen, die oben beschriebenen Voraussetzungen zu erfüllen. Weitere Untersuchungen über das Verhalten von RC-Beton M mit einem hohen Anteil an Mischabbruch werden nötig sein.

7 Ausblick

Die Potentialabschätzungen haben gezeigt, dass die vielversprechendsten Verwendungsmöglichkeiten für Sekundärrohstoffe alle im Beton liegen. Wird also in Zukunft vermehrt mit RC-Beton gebaut, stellen sich folgende Fragen: Nach wie vielen Gebäudegenerationen ist die Produktion von hochwertigem Beton aus Abbruchmaterial nicht mehr möglich? Ist es möglich, den Baustoffkreislauf in Zukunft mehr oder weniger zu schliessen, oder sind bald neue Verwertungsarten nötig?

Neben der technischen Machbarkeit ist ein wichtiger Aspekt der Produktion von RC-Beton mit Mischabbruch der Mehraufwand an Zement. Dieser ist der Hauptkostenverursacher der Betonproduktion. Verteuert sich in Zukunft der Betonbau, weil immer mehr Mischabbruch verwendet wird?

Diese Analyse wurde auf Ebene der Schweiz gemacht. Die beschriebenen Probleme mit den grossen Abbruchmengen werden sich in den einzelnen Kantonen ganz unterschiedlich zeigen. Zürich wird mit überdurchschnittlich hohen Abbruchmengen konfrontiert werden, während zum Beispiel im Kanton Thurgau neben den geringeren Abbruchmengen auch noch die Deponievorschriften viel lockerer ausgelegt sind. Wie sehen die Baustoffflüsse für die einzelnen Kantone aus? Wie stark beeinflussen die unterschiedlichen kantonalen Richtlinien die Stoffflüsse zwischen den Kantonen?

Es bleiben also viele Fragen offen, welche in weiterführenden Betrachtungen und Analysen beantwortet werden müssen.

Literaturverzeichnis

- [1] ARV (1998): *ARV-Gütesicherung für Recyclingbaustoffe*.
- [2] BACCINI P., BADER H.-P. (1996): *Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg.
- [3] BUWAL (2001): *Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege*. Band I: Kennwerte; Umweltmaterialien Nr. 131, Abfall. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [4] BUWAL (1997): *Abfall – Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [5] BUWAL (2005): *Abfallmengen und Recycling 2004 im Überblick*. Abteilung Abfall, Bern.
- [6] DÜRRENMATT P. (2003): *Betonrecycling – Bewirtschaftung von Recyclingbeton in der Schweiz anhand von Szenarien*. Diplomarbeit; Abteilung für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich.
- [7] EMPA (2004): *Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch*. Bericht-Nr. 203600. Abteilung Beton/Bauchemie, EMPA Dübendorf.
- [8] HOFFMANN C. (2005): *Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat heute – Wissenswertes für die Anwenderseite*. Workshop, EMPA Dübendorf.
- [9] JACOBS, F., HUNKELER, F., SCHLUMPF, J. (1999): *Self Compacting Concrete SI+A*. 26. März 1999, s. 4 – 8.
- [10] KIND E., MÜLLER E., SUTER B. UND VOGT L. (2006): *Kieshaushalt Schweiz – Eine ökonomische Betrachtung*. Vertiefungsblock Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik; D-BAUG, ETH Zürich.
- [11] LEEMANN A., HOFFMANN C., DLBRECHT H. (2002): *Selbstverdichtender Beton – Zusammensetzung und Eigenschaften*. 8. Holcim Betontagung, EMPA Dübendorf.
- [12] MARMET D., SCHWEIZER M. ET AL. (2000): *Immo-Monitoring 2000*. Band 3 – Baumarkt. Verlag W&P, Wüest&Partner, Zürich.
- [13] MÜLLER A. (2004): *Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen – aktueller Stand und Entwicklungen*. Ratgeber Abbruch & Recycling. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, Iffezheim.
- [14] MÜLLER A. (2004): *Blähgranulate aus Mauerwerkbruch*. Ratgeber Abbruch & Recycling. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, Iffezheim.
- [15] RUBLI S., JUNGBLUTH N. (2005): *Materialflussrechnung für die Schweiz*. Hrsg.: Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel.
- [16] SCC-CONSORTIUM (2004): *Newsletter No. 1*, Denmark.
- [17] SCHNEIDER M. (2005): *Mischabbruch-Recycling – Chancen, Potentiale, Strategien*. Vertiefungsblock Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik; D-BAUG, ETH Zürich.
- [18] SCHWEIZER NORM (1998): *Recycling; Mischabbruch*. SN-Nr. 670 144. Hrsg.: Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS).
- [19] SIA (1993): *Entsorgung von Bauabfällen*. Empfehlung Nr. 430. Hrsg.: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA).
- [20] INTERNETADRESSEN:
- Aushub-, Rückbau- und Recycling-Verband Schweiz
www.arv.ch
 - Verband der Schweizerischen Zementindustrie
www.cemsuisse.ch
 - Eberhard Holding AG: Tiefbau, Rückbau, Baurecycling, Altlastsanierung
www.eberhard.ch
 - Fachverband der Schweizerischen der Kies- und Betonindustrie
www.fskb.ch

