

Mischabbruch–Recycling

Chancen, Potentiale und Strategien

Martin Schneider

Vertiefungsblock in Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik

D-BAUG, ETH Zürich

Leitung und Unterstützung:

Dr. Stefan Rubli

20. August 2005

Dank

Dieser Bericht entstand als Resultat der Semesterarbeit der Vertiefungsrichtung *Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik*. Ich möchte dabei folgenden Personen herzlich für ihre Unterstützung danken: Stefan Rubli für die aktive und konstruktive Leitung und Hilfe bei der Arbeit, Herrn J. Richi für die informative Führung auf seinem Betrieb, Herrn B. Caprani der Firma Eberhard für das geduldige Beantworten aller meiner Fragen.

Mir hat es grosse Freude gemacht, als gelernter Zimmermann mein früher erworbenes Wissen der Bauwelt mit der neuen Ausbildung zum Umweltingenieur zu verbinden.

Inhaltsverzeichnis

Glossar	v
Zusammenfassung	vi
1 Einleitung	1
2 System und Stoffflüsse	2
2.1 Bauabfälle, Recycling-Produkte und ihre Hersteller	2
2.2 Das System „Mineralische Baumaterialien“	3
2.3 Datengrundlage	3
2.4 Materiallager, Wachstum und Abbruchquote im Bauwerk Schweiz	4
2.5 Flüsse der mineralischen Baustoffe	5
3 Potential von Recyclingbeton im Hochbau	8
3.1 Recyclingbeton: Anforderungen an das Material	8
3.2 Die MSG-Methode: Eine Material-Datenbank des Bauwerkes	10
4 Dynamische Modellierung	11
4.1 Annahmen	13
4.2 Drei Szenarios	14
4.3 Vergleich der drei Szenarios	20
4.4 Fazit	23
5 Ausblick	25
Anhang	27
A Berechnungen mit der MSG-Methode	27
B Modell	33
B.1 Modellbeschreibung: Kiesflüsse in der Schweiz	33
B.1.1 Prozesse	33
B.1.2 Flüsse	33
B.1.3 Parameter und Koeffizienten	36
B.1.4 Gleichungen und Bedingungen	37
B.2 Parameter und Koeffizienten für das Modell	38
B.3 Sensitivitätsanalyse	39

Abbildungsverzeichnis

1	Das System „Mineralische Baustoffe im Bauwerk Schweiz“, einfach	3
2	System „Mineralische Baustoffe im Bauwerk Schweiz“, erweitert	4
3	Wachstumsrate Bauwerk Schweiz	5
4	Bauabfälle im Jahr 1997	7
5	Möglicher Einsatz von Recycling-Beton aus 100 % Mischabbruch	9
6	Das System für die Modellierung	12
7	Die Annahmen für die Modellierung	14
8	Parameterwahl: Daten und Modell im Vergleich	15
9	Die Verteilungskoeffizienten $k_{MA,HB}$ und $k_{R,HB}$	16
10	Szenario 1	17
11	Szenario 2	18
12	Szenario 3	19
13	Die modellierten Inputflüsse von RC-Mischabbruchgranulat	20
14	Die modellierten Inputflüsse vom RC-Rest-Granulat	21
15	Die Stoffflüsse in das Zwischenlager für RC-Produkte	22
16	Vergleich von Recycling-Input zum totalen Input	22
17	Anteil des Angebotes der Recyclingprodukte, der verbaut wird	24
18	Das System für die Modellierung, gross	34
19	Sensitivitätsanalyse: Beispiel Wachstum Hochbau	39

Tabellenverzeichnis

1	Zusammensetzung der Recyclingprodukte	2
2	Hergestellte Recycling-Produkte in den Jahren 1994- 2003	6
3	Recyclingbeton-Potential für Einfamilienhäuser	11
4	Recyclingbeton-Potential für die Schweiz nach der MSG-Methode	11
5	Parameter, die bei den drei Szenarios verändert wurden.	16
6	Berechnung Recyclingbeton-Potential (MSG-Methode)	27
7	Parameterwahl für das Modell	38

Glossar

Teile dieses Glossars wurden direkt aus [3] übernommen.

Asphaltgranulat Der auf eine Stückgrösse von max. 32 mm zerkleinerte Ausbauasphalt.

Aufbereitung Die Aufbereitung von Bauabfällen ist eine Behandlung und umfasst Tätigkeiten wie Sortieren, Brechen und Klassieren. Dies mit dem Ziel, Recyclingbaustoffe herzustellen, welche die ökologischen wie auch die bautechnischen Anforderungen erfüllen. Dabei sind nicht verwertbare Anteile auszuscheiden und einer vorschriftsmässigen Ablagerung oder Behandlung zuzuführen.

Ausbauasphalt Oberbegriff für den durch schichtweises Kaltfräsen eines Asphaltbelages gewonnenen, kleinstückigen Fräsasphalt und den beim Aufbrechen bituminöser Schichten in Schollen anfallenden Ausbruchasphalt.

Bauabfälle Alle Abfälle, die bei Bautätigkeiten anfallen.

Beton Mischung aus Mineralstoffen (Zuschlag), Bindemittel (Zement) und Wasser.

Betonabbruch Das durch Abbrechen oder Fräsen von bewehrten oder unbewehrten Betonkonstruktionen und –belägen gewonnene Material.

Betongranulat Durch Aufbereiten von Betonabbruch hergestellter Recyclingbaustoff mit einem Anteil von Kies/Sand und Betonabbruch $\geq 95\%$

Deckschicht Bindemittelgebundene Schicht (Asphalt, Betonbelag), die verhindert, dass Wasser in die darunterliegenden Materialien sickern kann.

Mineralische Bauabfälle Der Teil der Bauabfälle, der ohne weitere Behandlung auf Inertstoffdeponien abgelagert werden dürfte. In der Richtlinie des BUWAL werden die Fraktionen Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch und Mischabbruch unterschieden.

Mischabbruch Ein Gemisch von mineralischen Bauabfällen aus ausschliesslich Massivbauteilen wie Beton, Backstein-, Kalksandstein- und Natursteinmauerwerk.

Mischabbruchgranulat Der nach Absieben der Fraktion ≤ 8 mm durch Aufbereiten des Mischabbruches hergestellte Recyclingbaustoff.

Material aus Bodenwäsche Kies/Sand, das durch eine physikalisch-chemische Aufbereitung von kontaminiertem Bodenmaterial gewonnen wird.

Prüfgrössen bei Beton Geprüft werden die Qualitätsmerkmale beim *Frischbeton*, die mechanischen Eigenschaften des *Festbetons* sowie die *Dauerhaftigkeit* des Materials (Alterung).

Recyclingbeton Beton mit einem Gehalt an Gesteinskörnung (Zuschlag) von ≥ 25 Masse-% aus Betongranulat, Mischabbruchgranulat oder Material aus der Bodenwäsche. (SN EN 206-1)

Recycling-Kiessand P, A, B Der durch Aufbereiten von Strassenaufbruch aus nichtgebundenen Fundationsschichten hergestellte Recyclingbaustoff in drei Qualitäten („Pur“, Asphalt, Beton).

Rückbau Demontage- und Abbruchtechnik, die darauf ausgerichtet ist, die anfallenden Bauabfälle bereits auf der Baustelle entsorgungerecht zu trennen und wenn möglich einer Verwertung zuzuführen.

Strassenaufbruch Oberbegriff für das durch Ausheben, Aufbrechen oder Fräsen von nicht gebundenen Fundationsschichten und von stabilisierten Fundations- und Tragschichten gewonnene Material.

Zusammenfassung

Jährlich werden in der Schweiz rund 0.5% des Bauwerkes Schweiz abgebrochen oder erneuert. Dabei fallen enorme Mengen an Bauabfällen an. Der sogenannte Mischabbruch, das heisst ein Gemisch von Beton- und Mauerwerkabbruch hat dabei einen Anteil von rund 30%. Das entsprach im Jahre 2000 einer Menge von rund 2 mio. Tonnen.

In der Vergangenheit wurde ein grosser Teil des Mischabbruches unbehandelt deponiert. Das wird in Zukunft nicht mehr möglich sein, weil einerseits der verbleibende Deponieraum knapp wird und andererseits behördliche Auflagen untersagen, dass Material, welches verwertet werden kann, deponiert wird.

Die vermehrte Wiederverwendung von Mischabbruch drängt sich daher dringend auf – vor allem auch, weil die natürlichen Kieslager der Schweiz langsam knapp werden.

Rückbaufirmen, die temporären Besitzer des Abbruchgutes, werden also immer mehr zu Produzenten von Recycling-Produkten. Die Zusammensetzung und Qualität dieser Produkte ist in Verordnungen und Normen klar geregelt.

Heute wird der aufbereitete Mischabbruch als *RC-Mischabbruchgranulat* zu einem grossen Teil lose oder als Magerbeton im Tiefbau verbaut. Sinnvollerweise würde er aber als Zuschlagstoff im Konstruktionsbeton eingesetzt, sowohl im Hoch- wie auch im Tiefbau. Forschungsarbeiten der EMPA haben gezeigt, dass die Eigenschaften von Mischabbruch-Beton den Anforderungen an die Prüfgrössen für Konstruktionsbeton genügen; ein Einsatz im Hochbau ist also möglich.

Mit einer dynamischen Modellierung des Kieshaushaltes der Schweiz können wir mit drei Szenarios zeigen, dass sich in kurzer Zeit ein Lager aus überschüssigen Recycling-Produkten bilden wird, wenn der Anteil von Recyclingbeton im Hochbau nicht schnell und drastisch erhöht wird:

Wenn im Hochbau weiterhin kein Mischabbruchgranulat und vom restlichen Recyclingmaterial nur 25% verbaut wird - so ist die Situation heute - , dann werden ab dem Jahr 2006 nicht mehr alle Recyclingprodukte im Tiefbau verbaut werden können. Wenn aber sowohl im Hoch- wie auch im Tiefbau 80% der Betonarbeiten mit Recyclingbeton ausgeführt werden und dabei auch Beton aus Mischabbruch eingesetzt wird, dann können alle anfallenden Recyclingprodukte abgesetzt und im Bauwerk Schweiz verbaut werden.

Es braucht daher ein Umdenken bei allen beteiligten Partner im Hoch- und Tiefbau, um rasch mehr Recyclingbeton – und insbesondere mehr Recyclingbeton aus Mischabbruch – als Konstruktionsbeton im Hochbau einzusetzen.

1 Einleitung

Häuser werden gebaut, seit die Menschen nicht mehr in Höhlen wohnen. Und alte Häuser werden ebensolange schon abgebrochen, wenn sie nicht mehr funktionstüchtig sind. Dass für den Neubau von Gebäuden Teile des Abbruchmaterials gebraucht werden, ist auch nicht neu: Viele Kirchen, Burgen und Häuser wurden aus den Steinen und Balken ihrer Vorgänger wieder aufgebaut; dieses Recycling ist typisch für alle Mangel-Wirtschaften in allen Gesellschaften.

Nach dem zweiten Weltkrieg im letzten Jahrhundert wurde mit dem wachsenden Wohlstand und Überfluss vergessen, dass die Funktionalität eines Gebäudes und der Wert des Baumaterials nicht dasselbe sind: Nur weil ein Dach nicht mehr dicht ist, heisst das nicht, dass auch die Mauern nichts mehr tragen. Lange wurde daher *alles* Material der abgebrochenen Gebäude deponiert - ohne zu realisieren, dass damit wertvolles Baumaterial verloren geht.

Vor einigen Jahren hat man wiedererkannt, dass ein grosser Teil des Abbruchmaterials aus Hoch- und Tiefbau wiederum als Ausgangsmaterial für neue Bauten eingesetzt werden kann. Die Recyclingquote der Bauabfälle beträgt nun bereits rund 70%.

Allerdings werden heute die meisten Recycling-Produkte im Tiefbau eingesetzt. Da aber die Aufnahmekapazität für diese Stoffe im Tiefbau begrenzt ist, könnten wir bald wieder vor einem Problem stehen: Überkapazitäten im Angebot von Recycling-Produkten würden entstehen; diese liessen sich nicht mehr absetzen und würden dann wohl deponiert werden.

Zwei andere Aspekte dürfen bei dieser Betrachtung ebenfalls nicht ausser Acht gelassen werden: Einerseits wird der Deponieraum immer knapper und damit teurer, andererseits verringern sich in der Schweiz die abbaubaren Kiesreserven langsam aber sicher. Diese Situation wird sich in Zukunft sogar verschärfen, da die Menge der Bauabfälle zunehmen wird und gleichzeitig der Hochbau ungebrochen weiterwächst. Auch aus diesen Gründen ist ein erhöhter Einsatz von Recyclingprodukten wünschenswert und sinnvoll.

In dieser Arbeit versuchen wir die anfallenden Mengen von Mischabbruch abzuschätzen und möchten zeigen, dass das Potential für den Einsatz von Recycling-Mischabbruchgranulat im Hochbau gross ist. Mit einer dynamischen Modellierung des Kieshaushaltes für die Schweiz wollen wir in Szenarios darstellen, was geschehen wird, wenn kein Recycling-Material im Hochbau eingesetzt wird.

Fragestellung:

Wir haben uns auf die folgenden drei Themen konzentriert:

- Können wir die Stoffflüsse von Mischabbruch-Material heute mittels einer Stoffflussanalyse ausreichend abschätzen? Dazu muss vorgängig ein System aufgestellt werden, welches die relevanten Prozesse und Flüsse abbildet.
- Wie gross ist das Potential für die Aufnahme zusätzlicher Mengen von Mischabbruchmaterial im Hochbau? Wir können das mit Hilfe einer bestehenden Datenbank [1] abschätzen.
Wie „gut“ ist RC-Beton aus Mischabbruch qualitativ? Eine Studie der EMPA hat das untersucht, ihre Ergebnisse werden kurz vorgestellt [2].
- Erstellen von Szenarios für die Zukunft mit Hilfe einer dynamischen Modellierung der Kiesflüsse: Was geschieht im worst-case, was, wenn der status-quo beibehalten wird? Können die anfallenden Mengen von Recyclingmaterial überhaupt verbaut werden?

Die Arbeit ist chronologisch nach dieser Auflistung aufgebaut, am Anfang steht ein Glossar mit den wichtigsten Begriffen, am Ende werden die Resultate der einzelnen Aspekte zusammengefasst und diskutiert.

2 Systembeschreibung und Abschätzung der Stoffflüsse

2.1 Bauabfälle, Recycling-Produkte und ihre Hersteller

Bauabfälle können grob unterteilt werden in mineralische Abfälle (Beton, Mauerwerk, Naturstein, Kies und Sand) und alle anderen Abfälle wie Holz, Gips, Keramik, Kunststoffe, Metalle, Glas, etc. Ein grosser Teil der mineralischen Bauabfälle eignet sich für das Recycling. Das kann entweder direkt auf der Baustelle geschehen oder die Bauabfälle kommen in die Aufbereitung. Dort werden aus den Abfällen Recycling-(RC)-Produkte hergestellt.

In der Schweiz werden vier verschiedene Fraktionen von mineralischen Bauabfällen unterschieden, welche bereits auf der Baustelle getrennt werden sollen: Ausbauasphalt, Strassenaufbruch (Kies, Sand), Betonabbruch und Mischabbruch (Betonabbruch und Mauerwerk gemischt). Aus diesen vier „Rohmaterialien“ werden in der Aufbereitung sechs Produkte hergestellt: RC-Asphaltgranulat, RC-Kiessand in den Qualitäten P, A, B, RC-Betongranulat und RC-Mischabbruchgranulat (vgl. Figur 4, S. 7).

Diese Produkte dürfen je nach Zusammensetzung wieder im Hoch- und Tiefbau als Baumaterial oder Zuschlagstoff im Beton verwendet werden. Für die genauen Voraussetzungen wurden vom Bund und den betroffenen Verbänden Richtlinien und Normen erstellt ([3], [4]). Die Tabelle 1 zeigt die jeweilige Zusammensetzung der verschiedenen Produkte.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Recyclingprodukte. **Fett** sind die Hauptgemengteile, für sie sind es minimale Massenprozente, alle anderen Angaben sind Nebengemengteile, das heisst maximale Massenprozente. Quelle: Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle, BUWAL [3].

Recyclingbaustoffe	Bauabfallfraktion				
	Ausbau- asphalt	Kies- Sand	Beton- abbruch	Misch- abbruch	Fremd- stoffe
Asphaltgranulat	90	10	2	2	*0.3
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	————	95 ————	2	0.3
Mischabbruchgranulat	3	————	97 ————	————	***0.3 + 1

* Wenn heiss aufbereitet 0.0

** Für klassifizierten Beton 0.0

*** 0.3 ohne Gips + 1.0 Gips

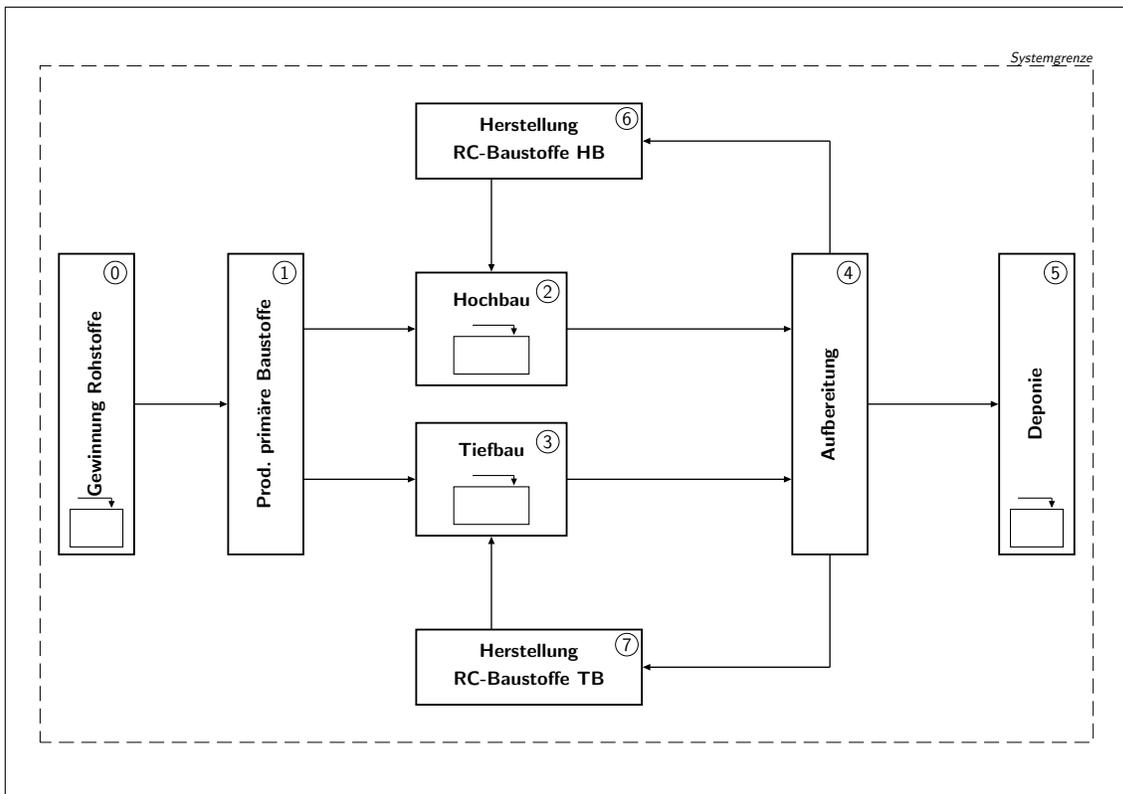
Produzenten Die Produzenten der Recycling-Produkte sind vorwiegend die Abbruch-, bzw. Rückbauunternehmen, sie sind die temporären Besitzer des Abbruchmaterials. Für sie ist es primär eine wirtschaftliche Notwendigkeit, nach Alternativen für die ehemals billige Deponierung der Bauabfälle zu suchen.

Die Planung der öffentlichen Hand und damit auch die rechtlichen Rahmenbedingungen sind sich ebenfalls am verändern. So schreibt das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich in seinem *Informationsblatt 5.6: Recyclingprodukte*: „Das Deponieren von Bauabfall ist aus ökologischer Sicht das ungünstigste Verhalten. Dieser Weg sollte nur beschränkt werden, wenn eine Wiederverwendung oder Verwertung nicht in Frage kommen, z.B. wegen Verschmutzung der Abfälle oder unverhältnismässig grossem Aufwand zur Trennung und Aufbereitung.“ [11]

Andere Hersteller von RC-Materialien sind Kiesproduzenten, die ihre natürlichen Lager von Primärkies schonen wollen und heute auf die Produktion von sekundären Baustoffen setzen.

2.2 Das System „Mineralische Baumaterialien“

Die Entwicklung des Systemes „Mineralische Baumaterialien im Gebäudepark Schweiz“ führte zum Ergebnis in der Figur 1. Diese Darstellung ist relativ einfach und zeigt die wichtigsten Flüsse und Prozesse auf (die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Nummer des jeweiligen Prozesses in den Figuren 1 und 2): Aus dem natürlichen Lager (0) werden die primären Baustoffe hergestellt (1), die dann im Hochbau (2) oder im Tiefbau (3) verbaut werden. Dadurch nimmt das natürliche Lager ab, die Lager von Hoch- und Tiefbau nehmen zu. Die Abbruchmaterialien kommen alle in die Aufbereitung (4), von dort gehen sie entweder in die Deponie (5), oder sie werden zu RC-Produkten aufbereitet (6,7) und gelangen zurück in das Bauwerk.



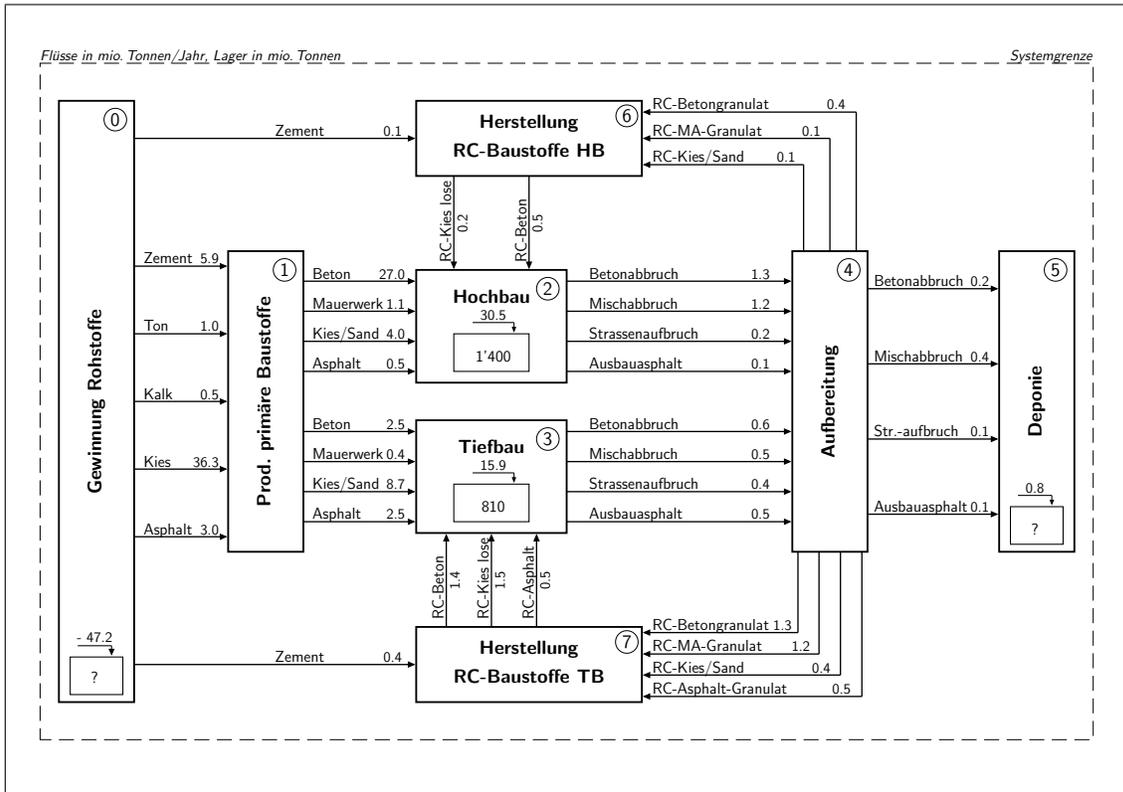
Figur 1: Das System „Mineralische Baustoffe im Bauwerk Schweiz“, einfache Darstellung.

Die Figur 2 versucht, die einzelnen Flüsse der verschiedenen mineralischen Stoffen abzubilden. Basis dazu ist das System der Figur 1. In dieser Arbeit wurde nicht weiter auf eine Konkretisierung dieses Systemes hingearbeitet, eine kürzlich erstellte Diplomarbeit hatte dies bereits zum Thema [5].

2.3 Datengrundlage

Grundsätzlich ist es schwierig, verlässliche und vollständige Daten zum Thema Bauabfälle zu erhalten. Meist müssen die Ergebnisse verschiedener Studien verknüpft werden, oft resultieren daraus widersprüchliche Angaben. Die hier benutzten Daten sind daher als Größenordnung zu verstehen und nicht als „korrekte Werte“ im Sinn einer exakten Berechnung. Der Fehler kann dabei durchaus 100 % betragen!

Eine Quelle mit viel Informationsgehalt ist die Studie von Wüest & Partner. Die Autoren untersuchten im Auftrag des BUWAL die Bauabfälle der Schweiz und gingen dabei auch auf den Mischabbruch ein [6]. Sie stützen sich dabei auf Erhebungen aus dem Jahre 1997, das heisst, diese Daten sind etwas veraltet.



Figur 2: Das System „Mineralische Baustoffe im Bauwerk Schweiz“, erweiterte Darstellung. Die Flüsse sind in mio. Tonnen/Jahr, die Lager in mio. Tonnen angegeben. Direkt auf der Baustelle werden insgesamt 4.7 mio. Tonnen (Hochbau: Ausbauasphalt 0.1, Strassenaufbruch 0.5; Tiefbau: Ausbauasphalt 1.4, Strassenaufbruch 2.7 mio. Tonnen). Zahlen für die Lager der natürlichen Rohstoffe und die Deponie wurden nicht erhoben. Nicht berücksichtigt in diesem System sind zudem die Importe von Rohstoffen und Baumaterialien. Quellen: Bundesamt für Statistik (BFS) [8], BUWAL [6] und eigene Abschätzungen.

Der Verband für das Aushub-, Rückbau- und Recyclingwesen (ARV) veröffentlicht die produzierten Mengen von RC-Produkten ihrer Mitglieder-Betriebe. Auf Anfrage erhielten wir auch ihre Schätzungen für die schweizweite Produktion.

Weitere Angaben können der jährlich veröffentlichten Abfallstatistik vom BUWAL entnommen werden [7].

Zusätzlich wurden Daten zu Lager- und Stoffflüssen aus der Materialflussrechnung 2005 berücksichtigt [8].

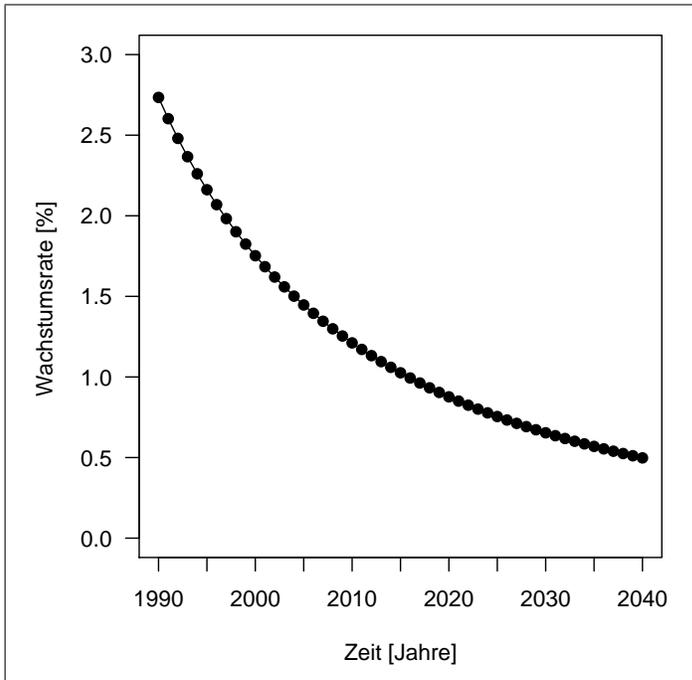
Auf dem Internet findet sich eine Fülle von Klein- und Kleinstinformationen zu den Themen Bauabfall und Recycling; eine Liste mit interessanten und hilfreichen Links ist im Anschluss an das Literaturverzeichnis angefügt [12].

2.4 Materiallager, Wachstum und Abbruchquote im Bauwerk Schweiz

Materiallager Im „Bauwerk Schweiz“ wurden in den vergangenen Jahrhunderten enorme Mengen an Material verbaut. So ergibt eine Studie des Bundesamtes für Statistik (BFS) für das Kieslager in Hoch- und Tiefbau die Menge von rund 1'700 mio. Tonnen im Jahr 2000 [8]. P. Baccini in [9] rechnet für das Jahr 1990 mit einem Lager von rund 195 Tonnen/Einwohner, das heisst ca. 1'300 mio Tonnen für das Bauwerk Schweiz. Eine weitere Arbeit schätzt das gesamte Materiallager auf 2'600 mio Tonnen, das sind – bei einem Kies/Sand-Anteil von 75 % – rund 2'000 mio. Tonnen [10].

Wachstum Pro Jahr wurden in den letzten Jahren jeweils um die 40 mio. Tonnen Material verbaut. Wenn wir mit einem totalen Lager von 2'500 mio. Tonnen rechnen, ergibt sich damit eine Wachstumsrate von rund 1.6 Massen-% In der Figur 3 ist unsere Schätzung für die zeitliche Entwicklung der Wachstumsraten dargestellt. Sie resultiert aus unseren Annahmen für die dynamische Modellierung in Abschnitt 4. Berechnet wurde die jeweilige Änderung des Lagers im Verhältnis zum aktuellen Bestand.