- ehemaliger Kalksandsteinproduzent
www.hard.ch
- Baustofflieferant und Tiefbauunternehmen
www.hastag.ch
- Zementproduzent
www.holcim.ch
- Verband Schweizer Kalksandstein Produzenten
www.kalksandstein.ch
- Blähtonhersteller
www.liapor.ch
- Betonlieferungen, Abbrucharbeiten, Altlastsanierung und Baurecycling
www.richi-weiningen.ch
- Bundesamt für Umwelt
www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de
- Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, Bauhaus-Universität Weimar
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/index.html

A Anhang

A.1 Kalibrationsperiode von 1990 – 2000: Annahmen und Datengrundlage

Tabelle 2: Lagerbestand in Hochbau und Tiefbau im Jahr 2000 in Mio. Tonnen [6].

	HB	TB
Beton	730	170
Mauerwerk	380	20
Kies/Sand	260	500
Asphalt	20	120
Summe	1390	810

Berechnung der Zusammensetzung des Outputs aus dem Hochbau in 50 Jahren.

Tabelle 3: Input in den Hochbau im Jahr 1997 [17].

	Input HB [Mio. t]
Beton	27.5
Mauerwerk	1.1
Kies/Sand	4.2
Mauerwerk	0.5

Tabelle 4: Annahme bezüglich Zusammensetzung der RC-Produkte vom Prozess Aufbereitung [in %].

	Kies/Sand	Asphalt	Betonabbruch	Mauerwerk
Betongranulat	-	-	100	-
MA-Granulat	-	-	60	40
RC-Kies	90	2.2	7.8	-
Asphaltgranulat	15	85	-	-

Tabelle 5: Aus Input in den Hochbau (Tabelle 3) und Tabelle 4 resultierende Abbruchzusammensetzung im Jahr 2050 (in Mio. Tonnen).

	Kies/Sand	Asphalt	Betonabbruch	Mauerwerk	Summe	%
Betongranulat	-	-	25.49	-	25.5	76.6
MA-Granulat	-	-	60	40	2.8	8.3
RC-Kies	4.13	0.10	0.36	-	4.6	13.8
Asphaltgranulat	0.07	0.40	-	-	0.5	1.4

Unter der Annahme, dass der gesamte Input in den Hochbau (Tabelle 3) im Jahr 2050 1:1 wieder rückgebaut wird, können unter Berücksichtigung der Zusammensetzung des daraus entstehenden Abbruchmaterials (Tabelle 4) die Anteile an Betongranulat, MA-Granulat, RC-Kies und Asphaltgranulat des Abbruchs im Jahr 2060 bestimmt werden. Es wird im Folgenden angenommen, dass sich die heutige Zusammensetzung des Abbruchs (Tabelle 6) linear zu derjenigen im Jahr 2050 entwickelt. Um nicht unerklärliche Trends zu definieren, werden im Tiefbau alle Anteile konstant gelassen, im Hochbau verändern sich die Anteile an Strassenaufbruch und Ausbaus asphalt ebenfalls nicht. Einzig der Anteil an Betonabbruch erhöht sich auf Kosten des Mischabbruchteils (Tabelle 7).