Wir gehen in dieser Arbeit davon aus, dass das Wachstum im Bauwerk Schweiz in den nächsten Jahren nur langsam abnehmen wird. Mit der Zeit wird allenfalls eine Sättigung erreicht werden, bis es soweit ist, dauert es aber noch rund 50 Jahre.



Figur 3: Die Wachstumsrate des Bauwerkes Schweiz, berechnet mit der dynamischen Modellierung (siehe Abschnitt 4). Berechnet wurde die jeweilige Änderung des Lagers im Verhältnis zum aktuellen Bestand, es werden somit Massen-% angegeben.

Abbruch Pro Jahr wird ein gewisser Teil der Gebäude und Infrastruktur erneuert oder abgebrochen und ersetzt. Dabei fallen grosse Mengen an Bauabfällen an, z.B. im Jahr 2000 rund 12 mio. Tonnen. Diese stammen je zur Hälfte aus dem Hochbau und dem Tiefbau. Rund fünf mio. Tonnen werden vor allem im Tiefbau direkt auf der Baustelle wiederverwendet, fünf mio. Tonnen gehen in die Aufbereitung und daraus werden ca. 4 mio. Tonnen RC-Produkte hergestellt. In die Deponie oder andere Entsorgungswege gelangen somit vier mio. Tonnen Bauabfälle.

Die Arbeit von Wüest & Partner [6] schätzt für das Bauwerk Schweiz eine Abbruchquote von 0.5%. Diese Menge wird also jährlich vom Bestand abgebrochen. Das heisst: Wenn der Bestand zunimmt, dann nimmt auch die abgebrochene Menge zu, sogar wenn die Abbruchquote konstant bleibt. Falls sich aber die Abbruchquote erhöht, dann werden die Abfallmengen in den nächsten Jahren überproportional stark wachsen.

2.5 Flüsse der mineralischen Baustoffe

Bauabfälle Die Mengen der Bauabfälle werden für das Jahr 1997 auf rund 11 mio. Tonnen geschätzt [6]. Für das Jahr 2003 waren es bereits 14 mio. Tonnen [10].

Ein grosser Teil dieser Abfälle wird direkt auf der Baustelle wiederverwertet (Kies, Sand und Asphalt). Was nicht direkt deponiert wird, gelangt in die Aufbereitung. Die Mengen der vier Abfall-Fractionen betragen dort (alle Angaben in mio. Tonnen für das Jahr 1997) 0.6 Ausbauasphalt, 0.6 Strassenaufbruch, 1.9 Betonabbruch, 1.7 Mischabbruch.

Aus der Aufbereitung gelangen 0.8 mio. Tonnen in die Deponie, so dass 0.5 RC-Asphaltgranulat, 0.5 RC-Kiessand (P, A, B), 1.7 RC-Betongranulat und 1.3 RC-Mischabbruchgranulat die Aufbereitung verlassen und wieder im Bauwerk eingesetzt werden können.

In der Figur 4 ist diese Verteilung der Materialflüsse dargestellt.

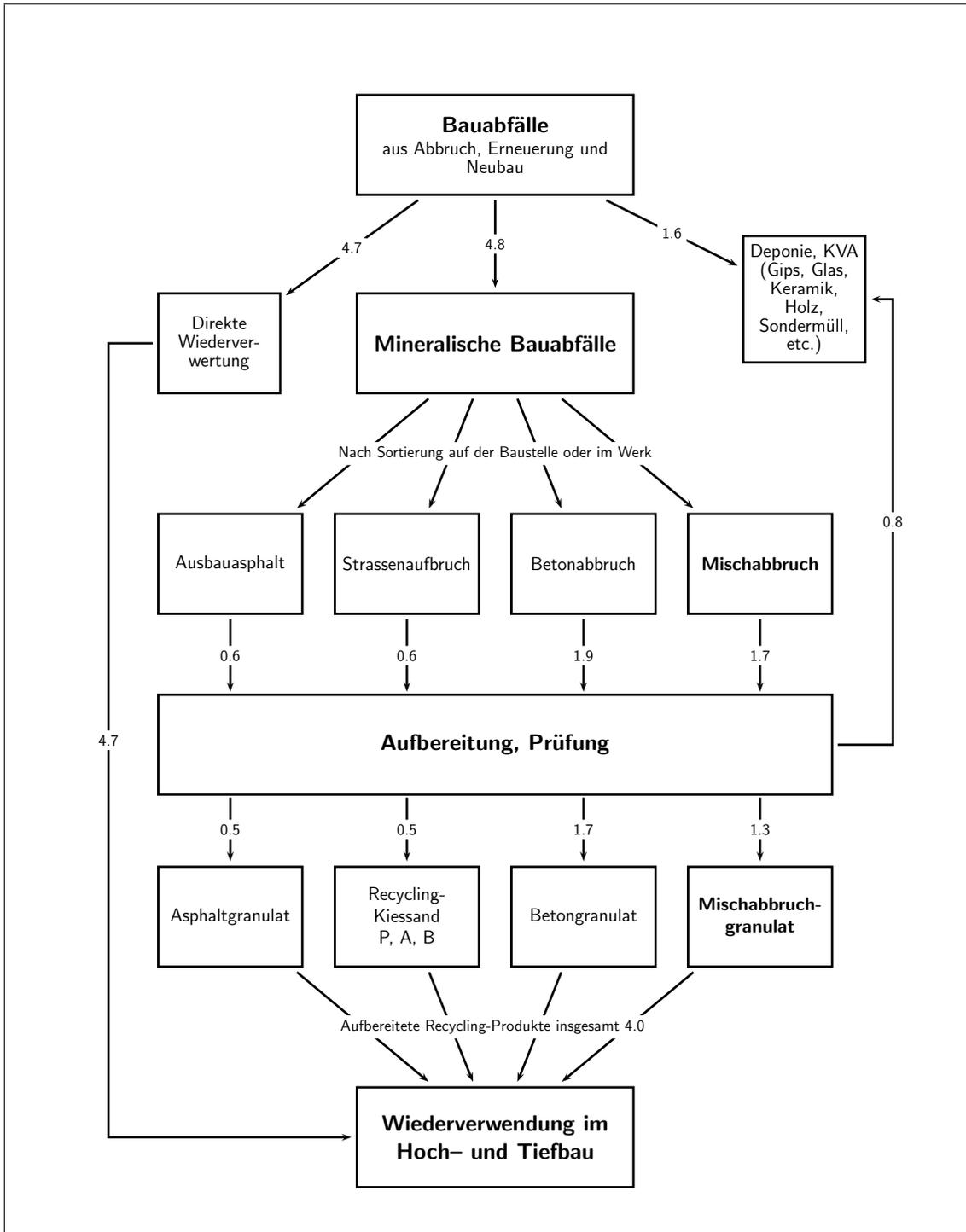
Recycling-Produkte In der Tabelle 2 sind die vom Verband für das Aushub-, Rückbau- und Recyclingwesen (ARV) angegebenen Mengen der hergestellten Recycling-Produkten aufgeführt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit dem Recycling erst vor wenigen Jahren begonnen wurde. In diesen 10 Jahren haben aber die Mengen stetig zugenommen und heute liegt der Anteil der recycelten mineralischen Bauabfälle bereits bei ca. 90 % (inklusive der direkten Verwertung auf der Baustelle).

Als Größenordnung für den Anteil von Mischabbruch im Bauabfall wird für den Hochbau 30 % geschätzt. Im Tiefbau ist es weniger, dort fallen ca. 10 % aller Abfälle als Mischabbruch an. Die jährlichen Mengen betragen gesamthaft ca. 1.7 mio. Tonnen (1997). Davon wurden 1.3 mio. Tonnen aufbereitet, was einer Recyclingquote von 76 % entspricht.

Tabelle 2: *Recycling-Produkte, die in den Jahren 1994- 2003 hergestellt wurden in mio, Tonnen/Jahr. ARV: Verband für das Aushub-, Rückbau- und Recyclingwesen, FSKB: Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie. Quelle: ARV [12]*

Jahr	Asphalt- granulat	Kiessand P, A, B	Beton- granulat	MA- granulat	Diverses (Kies)	Total ARV	Total FSKB	Total CH geschätzt
1994	0.07	0.46	0.17	0.09	-	0.79	-	-
1995	0.06	0.53	0.16	0.07	-	0.82	-	-
1996	0.17	0.97	0.30	0.25	0.01	1.69	-	-
1997	0.24	0.94	0.36	0.29	0.00	1.84	-	-
1998	0.27	0.88	0.44	0.30	0.01	1.90	-	-
1999	0.21	1.37	0.51	0.40	0.14	2.64	-	-
2000	0.14	0.87	0.42	0.28	0.41	2.12	-	-
2001	0.21	0.84	0.69	0.21	0.58	2.53	1.01	3.10
2002	0.22	0.80	0.81	0.36	0.34	2.54	1.15	3.30
2003	0.23	0.81	0.77	0.29	0.30	2.41	1.19	3.40



Figur 4: Bauabfälle und ihre Verwertung im Jahr 1997. Die Zahlen sind in mio. Tonnen/Jahr, Quelle: Wüest & Partner in [6].

3 Potential Recyclingbeton im Hochbau

3.1 Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat: Materialkenngrößen

Mit Änderungen zitiert aus dem Bericht Nr. 203600 der EMPA, Seiten 5-8, [2].

Definition von Recyclingbeton Ein Beton wird dann als Recyclingbeton bezeichnet, wenn dessen Gehalt an Gesteinskörnung zu mindestens 25 Massenprozent aus einem Recycling-Granulat besteht [3]. Das Recyclingmaterial kann Beton- oder Mischabbruchgranulat sowie Material aus der Bodenwäsche sein.

Mischabbruchgranulat Die Qualität des Mischabbruchgranulates hängen vom Gemisch des Ausgangsmaterials (Verhältnis von Beton- zu Mauerwerk) sowie dem Aufbereitungsprozess ab. Durch das Brechen des Materials erhält man ein Granulat, welches einen hohen Anteil an nichtkubischen Körnern mit gebrochener Oberfläche aufweist. Die Kornform wirkt sich im lose geschütteten Material auf dessen Hohlraumgehalt aus (36-40 Vol-% im Gegensatz zu natürlichem Kies-Sand mit 24-27 Vol-%). Mit Mischabbruchgranulat im Beton wird deshalb ein erhöhter Anteil an Zement- bzw. Bindemitteln benötigt, um den Frischbeton gut verarbeiten zu können.

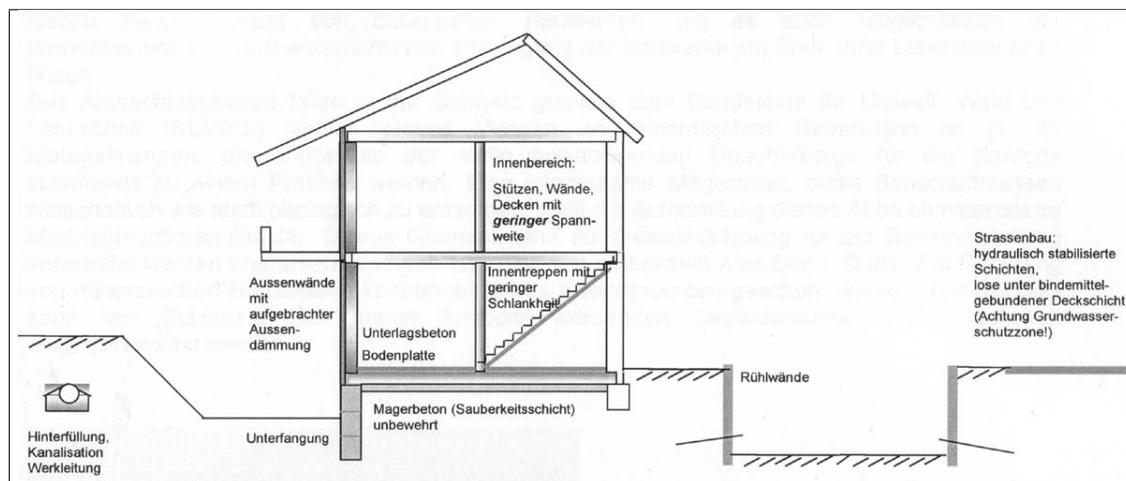
Höhere Wasseraufnahme Ein entscheidender Punkt bei der Betonherstellung ist die grosse Porosität des Mischabbruchgranulates. Die Wasseraufnahme, welche bei Mischabbruchgranulat bedeutend grösser ist als bei natürlichem Kies-Sand, wird durch Porenstruktur und -volumen des Materials beeinflusst. Ein Teil des Wassers wird bei der Betonherstellung sogleich von dem Mischabbruchgranulat aufgesogen; es muss daher mit einer höheren Wasserdosierung gearbeitet werden.

Festbetoneigenschaften Die Eigenschaften des Mischabbruchgranulats beeinflussen die Eigenschaften des Festbetons entscheidend und bestimmen damit den jeweiligen Anwendungsbereich.

- **Druckfestigkeit:** Bei vergleichbarem Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert) unterscheiden sich die Druckfestigkeitswerte von Beton aus Mischabbruchgranulat und konventionellem Beton deutlich. Der Unterschied ist auf das höhere Wassersaugen des Granulats in der Frischbetonphase, auf die geringere Druckfestigkeit des Granulats und auf das unterschiedliche Bindemittelmittelvolumen zurückzuführen. Die Druckfestigkeiten erreichen die Werte für die Anforderung an normalen Einsatz.
- **E-Modul (Elastizitätsmodul):** Mit steigendem Anteil an Kalksandstein- und Backsteinabbruch wird das E-Modul kleiner. Je kleiner das E-Modul, desto höher wird die Verformung, die ein Bauteil bei Belastung aufweisen wird. Grosse Spannweiten führen bei kleinem E-Modul zu grossen Verformungen.
- **Schwinden:** Aufgrund des höheren Bindemittelmittelvolumens und der höheren Wasserdosierung schwindet Beton aus Mischabbruchgranulat stärker als konventioneller Beton. In der Bauausführung begegnet man diesem Verhalten u.a. dadurch, indem man kleinere Betonierabschnitte wählt.
- **Porosität des Festbetons:** Bei Beton aus Mischabbruchgranulat wird mit einem höheren Bindemittelmittelvolumen und höherem W/Z-Wert gearbeitet. Dadurch ist das Volumen der Kapillarporen und der Kapillarporendurchmesser grösser. Da daher auch die Wasserleitfähigkeit grösser ist, empfiehlt sich dessen Einsatz eher in Innen- als in ungeschützt exponierten Aussenbereichen (Frostbeständigkeit).

Anforderungen sind zu relativieren Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Recyclingbeton, hergestellt aus Mischabbruchgranulat, qualitative Grenzen aufweist. Er sollte also auch entsprechend seinen Eigenschaften eingesetzt werden. Um eine nutzbringende Verwendung dieses Recyclingbetons zu fördern, erscheint es zudem wichtig, dass bezüglich der Qualitätsanforderungen die «Höhe der Messlatte» auf die vorgegebenen beziehungsweise die realistisch möglichen Zielgrößen und Verwendungsarten abgestimmt ist.