Tabelle 6: Zusammensetzung des Abbruchs aus Hochbau und Tiefbau, der in die Aufbereitung geht (1997) [12].

	Hochbau		Tiefbau	
	'000 Tonnen	%	'000 Tonnen	%
Strassenaufbruch	245	9	304	15
Ausbauasphalt	6	2	594	30
Betonabbruch	1248	46	642	32
Mischabbruch	1185	43	448	23

Tabelle 7: Abbruchzusammensetzung aus Hoch- und Tiefbau in % (1997).

	HB ₍₁₉₉₀₎ ¹⁾	HB ₍₂₀₅₀₎ ²⁾	Δ HB ³⁾	TB ¹⁾
Betonabbruch	43	75	+ 0.53	32
Mischabbruch	41	9	- 0.53	23
Strassenabbruch	14	14	0	15
Ausbauasphalt	2	2	0	30

¹⁾ HB₍₁₉₉₀₎ und TB resultieren aus den Abbruchzusammensetzungen von Hochbau und Tiefbau im Jahre 1997 (Tabelle 6).

²⁾ HB₍₂₀₅₀₎ bezeichnet die Zusammensetzung von Abbruchmaterial im Hochbau in die Aufbereitung im Jahre 2050. Sie resultiert aus Tabelle 5.

³⁾ Δ HB bezeichnet die jährliche prozentuale Veränderung der Abbruchzusammensetzung im Hochbau.

Tabelle 8: Anteile der Baustoffe in Hoch- und Tiefbau. Die Zahlen wurden in [17] für das Jahr 1997 erhoben und werden in der Folge als konstant angenommen.

	HB [%]	TB [%]
Beton	82.6	22.3
Mauerwerk	3.3	2.3
Kies/Sand	12.6	58.3
Mauerwerk	1.5	17.1

Tabelle 9: Rückfluss von Aufbereitung in Hoch- und Tiefbau (prozentualer Anteil des gesamten Materials, das im Hochbau bzw. Tiefbau anfällt). Strassenaufbruch wird zu RC-Kies lose, Ausbauasphalt zu Asphaltgranulat.

	Hochbau	Tiefbau
RC-Kies, lose	50	100
Asphaltgranulat	0	100

Tabelle 10: Zusammensetzungen von Zement, Mauerwerk und Mörtel.

	Kalk	Ton	Rohstofffaktor
Zement	75%	25%	1.4 ¹⁾
	Backstein	Mörtel	Rohstofffaktor Backstein
Mauerwerk	75%	25%	1.35 ²⁾
	Zement	Kies/Sand	Flugasche
Mörtel	370 kg/m ³	1550 kg/m ³	290 kg/m ³

¹⁾ Sowohl Kalk als auch Ton werden mit einem Rohstofffaktor von 1.4 multipliziert.

²⁾ Gemäss verschiedenen Quellen werden für die Produktion von 1 kg Backstein 1.35 kg Ton benötigt.

Tabelle 11: Getätigte Investitionen in den Hochbau Neubau und daraus berechnete Umrechnungsfaktoren. Das Jahr 2000 ist auf 100% indiziert.

	Investitionen in HB Neubau [Mrd. Fr.] ¹⁾	Umrechnungsfaktoren (Investitionen HB Neubau) [%]
1990	34.1	144.9
1991	30.7	130.4
1992	29.7	126.2
1993	27.4	116.4
1994	28.6	121.5
1995	28.3	120.1
1996	24.3	103.3
1997	23.3	99.1
1998	22.9	97.2
1999	23.2	98.6
2000	23.5	100.0

¹⁾ real, zu Preisen von 1999

Tabelle 12: Investitionsbedingte Korrektur der Lagerveränderung pro Jahr im Hochbau und des Abbruchs aus dem Hochbau, basierend auf den Umrechnungsfaktoren aus Tabelle II.