(Ende Zitat)



Figur 5: Mögliche Einsatzgebiete von Recyclingbeton aus 100 % Mischabbruchgranulat. Quelle: EMPA, Bericht Nr. 203600, Seite 8 [2]

Mögliche Einsatzgebiete: Die Figur 5 aus der Studie der EMPA zeigt, wo Recyclingbeton aus Mischabbruch überall eingesetzt werden kann. Dieser Aufzählung können wir entnehmen, dass konventioneller Beton zu einem grossen Teil durch Recyclingbeton aus 100 % Mischabbruchgranulat (RC-MA-Beton) ersetzt werden könnte.

Hausbau Innenbereich: Stützen, Wände, Decken mit geringer Spannweite, Innentreppen mit geringer Schlankheit

Aussenbereich: Wände mit aufgebrachteter Aussendämmung, Magerbeton (Sauberkeitsschicht) unbewehrt, Unterfangung, Bodenplatte, Unterlagsbeton

Strassenbau Hydraulisch stabilisierte Schichten, lose unter bindemittelgebundener Deckschicht (Nicht in Grundwasserschutzzone!)

Infrastruktur Hinterfüllung, Kanalisation, Werkleitung, Rühlwände

Verwendung von RC-Mischabbruchgranulat heute Wo wird RC-Beton aus Mischabbruchgranulat heute eingesetzt? Diese Frage stellten wir Herrn B. Suter, Geschäftsführer des Verbandes für das Aushub-, Rückbau- und Recyclingwesen (ARV) [12]. Er beantwortete die Frage folgendermassen: „... etwas schwierig zu beantworten, da keine Zahlen vorliegen. Nach unserer Meinung wie folgt:

Tiefbau: Einsatz in ungebundener Form als Kiesersatz Anteil eher tief. Einsatz in gebundener Form als Sohlen-, Füll- und Hüllbeton, Anteil relativ hoch, Tendenz steigend.

Hochbau: Einsatz in ungebundener Form als Kiesersatz Anteil gering. Einsatz in gebundener Form als Sohlen-, Füll- und Hüllbeton Anteil hoch. Anteil als Konstruktionsbeton, noch tief, Tendenz hoffentlich steigend.“

P. Dürrenmatt kam bei seiner Umfrage auf das Ergebnis, dass ca. 25 % der totalen RC-Produkte im Hochbau eingesetzt werden, das heisst, RC-Beton aus Mischabbruch wird im Hochbau eher wenig eingesetzt [5].

Herr Caprani von der Firma Eberhard sagt, dass der grösste Teil ihrer RC-Mischabbruch-Produkte in Magerbeton in den Tiefbau gehen (persönliche Mitteilung).

Downcycling? Qualität des Recyclings

Für die Qualität des Recyclings von Bauabfällen ist es wichtig zu beachten, dass die heute verbauten Recycling-Baustoffe in einigen Jahrzehnten wiederum als Bauabfälle anfallen werden.

Wenn heute Recycling-Produkte lose verbaut werden, das heisst, nicht in Zement (= Beton) gebunden, dann können diese Stoffe wahrscheinlich nie mehr als Mischabbruch in die Aufbereitung gelangen, sondern müssten nach heutiger Rechtslage - möglicherweise als Altlast - deponiert werden.

Falls aber Recyclingbeton daraus hergestellt wird, dann wird dieser Beton beim erneuten Rückbau als Betonabbruch oder allenfalls als Mischabbruch im Recycling-Kreislauf bleiben. Zudem sind allfällige Schadstoffe im Zement ebenfalls gebunden und können so die Umwelt nicht belasten.

Es ist also sinnvoll, Recycling-Baustoffe in gebundener Form einzusetzen, um kein Downcycling sondern effektives Recycling zu betreiben.

3.2 Die MSG-Methode: Eine Material-Datenbank des Bauwerkes

Mit den Erkenntnissen aus der oben vorgestellten Studie [2] gingen wir nun daran, das Potential für RC-Beton im Hochbau abzuschätzen.

Dazu benutzten wir eine bestehende Datenbank, welche Häuser aus den letzten 100 Jahren modular aufbaut. Sie nennt sich Material-, Stoff- und Gebäudemethode (MSG-Methode) [1].

MSG-Methode Mit der MSG-Methode werden Häuser virtuell in einzelne Bauelemente zerlegt. Ein Bauelement ist zum Beispiel eine Wand. Das Bauelement wiederum ist aus einzelnen Baumaterialien aufgebaut, die Wand aus Beton, Wärmedämmung und Verputz. Die jeweiligen Baumaterialien sind aus Stoffen zusammengesetzt, der Beton aus Kies, Zement und Wasser.

So werden aus 10–20 Stoffen mehrere Hundert Baumaterialien zusammengesetzt, die wiederum zu 23 Bauelementen verbunden werden. Aus diesen Bauelementen wird dann das Haus aufgebaut.

Für jede Periode des letzten Jahrhunderts werden typische Bauweisen identifiziert und die Zusammensetzung dieser Gebäude angenommen. Dabei werden vier verschiedene Nutzungsarten unterschieden: Einfamilienhäuser (EFH), Mehrfamilienhäuser (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG). Eine weitere Schätzung erfolgt in der Annahme über die Verteilung dieser Typen in der jeweiligen Periode.

So kann die stoffliche Zusammensetzung des Gebäudeparkes Schweiz abgeschätzt werden.

Abschätzung RC-Beton-Potential Für unsere Abschätzung konnten wir nun alle Gebäude aus der Periode 1976-2000 aus der Datenbank herausziehen, ihre Zusammensetzung anschauen und alle Bauelemente, die Beton enthalten, auf ihr Potential für RC-Beton untersuchen. Die Periode 1976-2000 wurde gewählt, weil sie die Zusammensetzung der heutigen Gebäude am besten abbildet. Mit den Kriterien aus der Studie der EMPA [2] wurden die betonhaltigen Teile in RC-Beton tauglich oder nicht-tauglich unterschieden. Die Tabelle 3 zeigt das Resultat für die Einfamilienhäuser (EFH). In der Tabelle 4 sind die Resultate für alle Gebäude der Periode 1976-2000 Periode zusammengefasst. Wir sehen, dass rund 90 % des Betons als RC-Mischabbruch-Beton ausgeführt werden könnte; wenn man sicherheitshalber grosszügig abrundet bleiben immer noch 80 %, bzw. 8-10 mio. Tonnen/Jahr, welche im Hochbau als Recyclingbeton verbaut werden können.

Die detaillierte Berechnung ist ausführlich in der Tabelle 6 auf Seite 27 im Anhang dargestellt.

Man sollte sich bei der Darstellung in den Tabellen 3 und 4 von der Genauigkeit der Werte nicht täuschen lassen, sie wurden so aus der Datenbank übernommen. Aber der Inhalt der Datenbank

Tabelle 3: Berechnung des Recyclingbeton-Potentials für Einfamilienhäuser (EFH) nach der MSG-Methode. Die Berechnung berücksichtigt die verschiedenen typischen Baukonstruktionstypen (BKtyp) aus der Periode 1976-2000.

Das Gebäudevolumen beträgt gemittelt je 875 m^3 . RC-Beton = Recyclingbeton.

Bauweise 'BKtyp'	RC- Beton [Tonnen]	Total Beton [Tonnen]	RC/ Total [t/t]	Anteil 'BKtyp' [%]
Beton, Backsteinmauerwerk hinterlüftet	319	370	86%	12%
Beton, Backsteinmauerwerk	277	295	94%	12%
Beton, Holzständerkonstruktion	176	198	89%	3%
Beton, Holzblockbaukonstruktion	176	198	89%	3%
Kalksandstein, Beton, Holzblockbaukonstruktion	129	150	86%	5%
Beton, BK-Zweischalenmauerwerk verputzt	278	295	94%	12%
Beton, Klinker Zweischalenmauerwerk verputzt	278	295	94%	30%
Beton, Kalksandsichtmauerwerk	293	295	99%	12%
Beton, Backsteinmauerwerk hinterlüftet	174	186	94%	12%
gemittelt			93%	

selber stützt sich auf viele Annahmen und Vermutungen, so dass diese Zahlen Grössenordnungen angeben können, aber keine exakten Werte.

Tabelle 4: Berechnung der gewichteten Verteilung von RC-Beton-Potential für die verschiedenen Nutzungsarten der Gebäude in der Schweiz nach der MSG-Methode. Als Annahme dient die Schätzung von Wüest & Partner, dass jährlich rund $40'000 \text{ m}^3$ neu gebaut wird [6]. Dabei wird angenommen, dass die EFH, DLG und PRG je zu 20 %, MFH zu 40 % vertreten sind.

RC-B = Recycling-Beton, Dichte von Beton: $2'400 \text{ kg/m}^3$.

Typ	Gebäude Volumen [m^3]	Masse RC-B [Tonnen]	Total Beton [Tonnen]	RC-B / Total [t/t]	RC-B in Neubau [m^3/Jahr]	RC-B in Neubau [1'000 t/Jahr]
EFH	875	259	279	93%	960'000	2'304
MFH	7'335	1'957	2'106	93%	1'778'320	4'268
DLG	34'289	9'111	10'915	83%	885'709	2'126
PRG	8'426	1'007	1'236	82%	398'511	956
Gewichtete Mittelwerte, bzw. Summen				89%	4'022'539	9'654

4 Dynamische Modellierung der Kiesflüsse

Ein weiterer Schritt führt uns zum Versuch, die Kiesflüsse der Schweiz zu modellieren. Und zwar soll das nicht statisch im Sinne einer Momentaufnahme sein, sondern dynamisch über mehrere Jahre, um Entwicklungen beobachten zu können.

Wir haben uns bei der Modellierung für die Jahre 1990-2040, also 50 Jahre entschieden. Da wir nur Daten der Jahre 1990-2000 für die Kalibrierung des Modelles zur Verfügung haben, heisst das, dass wir mit 10 Jahren Daten 40 weitere Jahre prognostizieren; eine Validierung ist heute auf Grund der schmalen Datengrundlage nicht möglich. Die Resultate sind daher mit Vorsicht und primär im Sinne einer Tendenz zu verstehen.

Um mögliche Entwicklungen darzustellen wurden drei Szenarios ausgearbeitet, die sich in einigen Parametern unterscheiden und zu verschiedenen Resultaten führen.

Kies Das Material „Kies“ wurde gewählt, weil es mit Abstand den grössten Teil des verbauten Materials ausmacht und als Indikator in allen vier Abbruchfraktionen vorkommt. Ein weiterer Grund für die Wahl eines einzigen Materials war die damit gegebene Einfachheit des Modelles. Annahme der Kiesanteile: Beton 80 %, Asphalt 95 %, Mischabbruch 75 %, Kies/Sand 100 %.

Im jetzigen Zustand des Modelles sind also nur die Kiesflüsse abgebildet. Das ist insbesondere bei den Flüssen des Mischabbruches problematisch, da hier noch andere Materialien dazukommen (Mauerwerk). Da aber die Datengrundlage Unsicherheiten von bis zu 100 % hat, fallen die Änderungen, die sich bei einer „korrekten“ Darstellung der Mischabbruch-Flüsse ergeben würden, nicht so gross ins Gewicht.

Ein nächster Schritt könnte aber durchaus vorsehen, weitere Materialien in die Berechnung aufzunehmen, um die jeweiligen Flüsse realistischer abzubilden.

Definition Rest Für das Modell wurden die vier Fraktionen von Recyclingmaterialien in die zwei Gruppen *Mischabbruch (MA)* und *Rest* eingeteilt: Asphalt, Beton, Kies/Sand werden unter der Bezeichnung *Rest* zusammengefasst, die Flüsse von Mischabbruch und werden separat erfasst und mit MA abgekürzt.

Modellaufbau Das Modell ist analog der Figur 6 aufgebaut. Das zugrundeliegende Konzept ist das folgende: Für das Wachstum des Bauwerkes (= Hoch- und Tiefbau) und um den Verlust durch Abbruch zu kompensieren, muss Material in das Bauwerk hinein fließen. Dieses Material kann zu einem gewissen, bzw. maximalen Anteil aus Recyclingmaterial bestehen (= Bedarf an Recycling-Material), es muss aber einen minimalen Anteil von Primärmaterial enthalten.

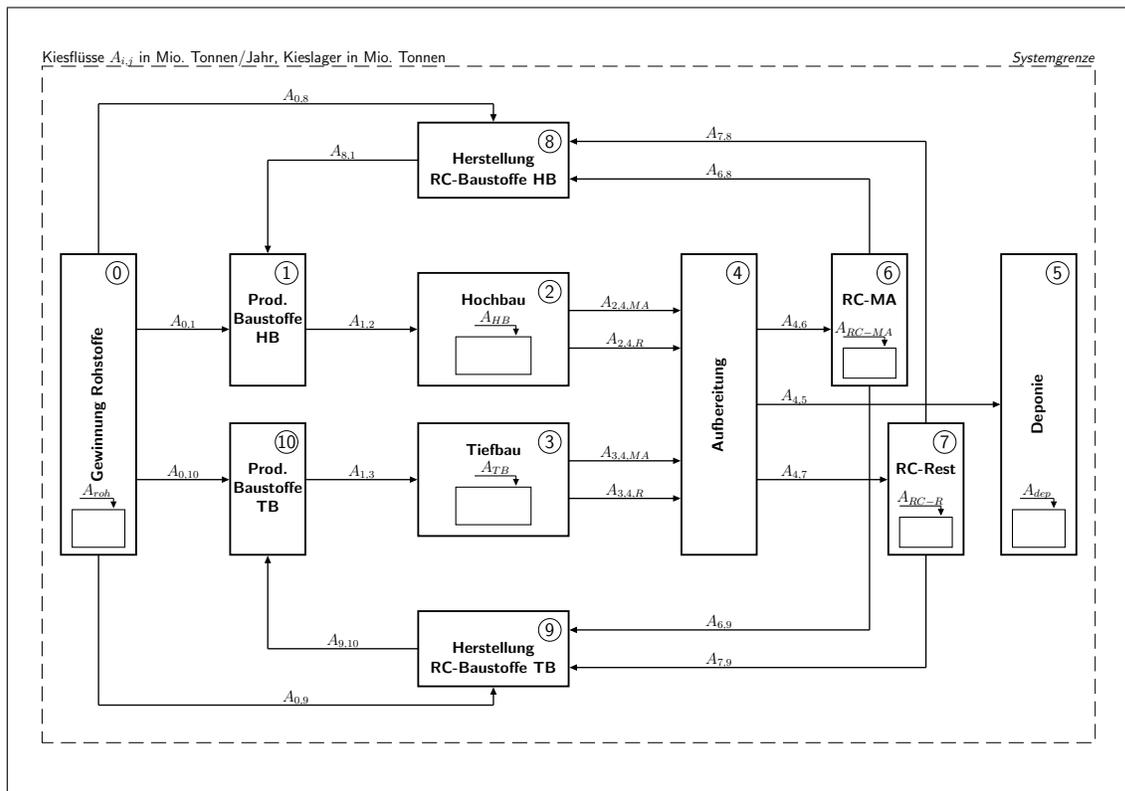


Figure 6: Für die Modellierung wurde das System der Materialflüsse (Figure 2) etwas abgewandelt. MA = Mischabbruch, Rest = Asphalt + Beton + Kies/Sand.

Beim Abbruch des Bauwerkes fallen Bauabfälle an, die in der Aufbereitung (Prozess 4) sortiert werden: Ein Teil wird deponiert (Prozess 5), der Rest aufbereitet. Die aufbereiteten Recyclingmaterialien stehen somit zur Verfügung, um im Bauwerk erneut verbaut zu werden; sie bilden das aktuelle Angebot an Recyclingmaterial. In den Prozessen RC-MA und RC-Rest (6, 7) werden die aufbereiteten Recyclingprodukte auf Hoch- und Tiefbau verteilt. Wenn die Nachfrage nach RC-Material kleiner ist, als das aktuelle Angebot, dann werden sie hier zwischengelagert.

Ein weiterer Aspekt der berücksichtigt wird, ist die Verteilung der Recyclingprodukte auf Hoch- und Tiefbau. Das geschieht entweder durch eine bestimmte Vorgabe (zB. „höchstens 20 % Mischabbruchgranulat im Recyclingmaterial, das in den Hochbau kommt“) oder aber proportional dem aktuellen Bedarf von Hoch- und Tiefbau.

Wenn das Angebot an Recyclingmaterial kleiner ist als der Bedarf im Bauwerk, wird die Differenz aus Primärmaterial gedeckt.

Das Modell ist im Anhang B.1 ausführlich dargestellt. Die Implementation erfolgte in *MS-excel*.

4.1 Annahmen

Um die Kiesflüsse der Schweiz über 50 Jahre zu modellieren, wurden verschiedene Annahmen getroffen. Als Wachstumskurven wurde jeweils ein logistisches Wachstum angenommen [9].

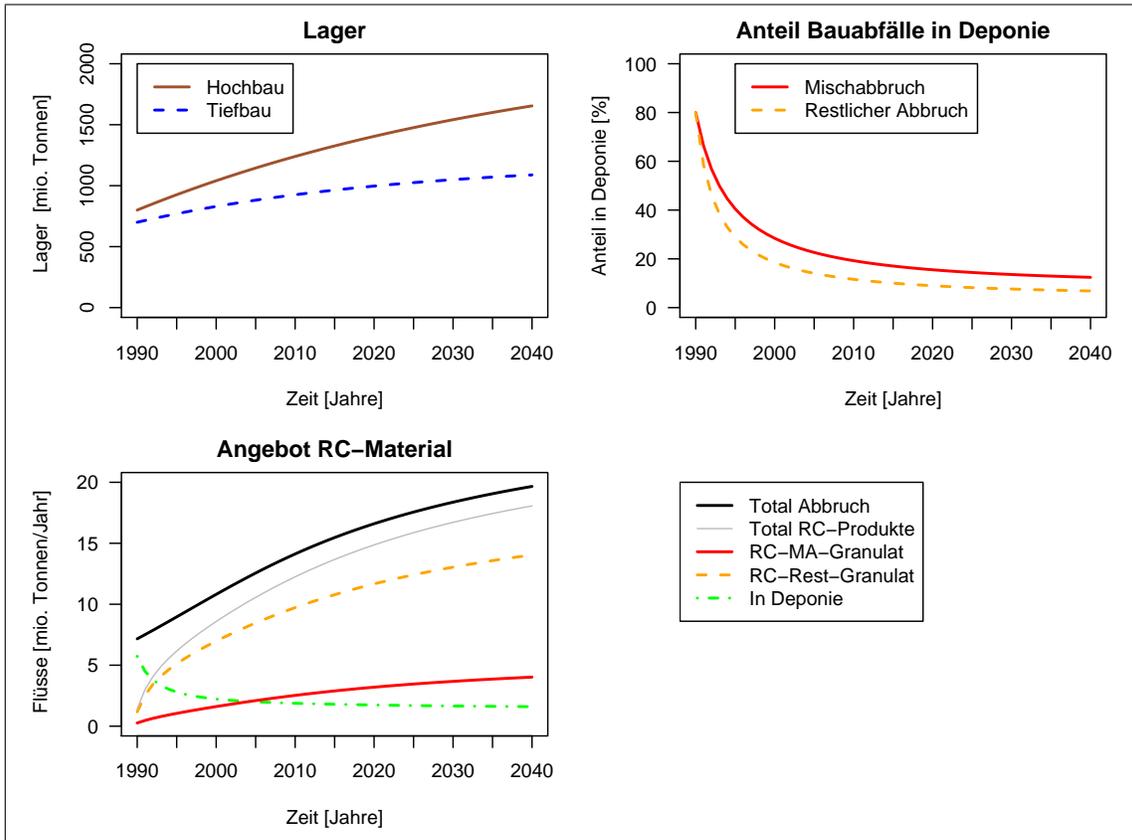
$$\alpha(t) = \alpha_0 \cdot \left(1 + \frac{(1 - \mu) \cdot (1 - e^{-\omega \cdot t})}{\mu - (\mu - 1) \cdot e^{-\omega \cdot t}} \right)$$

mit ω als *Formparameter* und $\mu = \frac{\alpha_0}{\alpha_{max}}$, wobei α_0 der Startwert und α_{max} der Endwert ist.

Dies sind Kurven, deren Zunahme mit der Zeit immer geringer wird, das heisst, sie erreichen ein Plateau.

- Der **Hochbau** wächst von heute 1040 mio. Tonnen auf einen Bestand von 1654 mio. Tonnen im Jahr 2040.
- Der **Tiefbau** wächst wie der Hochbau logistisch von heute 830 auf 1088 mio. Tonnen im Jahr 2040.
- Vom Mischabbruch gelangen 1990 noch 80 % in die **Deponie**. Dieser Anteil verringert sich logistisch auf 10 %.
Vom restlichen Abbruchmaterial gelangen 1990 80 % in die Deponie, dieser Wert sinkt jedoch auf 5 %.
- Anteil von **Mischabbruch aus dem Hochbau**: 30 %, Anteil von **RC-Rest aus dem Hochbau**: 70 %, konstant über die ganze Zeit.
- Anteil von **Mischabbruch aus dem Tiefbau**: 10 %, Anteil von **RC-Rest aus dem Hochbau**: 90 %, konstant über die ganze Zeit.
- Andere Parameter wurden jeweils für die einzelnen Szenarios verändert:
 - Der Anteil von RC-Mischabbruchgranulat, der in den Hochbau gehen kann: Dieser Wert wird von heute 10 % auf maximal 70 % steigen. In den verschiedenen Szenarios wird dieser Wert zwischen 0-70 % verändert.
 - Anteil der restlichen RC-Produkte, der in den Hochbau geht: Heute gelangen nur ca. ¼ aller RC-Produkte in den Hochbau, der Rest wird im TB verbaut. Dieser Anteil kann auf maximal 70 % steigen.
 - Der minimale Input von Primärmaterial in Hochbau und Tiefbau beträgt 20-40 %.
 - Der Anteil von RC-Mischabbruchgranulat bei den RC-Baustoffen im Hoch- und Tiefbau kann 0-80 % betragen.

Die Figur 7 zeigt den Verlauf des Wachstums von Hoch- und Tiefbau, den Anteil der Bauabfälle, die deponiert werden und die produzierten Recycling-Baustoffe. Die Koeffizienten für den Verlauf der Wachstumskurven von Hoch- und Tiefbau wurden geschätzt (siehe unten).



Figur 7: Die von uns getroffenen Annahmen für die Modellierung: Wachstum der Lager von Hoch- und Tiefbau, der Anteil des Abbruchmaterials, der in die Deponie geht und das daraus entstehende Angebot an Recycling-Materialien. Diese Annahmen bleiben für alle drei Szenarios identisch. RC = Recycling, MA = Mischabbruch, Rest = Asphalt, Kies/Sand und Beton.

Paramterschätzung Mit der Funktion „solver“ in *excel* wurden diejenigen Parameter und Koeffizienten geschätzt, die wir nicht selber bestimmen konnten. Als Zielgrösse wurde folgendes berechnet: Die Differenz zwischen den bekannten Daten des Kiesverbrauches (Primärkies) und des modellierten Flusses wurde quadriert und anschliessend wurde die Summe dieser Quadrate über die Jahre 1990-2000 genommen. Diese Summe sollte unter Einhaltung von verschiedenen Nebenbedingungen minimal werden (Methode der kleinsten Quadrate).

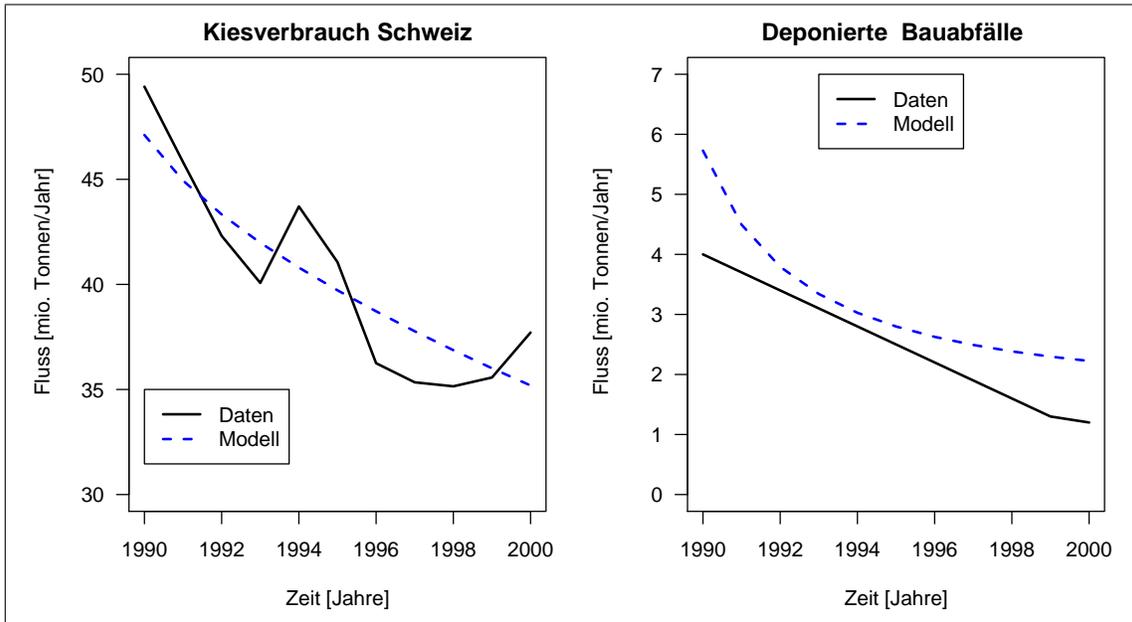
Die Figur 8 zeigt die bekannten Daten und den modellierten Primärkies-Input der Jahre 1990-2000. Die minimierte Summe der quadrierten Abweichung beträgt in diesem Fall rund 42.6 (mio. Tonnen)², das sind 6.5 mio. Tonnen in den 10 Jahren, das heisst im mittel 0.65 mio. Tonnen Abweichung pro Jahr. Wir akzeptierten diesen Fehler als klein genug und übernahmen die von der Funktion vorgeschlagenen Werte; sie sind in der Tabelle 7 im Anhang aufgeführt.

Weiter wurde darauf geachtet, dass der Fluss in die Deponie realistisch abgebildet wird. Der Vergleich des Modelles mit den Daten von S. Rubli aus [8] ist ebenfalls in dieser Figur abgebildet. Als „richtige Grössenordnung“ wurde auch dieser Modellfluss von uns als vernünftig akzeptiert.

Eine Sensitivitätsanalyse wurde nicht systematisch durchgeführt. Im Anhang ist eine exemplarische Berechnung für eine Parameteränderung von 1 % dargestellt (B.3).

4.2 Drei Szenarios

Um mögliche Entwicklungen darzustellen, veränderten wir bei dem Modell verschiedene Parameter, um drei mögliche Szenarios darzustellen. Sie sollen eine optimalen, eine „reale“ und eine katastrophale Entwicklung darstellen.



Figur 8: Mit dem gewählten Satz Parameter können die Daten für den Kiesverbrauch der Schweiz während den Jahren 1990-2000 recht gut abgebildet werden.

Auch der Fluss in die Deponie stimmt bei Modell und den realen Daten erfreulich gut überein.

Die getroffenen Annahmen über das Wachstum des Bauwerkes und die Deponierung der Abfälle blieben dabei für alle drei Szenarios identisch. Einzig die Parameter über die Verteilung von Recyclingprodukten in Hoch- und Tiefbau sowie den Anteil von Recyclingprodukten im Bauwerk wurden verändert. Die Tabelle 5 zeigt die konkreten Werte dieser Parameter für die einzelnen Szenarios.

Szenario 1: Optimal In diesem Szenario stellen wir eine optimale Entwicklung dar: Innert kurzer Zeit wird im Hochbau für Konstruktionsbeton rund 70 % Recycling-Beton eingesetzt. Diese Zahl entspricht dem theoretisch möglichen Bedarf im Hochbau.

Der Mindestanteil von Primärkies im Beton beträgt 20 %.

Szenario 2: Real Hier gehen wir davon aus, dass der Anteil von Recyclingbeton aus Mischabbruch im Hochbau von 10 % 1990 auf höchstens 25 % steigen wird, der Anteil von Recyclingbeton aus RC-Kies/Sand und RC-Betongranulat (=RC-Rest) steigt von 10 auf 50 %.

Auch hier beträgt der Mindestanteil von Primärkies im Beton 20 %.

Szenario 3: Katastrophal Wenn sich der Anteil von Recyclingbeton im Hochbau nicht erhöht, sondern auf dem Stand von 2000 bleibt, dann wird sich das katastrophal auswirken: Im Hochbau wird nur 25 % Recyclingbeton aus RC-Kies/Sand und RC-Betongranulat (= RC-Rest) verbaut, Recyclingbeton aus Mischabbruch gelangt keiner in den Hochbau.

Zusätzlich beträgt in diesem Szenario der minimale Anteil von Primärkies im Beton mindestens 40 %, was die Aufnahmekapazität von Recyclingbeton im Tiefbau verkleinert.

Verteilungskoeffizienten der RC-Produkte Die Figur 9 zeigt die von uns für die drei Szenarios gewählten Verteilungskoeffizienten $k_{MA,HB}$ und $k_{R,HB}$. Sie geben jeweils an, wie gross der maximale Anteil vom Angebot der RC-Produkte (RC-Mischabbruchgranulat und RC-Rest) ist, der in den Hochbau gehen kann.