	Mit log. Wachstums-kurve berechnetes Lager	Lagerände-rung mit log. Wachstums-kurve	Lagerver-änderung nach Korrektur	Lager nach Korrektur	Berechneter Abbruch aus HB vor Korrektur	Abbruch nach Korrektur
	[Mio t]	[Mio t/Jahr]	[Mio t/Jahr]	[Mio t]	[Mio t/Jahr]	[Mio t/Jahr]
1990	1113	27.5	39.8	1081	2.8	4.1
1991	1141	27.7	36.2	1117	3.0	3.9
1992	1169	28.0	35.3	1153	3.1	4.0
1993	1197	28.3	32.9	1186	3.3	3.8
1994	1225	28.5	34.6	1220	3.5	4.2
1995	1254	28.7	34.5	1255	3.6	4.4
1996	1283	28.9	29.8	1285	3.8	3.9
1997	1312	29.0	28.8	1313	4.0	3.9
1998	1341	29.2	28.4	1342	4.2	4.0
1999	1371	29.3	28.9	1371	4.3	4.3

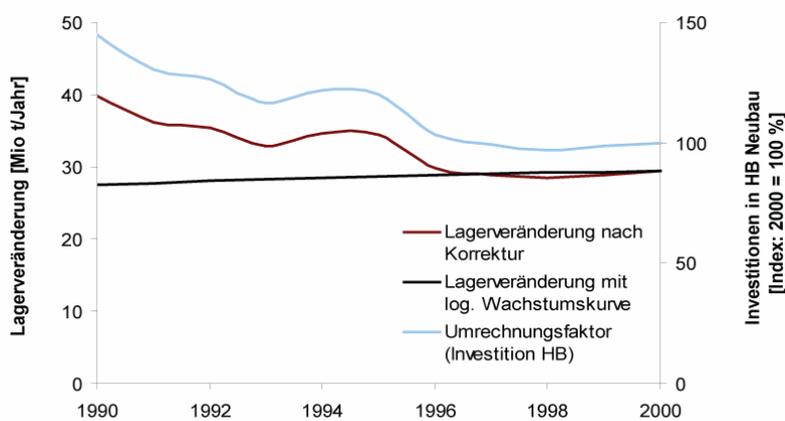


Abbildung 22: Grafische Darstellung der Lagerveränderung mit und ohne die Berücksichtigung der Investitionen in den HB Neubau (linke Achse). Rechte Achse: Umrechnungsfaktor. Das Jahr 2000 wurde auf 100 % indexiert.

Tabelle 13: Parameter der logistischen Wachstumskurve für die Lagerentwicklungen und die Abbruchquoten in Hoch- und Tiefbau.

	Lager		Abbruchquote	
	Hochbau	Tiefbau	Hochbau	Tiefbau
a_0	1113 Mio. t	680 Mio. t	0.26%	0.30%
a_{max}	3001 Mio. t	1400 Mio. t	2.10%	0.30%
m	0.37	0.49	0.12	1.0
w	0.039	0.038	0.025	1.0

A.2 Verwertungsmöglichkeiten: Entwicklung der Marktanteile und Zusammensetzungen

Tabelle 14: Mittlere Zusammensetzungen [kg/m^3] der Produkte der verschiedenen Prozesse 5 bis 12.

	Zement	K/S	MA-G	B-G	FF	Kalk	Summe
RC-Beton B HB (5) ¹⁾	300	1500	-	500	-	-	2320
RC-Beton M HB (6) ²⁾	320	1780	154	-	66	-	2300
SCC HB (7)	325	1000	-	600	125	-	2050
Mörtel (8)	370	1550	-	-	290	-	2210
Speicherziegel (9)	200	-	490	-	210	-	900
Leichtbeton (9)	250	265	287	-	123	-	925
RC-Steine (10)	-	-	1200	-	510	190	1900
SCC TB (11)	325	1000	-	600	125	-	2050
RC-Beton M TB (12) ³⁾	150	1600	280	-	120	-	2150

¹⁾ Zusammensetzung im Jahr 2005. Verändert sich gemäss Abbildung 23.