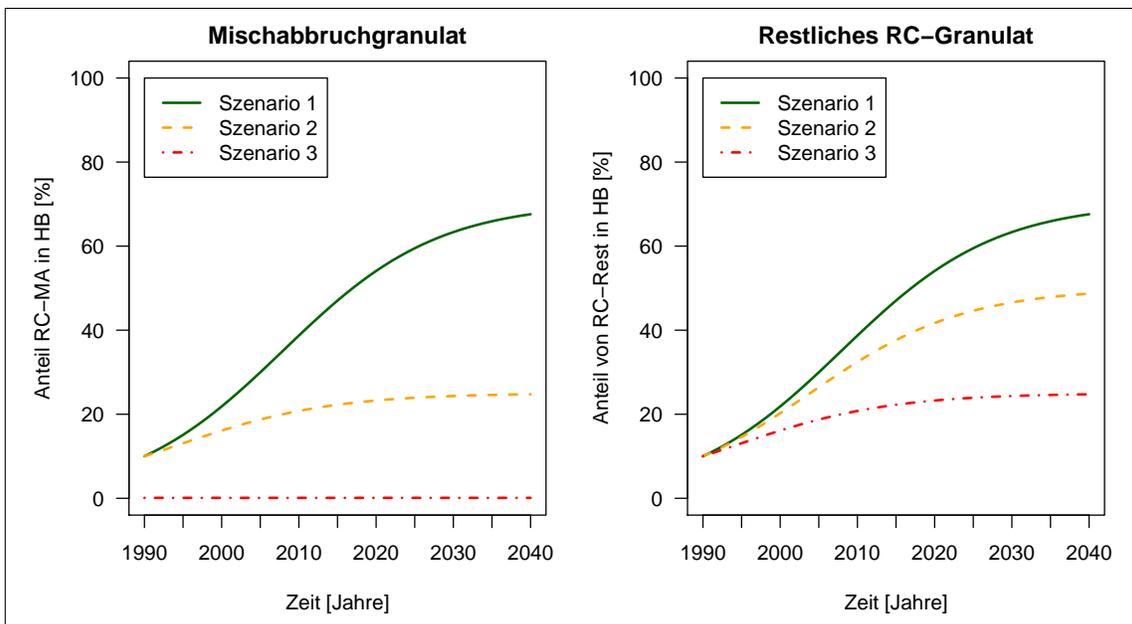
Im Szenario 1 steigen beide Werte auf rund 70 %; es ist dies ja auch das „optimale“ Szenario. Diese 70 % entsprechen dem maximalen Bedarf des Hochbaus, da der Tiefbau insgesamt das kleinere Lager bei kleinerem Wachstum hat.

Tabelle 5: Die Parameter, welche bei den drei Szenarios verändert wurden in %. RC-MA = Mischabbruch, RC-Rest = Beton, Kies/Sand

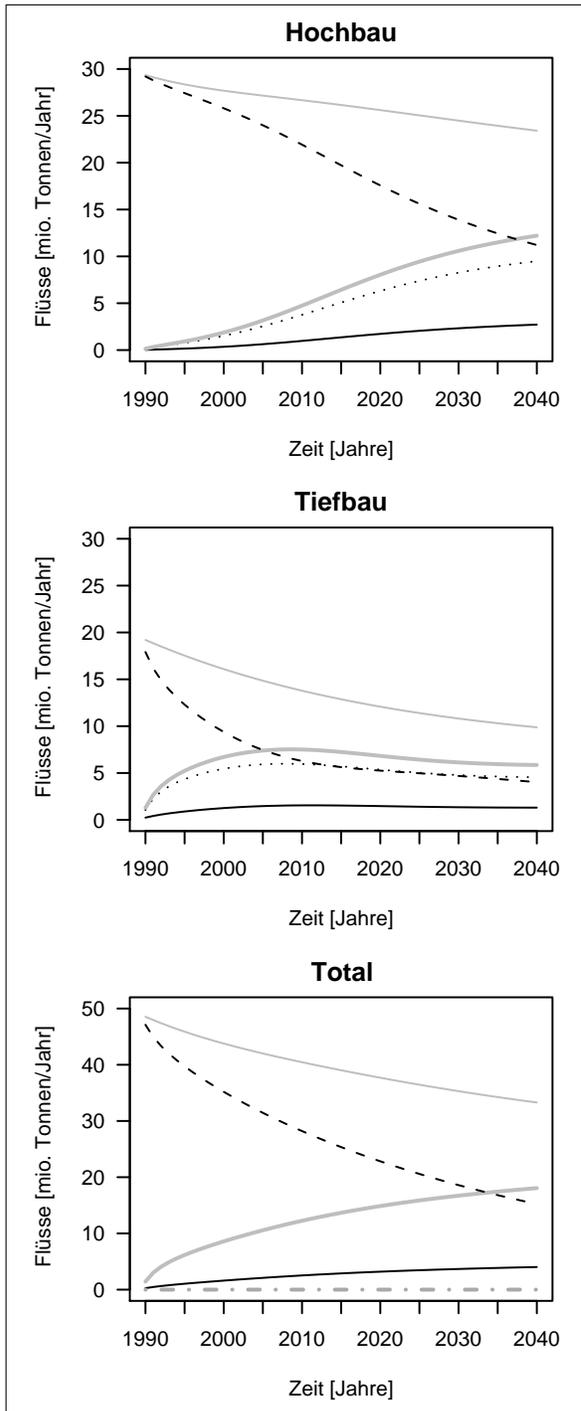
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	<i>optimal</i>	<i>real</i>	<i>katastrophal</i>
	[%]	[%]	[%]
Anteil RC-MA der in HB geht			
1990	10	10	0
maximal	70	25	0
Anteil RC-Rest, der in HB geht			
1990	10	10	10
maximal	70	50	25
Min. Anteil Primärmaterial in Hoch- und Tiefbau			
	20	20	40

Das Szenario 2 sieht für das RC-Mischabbruchgranulat im Hochbau nur einen Anteil von 25 %, vom restlichen RC-Material einen solchen von 50 % vor. So könnte sich die Verteilung effektiv entwickeln.

Im Szenario 3 hingegen geht kein Mischabbruchmaterial in den Hochbau und vom RC-Rest nur rund ein Viertel. Das entspricht in etwa der heutigen Situation.



Figur 9: Die Verteilungskoeffizienten (Anteile der RC-Produkte, die in den Hochbau gelangen) der Recyclingprodukte für die drei Szenarios: Nur bei dem Szenario 1 steigt der Anteil so hoch, wie der Bedarf im Hochbau maximal möglich ist, in den zwei anderen Szenarios wird im Hochbau weniger RC-Material eingesetzt. Im Modell sind diese Anteile durch die Koeffizienten $k_{MA,HB}$ und $k_{R,HB}$ ausgedrückt.

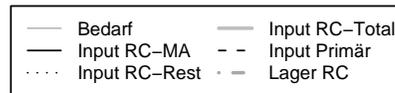


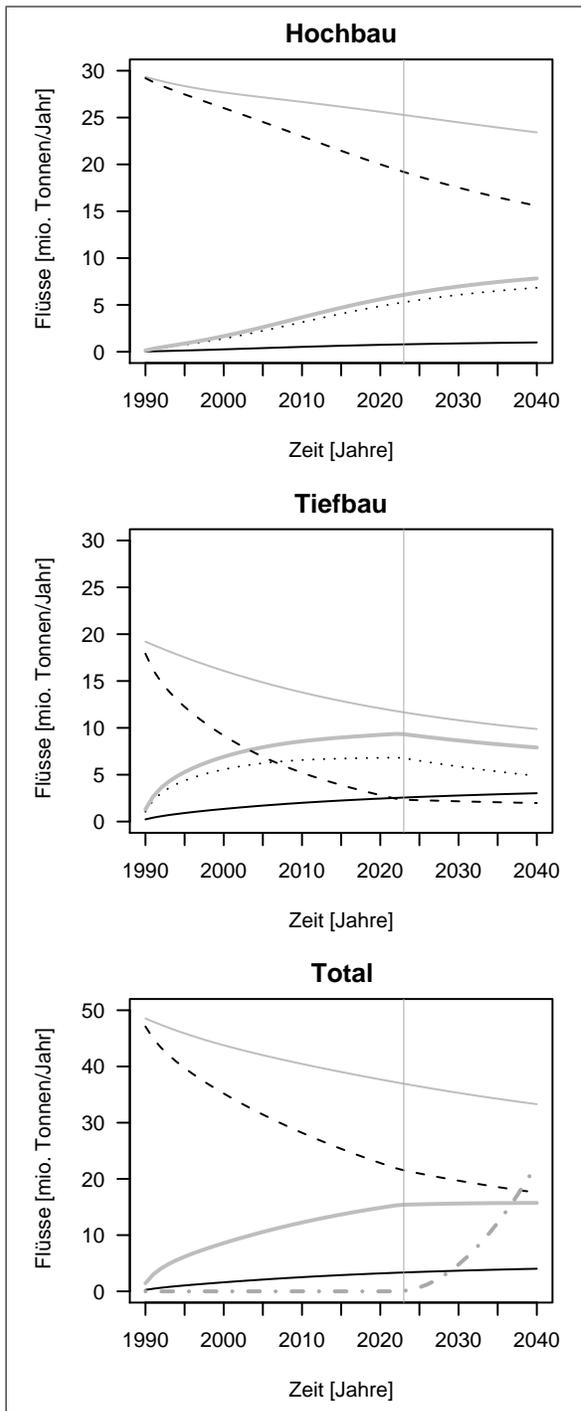
Figur 10: Das Szenario 1, „optimal“. Alle anfallenden Recyclingprodukte können im Bauwerk verbaut werden.

Bedarf: Diese Mengen Baumaterialien müssen jährlich in das Bauwerk fließen. Input Primär: Anteil des Bedarfs, der durch Primärkies gedeckt wird. Input RC-Total: Anteil des Bedarfs, der durch Recyclingmaterial gedeckt werden kann. Dieser Input setzt sich zusammen aus den Flüssen Input-MA (Mischabbruch) und Input-Rest (Restliche RC-Materialien, d.h. Kies/Sand und Beton). Lager RC: Das Lager der aufbereiteten Recycling-Produkte bleibt hier leer, alle RC-Produkte werden im Bauwerk eingesetzt.

Es ist deutlich zu sehen, dass der Anteil von Primärkies laufend abnimmt und die Recyclingprodukte im Hochbau zunehmen. Im Tiefbau nehmen die Recyclingprodukte ab, weil die Nachfrage (= Bedarf) grösser ist als das Angebot. Hier bestehen also immer noch Aufnahmekapazitäten.

Legende





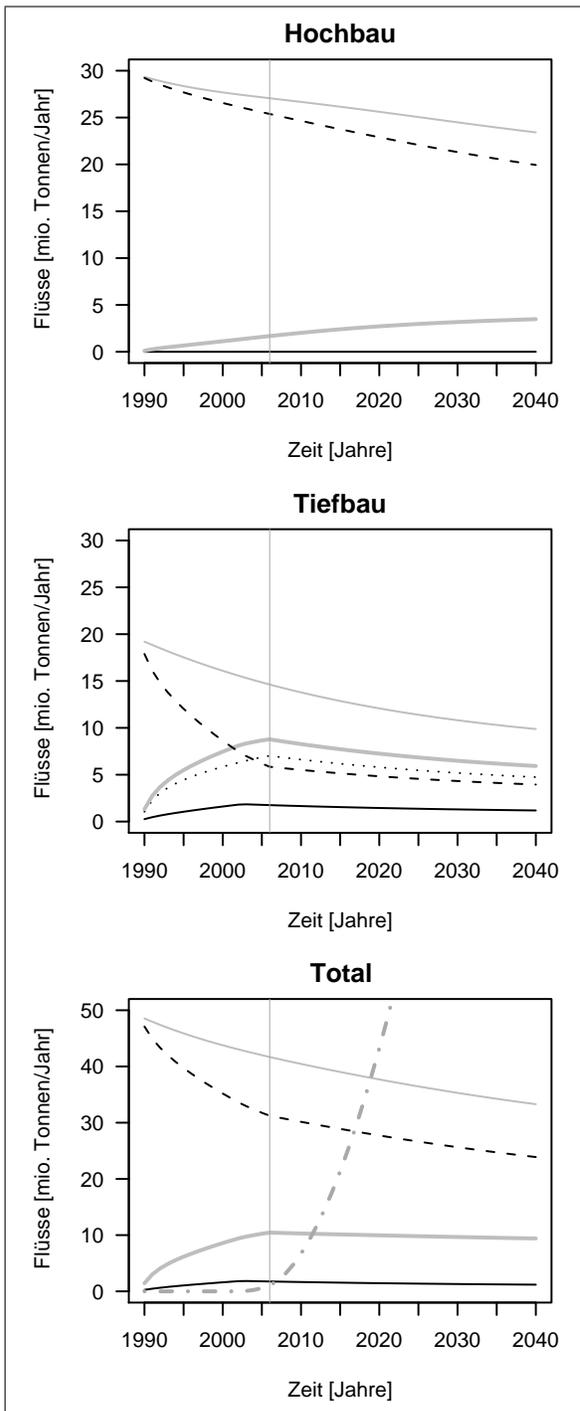
Figur 11: Das Szenario 2, „real“. Bei diesem Szenario wird angenommen, dass vom RC-Mischabbruchgranulat höchstens 25% in den Hochbau gelangt. Von den restlichen Recyclingprodukten (RC-Rest) gehen höchstens 50% in den Hochbau, obwohl der Bedarf grösser ist. Auch hier liegt der Mindestanteil Primärmaterial bei 20% des Inputs in das Bauwerk.

Die Figur zeigt die Resultate der Berechnung. Es dauert bis zum Jahr 2023 (vertikale Linie), bis die anfallenden Recyclingprodukte nicht mehr im Bauwerk verbaut werden können und ein Überschuss entsteht. Vorher verläuft die Entwicklung ähnlich wie im Szenario 1. Bedarf: Diese Mengen Baumaterialien müssen jährlich in das Bauwerk fliessen. Input Primär: Anteil des Bedarfs, der durch Primärkies gedeckt wird. Input RC-Total: Anteil des Bedarfs, der durch Recyclingmaterial gedeckt werden kann. Dieser Input setzt sich zusammen aus den Flüssen Input-MA (Mischabbruch) und Input-Rest (Restliche RC-Materialien, d.h. Kies/Sand und Beton). Lager RC: Das Lager der aufbereiteten Recycling-Produkte bleibt bis ins Jahr 2023 leer, anschliessend füllt es sich mit RC-Produkten, die nicht mehr abgesetzt werden können, d.h. das Angebot an Recyclingprodukten ist ab dem Jahr 2023 grösser als die Menge, die im Bauwerk eingesetzt wird.

Der Anteil von Primärkies nimmt laufend ab, allerdings etwas weniger schnell als im Szenario 1. Die Recyclingprodukte im Hochbau nehmen langsamer zu und insbesondere das RC-Mischabbruchgranulat verbleibt auf tiefem Niveau. Im Tiefbau nehmen die Recyclingprodukte ab dem Jahr 2023 wieder ab, weil deren maximale Aufnahmekapazität (= Bedarf) erreicht ist.

Legende

—	Bedarf	—	Input RC-Total
—	Input RC-MA	- - -	Input Primär
· · ·	Input RC-Rest	- · -	Lager RC

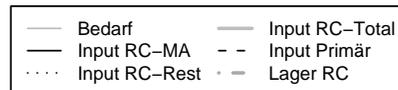


Figur 12: Das Szenario 3, „katastrophal“. Das Motto dieses Szenarios lautet „Kein RC-Mischabbruch in den Hochbau“. Der Anteil der restlichen Recyclingprodukte, die in den Hochbau gelangen, wurde hier auf maximal 25 % beschränkt. Dies ist ungefähr der Wert, wie er für 2005 geschätzt wird. Zusätzlich muss der Input in das Bauwerk mindestens 40 % Primärmaterial enthalten.

Wir sehen, dass schon ab dem Jahr 2006 (vertikale Linie) ein Überschuss an Recyclingprodukten anfallen wird, der entweder deponiert wird oder die Lager der Produzenten füllt. Es ist davon auszugehen, dass die Preise für Recyclingprodukte bei diesem Szenario auf Grund der Überkapazität des Angebotes zusammenbrechen werden.

Bedarf: Diese Mengen Baumaterialien müssen jährlich in das Bauwerk fließen. **Input Primär:** Anteil des Bedarfs, der durch Primärkies gedeckt wird. **Input RC-Total:** Anteil des Bedarfs, der durch Recyclingmaterial gedeckt werden kann. Dieser Input setzt sich zusammen aus den Flüssen Input-MA (Mischabbruch) und Input-Rest (Restliche RC-Materialien, d.h. Kies/Sand und Beton). **Lager RC:** Der Fluss in das Lager der aufbereiteten Recycling-Produkte wächst ab dem Jahr 2006 rasch an, das Angebot an RC-Produkten ist viel grösser als die Nachfrage.

Legende



4.3 Vergleich der drei Szenarios

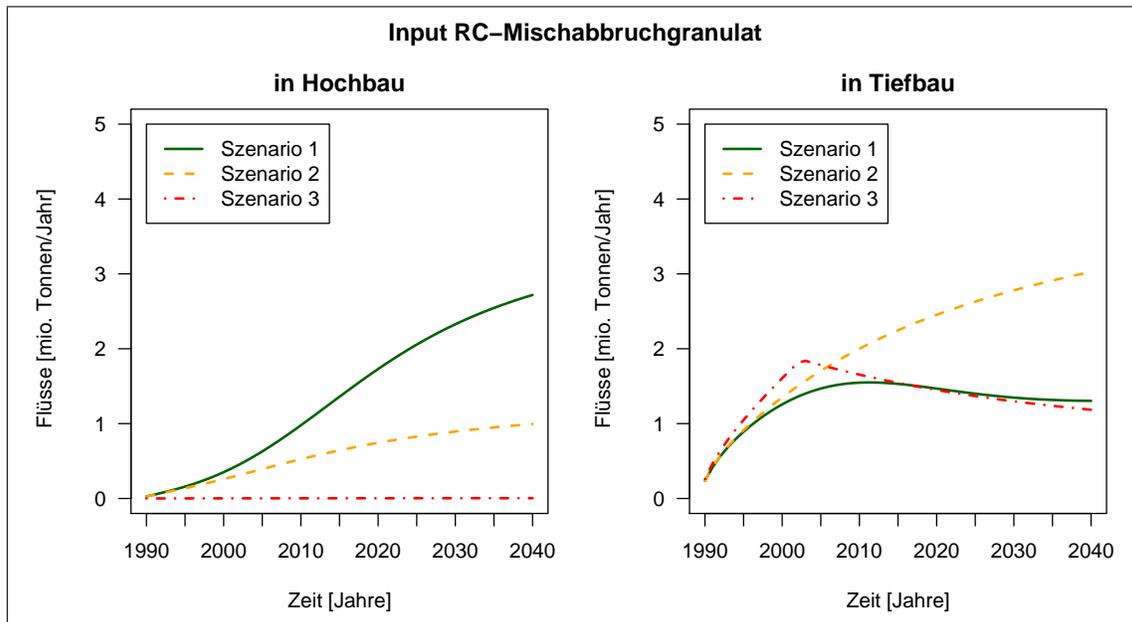
Wir vergleichen nun die Auswirkungen dieser drei Szenarios auf einzelne Stoffflüsse. Es wird deutlich, dass nur ein grösserer Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau Angebotsüberschüsse verhindern kann.

Input RC-Mischabbruchgranulat Wenn wir den Input von RC-Mischabbruchgranulat (RC-MA) in das Bauwerk in der Figur 13 vergleichen, fällt auf, dass die Kurven für den Hochbau und den Tiefbau recht verschieden ausfallen. Dies kann folgendermassen erklärt werden:

Im Hochbau folgt der Input recht genau dem Verteilungskoeffizienten $k_{MA,HB}$. Das heisst, dass die Nachfrage im Hochbau in allen drei Szenarios gedeckt werden kann.

Im Tiefbau hingegen sieht das anders aus:

Der Input von RC-MA im Szenario 1 steigt bis ca. 2010 an, dann beginnt er zu sinken, da dann der Hochbau den grössten Teil davon erhält und damit für den Tiefbau weniger davon übrig bleibt.



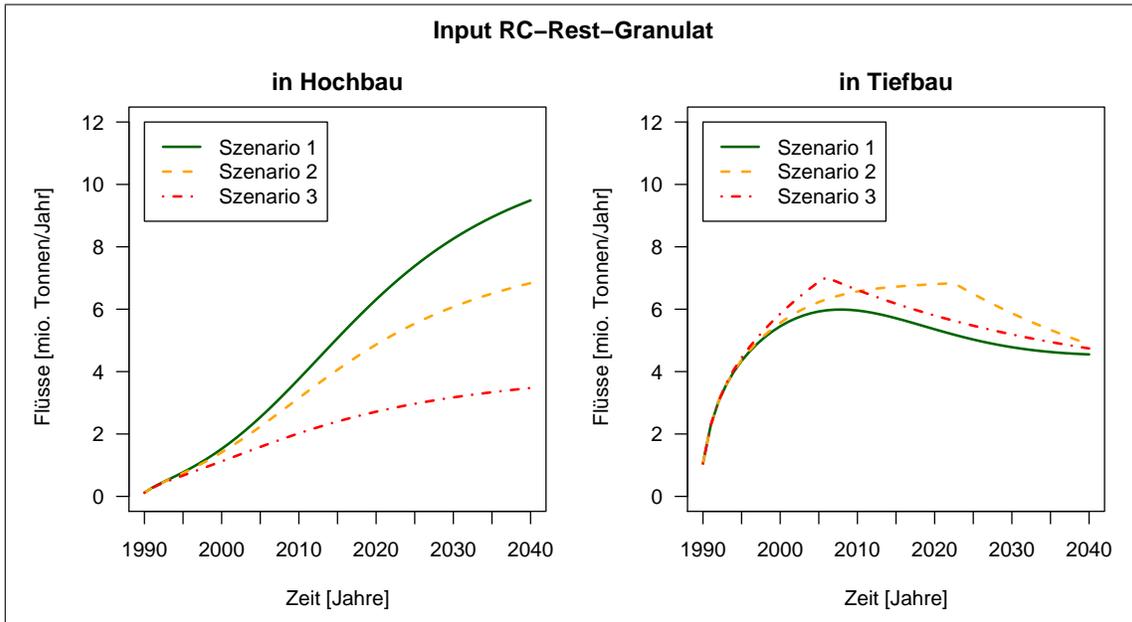
Figur 13: Modell: Vergleich der Inputflüsse von RC-Mischabbruchgranulat in Hoch- und Tiefbau.

Im Szenario 2 steigt der Input kontinuierlich an, da grundsätzlich weniger in den Hochbau gelangt und der ganze Rest im Tiefbau verbaut werden kann.

Das dritte Szenario zeigt einen ähnlichen Input von RC-MA wie das erste, obwohl hier kein RC-MA in den Hochbau kommt. Dies kommt zustande, weil bereits ab dem Jahr 2006 die Kapazität von RC-Material, das im Bauwerk verbaut werden kann, erschöpft ist: In den Hochbau geht kein RC-MA, insgesamt werden immer noch 40 % Primärmaterial verbaut, es entsteht ein Überschuss an RC-Materialien. In diesem Szenario wird also weniger RC-Material verbaut, als zur Verfügung steht, das Angebot ist grösser als die Nachfrage.

Input restliches RC-Material Die Figur 14 zeigt, dass der Input vom restlichen RC-Material (RC-R) in den Hochbau „problemlos“ verbaut wird. Wiederum stossen die Kapazitäten im Tiefbau an Grenzen. Die Ursachen sind aber nicht in allen Szenarios die selben:

Szenario 1: Hier erfolgt die Verteilung analog dem RC-MA, das heisst, dass bereits ab 2010 rund 50 % des RC-Materials in den Hochbau geht. Dadurch kann bis 2008 der Input in den Tiefbau steigen. Anschliessend sinkt er, weil der Bedarf im Tiefbau generell sinkt (vgl. Figur 11) und im Hochbau mehr davon eingesetzt wird.



Figur 14: Modell: Vergleich der Inputflüsse von der restlichen Recyclingprodukte (RC-Rest) in das Bauwerk.

Im Szenario 2 steht für den Tiefbau mehr Material zur Verfügung, da weniger in den Hochbau geht. Das äussert sich darin, dass der Anstieg des Inputs in den Tiefbau länger dauert und der Fluss insgesamt höher steigt. Ab dem Jahr 2025 sind aber die Kapazitäten im Tiefbau erschöpft, der Input sinkt abrupt und damit werden Überkapazitäten von RC-Material gebildet.

Der Verlauf der Inputkurve von RC-Rest im Szenario 3 zeigt das bereits bekannte „katastrophale“ Bild: Ein steiler Anstieg bis 2006 und dann ein gewaltiger Einbruch der verbauten Mengen. Da in diesem Szenario im Hochbau nur 25 % vom RC-R eingesetzt werden, steht Anfangs sehr viel Material für den Tiefbau zur Verfügung. Aber schon bald sind dessen Aufnahmekapazitäten erschöpft. Dies auch deshalb, weil der Input von Primärmaterial hier mindestens 40 % beträgt.

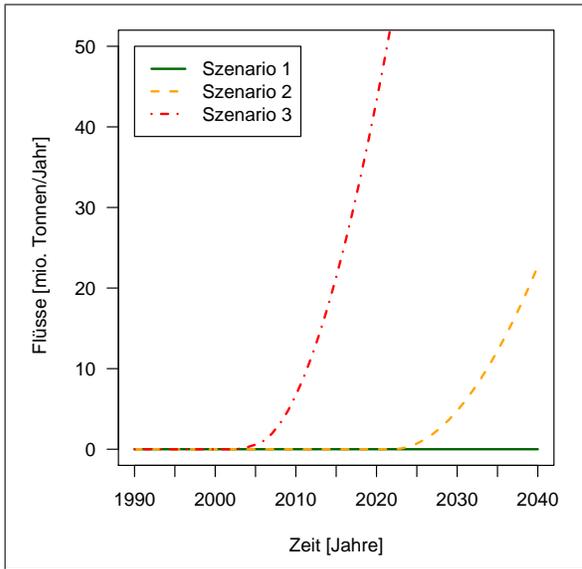
Flüsse in das Zwischenlager Ein Vergleich der Flüsse, die in das Zwischenlager für Recycling-Produkte gehen ist in der Figur 15 dargestellt. Die Bezeichnung „Zwischenlager“ ist optimistisch gewählt, denn wenn einmal Überkapazitäten aufgebaut sind, wird es unmöglich, sie wieder abzubauen: Der Bedarf an Recycling-Material sinkt ständig und das Angebot steigt laufend. Somit müsste wohl eher von Flüssen in die Deponie gesprochen werden!

In dieser Figur ist auch ersichtlich, weshalb das Szenario 3 „katastrophal“ genannt wird: Schon 2006 beginnen die Flüsse in die Zwischenlager zu fließen und sie steigen rapide an.

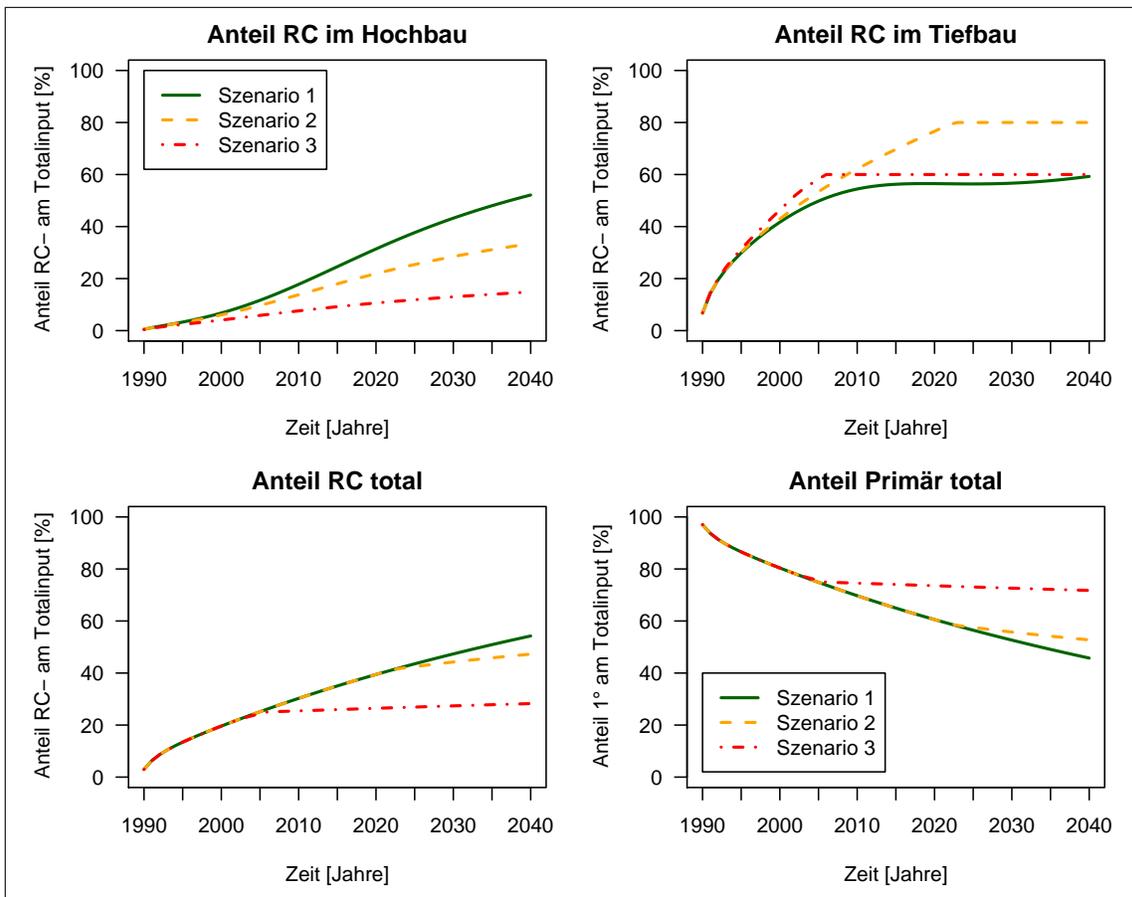
Bis es im Szenario 2 zur Lagerbildung von Recycling-Produkten kommt dauert es noch lange. Einzig im „optimalen“ Szenario 1 entstehen keine Überkapazitäten von Recycling-Produkten.