²⁾ Zusammensetzung im Jahr 2000. Verändert sich gemäss Abbildung 23.

³⁾ Zusammensetzung im Jahr 2005. Verändert sich gemäss Abbildung 23.

Tabelle 15: Logistische Wachstumsparameter der Verwertungsmöglichkeiten.

	a_0	a_{\max}	m	w	Bezug
RC-Beton B HB (5)	500	1600	0.313	0.15	kg B-G pro m^3 RC-Beton B HB, totale Kiesmasse=2000kg
RC-Beton M HB (6)	0.001	0.1	0.01	0.25	Anteil an Gesamtbetonbedarf HB
RC-Beton M HB (6)	200	1600	0.11	0.15	kg Mischabbruch (MA-G & FF) pro m^3 RC-Beton M TB, totale Kiesmasse=2000kg
SCC HB (7)	0.001	0.25	0.004	0.46	Anteil an Gesamtbetonbedarf HB
Mörtel (8)	1	1	1	1	Anteil an Mörtelbedarf HB & TB
Speicherziegel (9)	0.002	0.10	0.02	0.55	Anteil an Mauerwerkbedarf HB
Leichtbeton (9)	0.001	0.03	0.033	0.5	Anteil an Gesamtbetonbedarf HB
RC-Steine (10)	0.001	0.13	0.008	0.8	Anteil an Mauerwerkbedarf HB
SCC TB (11)	0.001	0.25	0.004	0.6	Anteil an Gesamtbetonbedarf TB
RC-Beton M TB (12)	400	1600	0.20	0.15	kg Mischabbruch (MA-G & FF) pro m^3 RC-Beton M TB, totale Kiesmasse=2000kg

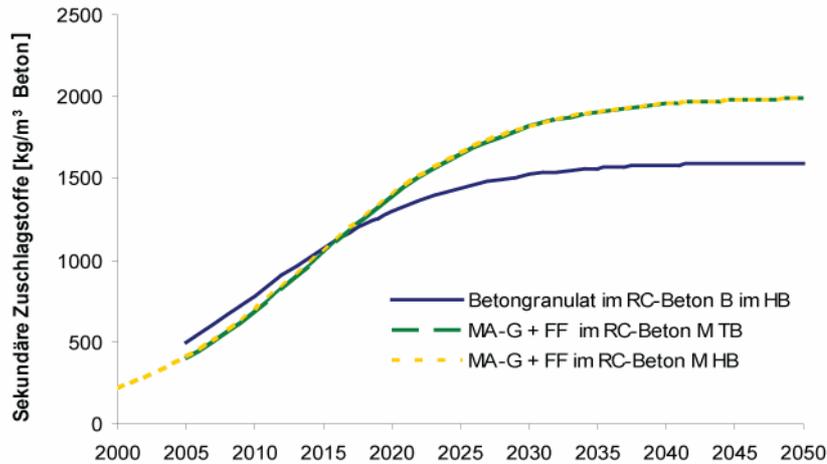


Abbildung 23: Entwicklung des Sekundärmaterialanteils im RC-Beton B im Hochbau bzw. im RC-Beton M im Tiefbau in kg/m^3 ab 2005.

A.3 Modellbeschreibung

Prozesse des Modells von 1990 – 2000

- 0 **Rohstoffe:** Natürliche Kieslager, Tongruben, Abbaugelände für Kalk, Rohstoffe für Asphalt.
- 1 **Produktion primäre Baustoffe:** Hier werden aus den Rohstoffen die Produkten Zement, Beton, Kies/Sand, Mauerwerk und Asphalt hergestellt.
- 2 **Hochbau:** Gebäude, Erschliessung der Parzellen (d.h. Tiefbau im Hochbau wird dem Hochbau angerechnet).
- 3 **Tiefbau:** Strassennetz, Schienen, Tunnelbau, Staumauern, Kanalisationsbauten und weitere Infrastruktur.
- 4 **Aufbereitung:** Sortierung und Aufbereitung der Bauabfälle, Produktion der Recyclingbaustoffe RC-Kies, Betongranulat (B-G), Mischabbruchgranulat (MA-G) und zugehörige Feinfraktion (FF).
- 5 **RC-Beton B:** Produktion von Recycling-Beton aus Betongranulat, welcher als Konstruktionsbeton in den Hochbau geht.
- 12 **RC-Beton M TB:** Produktion von Recycling-Beton aus Mischabbruchgranulat mit zugehöriger Feinfraktion (< 8 mm), welcher als Magerbeton in den Tiefbau geht.
- 13 **Deponie:** Inert- oder Reaktordeponie.

Zusätzliche Verwertungsmöglichkeiten

- 6 RC-Beton M HB:** Produktion von Recycling-Beton aus Mischabbruchgranulat mit zugehöriger Feinfraktion (< 8 mm), welcher als Magerbeton in den Hochbau geht.
- 7 SCC HB:** Produktion von selbstverdichtendem Konstruktionsbeton mit Betongranulat, welcher im Hochbau eingesetzt wird.
- 8 Mörtel:** Produktion von Mörtel mit MA-Feinfraktion, welcher zusammen mit dem Mauerwerk im Hochbau eingesetzt wird.
- 9 Speicherziegel/Leichtbeton:** Produktion von Blähgranulaten, welche entweder in Form von Speicherziegeln als Ersatz für Mauerwerk oder als Leichtbeton eingesetzt werden.
- 10 RC-Kalksandsteine:** Produktion von Kalksandsteinen aus gemahlenem Mischabbruch, welche als Ersatz für herkömmliche Kalksandsteine oder Natursteine eingesetzt werden.
- 11 SCC TB:** Produktion von selbstverdichtendem Konstruktionsbeton mit Betongranulat, welcher im Tiefbau eingesetzt wird.

A.4 Auszüge aus der Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle

Tabelle 16: Zusammensetzung der Recyclingbaustoffe nach BUWAL. Angegeben sind maximale Massenprozente, minimale Anteile sind grau hinterlegt. Fremdstoffe sind z.B. Holz, Papier, Kunststoffe, Metalle, Gips [1, 4].

	Bauabfallfraktion				
	Ausbau- asphalt	Kies/ Sand	Beton- abbruch	Misch- abbruch	Fremd- stoffe
Asphaltgranulat	90	10	2		0.3 ¹⁾
Recyclingbaustoffe Kies/Sand P	4	95	4	1	0.3
Kies/Sand A	20	80	4	1	0.3
Kies/Sand B	4	80	20	1	0.3
Betongranulat	3 ²⁾		95	2	0.3
Mischabbruchgranulat	3		97		0.3+1 ³⁾

¹⁾ Asphaltgranulat, welches heiss aufbereitet wird, darf aus bautechnischen Gründen keine Fremdstoffe enthalten.

²⁾ Betongranulat, welches als Zuschlagstoff für klassifizierten Beton vorgesehen ist, darf keinen Ausbaupasphalt enthalten.

³⁾ Fremdstoffe (ohne Gips) max. 0.3% und Gips max. 1%.

Gewässerschutzbedingte Einbauvorschriften

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

* die Schichtstärke darf max. 7 cm betragen und das Asphaltgranulat muss gewalzt werden

** als Planiematerial unter bituminöser Deckschicht

*** Bewilligung durch Amt für Umweltschutz möglich, falls eine ton-wassergebundene Deckschicht aufgebracht wird

Abbildung 24: Verwendungsmöglichkeiten der RC-Baustoffe. Gewässerschutzbedingte Einbauvorschriften nach [4].