Verhältnis Recycling-Input zum totalen Input Die drei Szenarios unterscheiden sich auch beim Anteil von Recyclingprodukten, die in das Bauwerk fließen, wie das in der Figur 16 dargestellt ist.

Im Szenario 1 wird der maximal mögliche Input von 80 % RC-Material in Hoch- und Tiefbau auch nach 40 Jahren noch nicht erreicht, das heisst, dass die Nachfrage immer noch grösser ist, als das Angebot. Das ist ersichtlich für den Hochbau: Dort steigt die Kurve kontinuierlich an. Im Tiefbau stagniert der Verlauf der Kurve ab dem Jahr 2012; dies aber nur, weil nicht mehr Material vorhanden ist, welches verbaut werden könnte. Wenn das gesamte Bauwerk verglichen wird, dann steigt auch dort der Anteil von Recyclingprodukten am Gesamtinput bis ins Jahr 2040 an, ohne das Maximum zu erreichen.



Figur 15: Die Stoffflüsse in das Zwischenlager für RC-Produkte. Allerdings wird dieses Zwischenlager nicht mehr abgebaut werden können, es sind damit wohl eher Flüsse in die Deponie. Im Szenario wird kein Zwischenlager gebildet, im Szenario 2 ab 2023 und im Szenario 3 beginnt das Zwischenlager ab dem Jahr 2006 zu wachsen.



Figur 16: Der Anteil von Recycling-Material und von Primärkies am totalen Input in das Bauwerk Schweiz.

Anders ist der Verlauf des Inputs von Recyclingmaterial im Szenario 2: Da hier weniger RC-Produkte in den Hochbau gelangen, stösst die Aufnahmekapazität im Tiefbau ab 2020 an ihre Grenzen und Überschüsse von RC-Produkten fließen in das Zwischenlager.

Bem Szenario 3 ist deutlich zu sehen, dass der maximal mögliche Anteil von RC-Baustoffen schon

2006 erreicht ist und anschliessend die Überschüsse dieser Produkte in die Deponie fliessen werden. Für den Input von Primärkies sieht man, dass in allen Szenarios der Primärkiesverbrauch im Bauwerk Schweiz abnimmt, da sich dessen Wachstum verlangsamt. Diese Abnahme wird insgesamt relativ wenig von den Szenarios, bzw. den Recyclingflüssen beeinflusst. Der Bedarf für das Wachstum ist absolut einfach viel grösser, als die Recycling-Materialien dazu beitragen.

P. Plüss und J. Suter haben diese Frage näher untersucht und kommen zum Schluss, dass bei maximaler Ressourcenschonung im Jahr 2010 höchstens 3.5 % Primärkies durch maximales Recycling eingespart werden könnte [10]. Ihre Prognose widerspricht unserem Modell in keiner Weise.

Allerdings ist der Input von Primärkies im Jahr 2040 bei den drei Szenarios doch recht verschieden: Während in den Szenarios 1 und 2 der Anteil auf rund 50 % gesunken ist, bleibt er beim Szenario 3 auf hohem Niveau bei 75 %.

Anteil vom Recyclingmaterial, der verbaut wird Interessant ist der Vergleich der verbauten Mengen von Recyclingmaterial: Welcher Anteil des Angebotes kann in den Szenarios verbaut werden?

In der Figur 17 sieht man, dass im Szenario 1 auch noch im Jahr 2040 100 % des Angebotes verbaut werden kann.

Im Szenario 2 sieht man den Übergang im Jahr 2020, wo das Angebot grösser wird als die Nachfrage; ab hier werden Recycling-Produkte „auf Halbe produziert“.

Das Katastrophen-Szenario 3 macht seinem Namen auch hier alle Ehre: Die Entwicklung ist katastrophal, der Anteil der verbauten RC-Baustoffe sinkt ständig, da sowohl im Hochbau als auch im Tiefbau die Grenzen der Aufnahmekapazität schon bald erreicht sind.

Eine Bemerkung zu der Grafik „Szen. 2: Total“ in der Mitte ganz rechts (Figur 17): Dass hier der verbaute Anteil des Mischabbruchgranulates auch nach dem Jahr 2020 weiterhin auf 100 % bleibt, ist eine Folge der Implementation des Modelles: Für den Fluss der RC-Produkte wird zuerst der Mischabbruch berücksichtigt, wenn dann noch Kapazität frei ist, kommt RC-Rest dazu, und falls dann der maximal mögliche RC-Input immer noch nicht gedeckt ist, wird er durch Primärkies ergänzt.

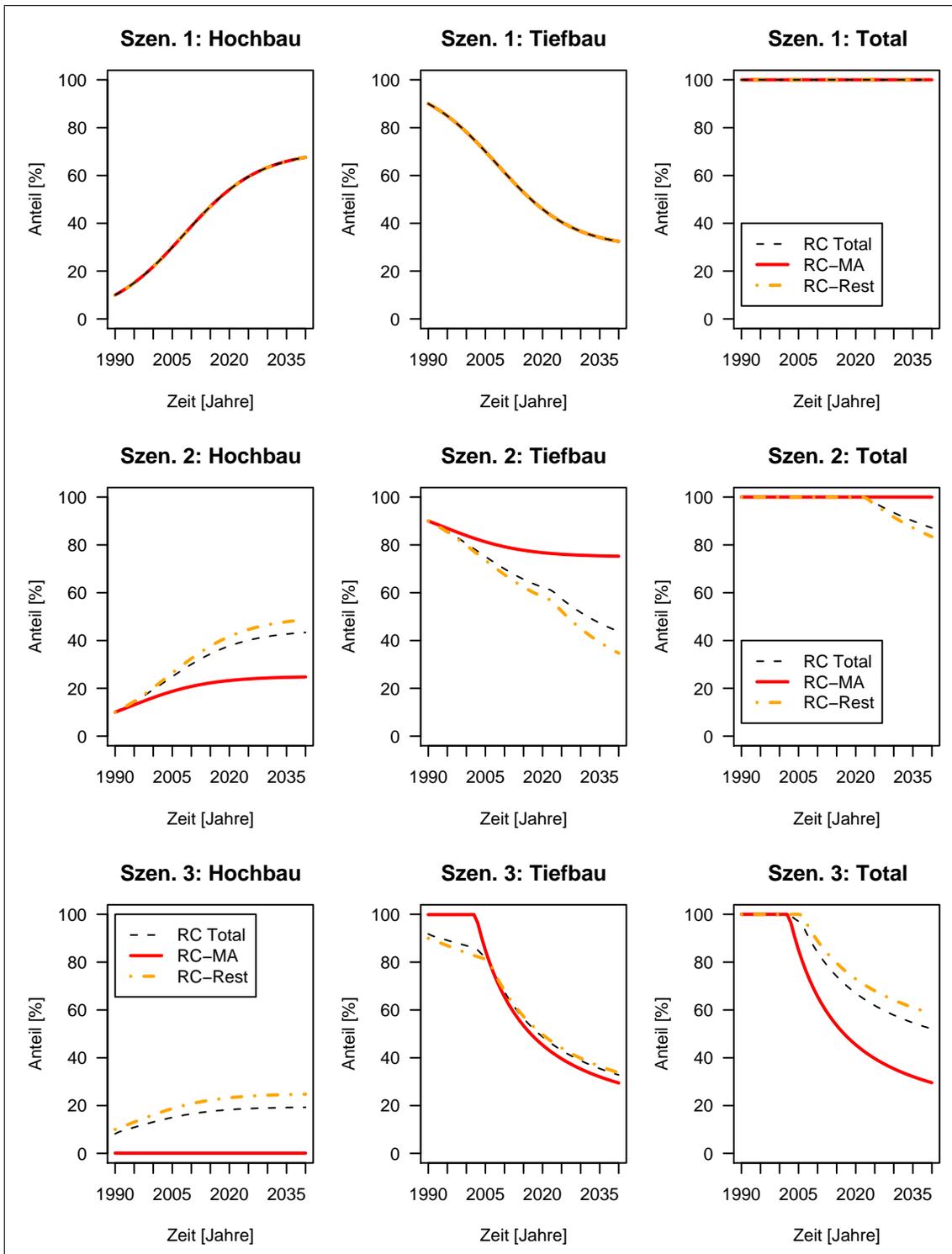
Es sollte hier also nicht darauf geschlossen werden, dass der Mischabbruch sicher verbaut wird und „nur“ RC-Rest-Überschüsse produziert werden.

4.4 Fazit

Die drei Szenarios zeigen deutlich, dass es nur dann möglich ist, alle produzierten Recyclingprodukte im Bauwerk zu verbauen, wenn der Anteil von Recycling-Konstruktionsbeton im Hochbau massiv erhöht wird. Und zwar muss dazu auch der aufbereitete Mischabbruch im Hochbau eingesetzt werden.

Damit werden vier wichtige Entwicklungen in eine sinnvolle Richtung gesteuert:

- Die produzierten Recyclingbaustoffe können vollständig abgesetzt werden, die Nachfrage bleibt grösser als das Angebot.
- Durch den erhöhten Einsatz von Recyclingmaterial in das Bauwerk Schweiz werden die natürlichen Kiesreserven geschont.
- Wenn mehr Recyclingbaustoffe genutzt werden, dann wird auch weniger Material deponiert; Material, das zum grossen Teil wertvoll ist und im Kreislauf der Baustoffe verbleiben sollte.
- Durch die Herstellung von Recyclingbeton aus Mischabbruch findet echtes Recycling statt: Dieser RC-Beton ist beim erneuten Rückbau Betonabbruch oder Mischabbruch und kann damit im Kreislauf der Baustoffe bleiben.



Figur 17: Anteil des Angebotes der Recyclingprodukte, der verbaut wird.

5 Ausblick

Die in der Einleitung genannten Fragen konnten in dieser Arbeit zum grossen Teil beantwortet werden:

- Ein System „Mineralische Baustoffe in der Schweiz“ konnte identifiziert werden.
- Das Potential für Recyclingbeton im Hochbau wurde mit Hilfe von Resultaten aus der Forschung und einer bestehenden Datenbank grob abgeschätzt: Rund 80 % des Konstruktionsbetons im Hochbau könnte durch Recyclingbeton aus Mischabbruch ausgeführt werden.
- Mit der dynamischen Modellierung ist es möglich, den Input von Primärkies der Jahre 1990-2000 abzubilden. Mit drei Szenarios des Kieshaushaltes der Schweiz können mögliche Entwicklungen der nächsten 40 Jahre modelliert werden. Damit ist es möglich, Aussagen über eventuelle Produktionsüberschüsse von Recyclingprodukten zu machen.

Viele andere Aspekte konnten aber nicht behandelt und untersucht werden. So fehlt zum Beispiel eine Betrachtung über mögliche alternative Produkte, welche aus Mischabbruch hergestellt werden könnten.

Ökonomische Fragen wurden gar nicht behandelt, ebensowenig, ob der Einsatz von Recyclingbaustoffen im Bauwerk Vorteile für die Umwelt hat: Immerhin erfordert Recyclingbeton aus Mischabbruch einen erhöhten Zementgehalt und allenfalls Zusatzmittel.

Auch muss die Tauglichkeit von Recyclingbeton aus Mischabbruch für Konstruktionsbeton weiter untersucht werden, um dessen Einsatzpotential genauer zu berechnen.

Weiter ist zu beachten, dass auch die Wiederverwertbarkeit von recycelten Baustoffen nicht unendlich ist, sie verlieren von Mal zu Mal an Qualität: Wie lange kann Recyclingbeton recycelt werden?

Es bleiben also viele Fragen offen, die hoffentlich in nächster Zeit beantwortet werden können; schon im nächsten Semester findet wieder ein Vertiefungsblock für Umweltingenieure zu diesem Thema statt.

Literatur

- [1] Pedraza A. 2004. *Die MSG-Methode. Material, Stoff und Gebäude- Methode*. EAWAG. Dübendorf.
- [2] EMPA. 2004. *Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch*. Bericht Nr. 203600. EMPA Dübendorf.
- [3] BUWAL, 1997. *Abfall, Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [4] VSS, 1998. *SN 670 144: Recycling; Mischabbruch*. Schweizer Norm. Vereinigung Schweizer Strassenfachleute (VSS), Zürich
- [5] Dürrenmatt, P. 2003. *Betonrecycling, Bewirtschaftung von Recyclingbeton in der Schweiz Anhand von Szenarien*. Diplomarbeit, Abt. S&E, ETH Zürich.
- [6] BUWAL, 2001. *Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege*. Umweltmaterialien Nr. 131 Abfall. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [7] Hügi M., Kettler R. 2004: *Abfallstatistik 2002. Mit Daten der KVA-Planung 2003*. Umwelt-Materialien Nr. 186. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [8] Rubli S., Jungbluth N. 2005. *Materialflussrechnung für die Schweiz*. Herausgeber: Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel.
- [9] P. Baccini, H.-P. Bader. 1996. *Regionaler Stoffhaushalt*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg.
- [10] Plüss P., Sutter J. 2004 *Bauabfall-Szenarien* in tec21, 10/2004. S. 11-13.
- [11] Amt für Hochbauten der Stadt Zürich. 1999. *Recyclingprodukte. Anbieter-/Entsorger- Informationsstellen*. 8021 Zürich.
- [12] Eine Liste mit Links im [www](#) ist unten aufgeführt.

www.agz.ch	AG Ziegelwerke Horw-Gettnau-Muri Holding
www.arv.ch	Schweizerischer Verband für das Aushub-, Rückbau- und Recyclingwesen
www.barag.ch	BARAG Baustoff-Recycling AG, Wiederverwertung von inerten Baustoffen
www.b-i-m.de	Baustoffkreislauf im Massivbau (Forschungsvorhaben) Bauwerksabbrüche vollständig in den Stoffkreislauf bringen.
www.domoterra.ch	Verband schweizerischer Ziegelindustrie (VSZ)
www.eberhard.ch	Tiefbau, Altlastensanierung, RC-Produzent
www.fh-weihenstephan.de/... www.fh-weihenstephan.de/la/06_skripten/bauko/bauko1/bt/bt_startseite.html	Skripten und Materialien zu Lehrveranstaltungen (Beton)
www.fskb.ch	Fachverband der schweizerischen Kies- und Betonindustrie
www.holcim.ch	Zementproduzent
www.liapor.ch	Blähtonproduzent
www.loetscher-kiesbeton.ch	Qualitätsbeton und Kies aus dem Seetal
www.richi-weiningen.ch	Tiefbau, Rückbau, RC-Produzent
www.risi-ag.ch	Tief- und Spezialtiefbau, Kies/Beton
www.uni-weimar.de/... www.uni-weimar.de/aufber/index.html	Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, Uni Weimar, Skripte
www3.stzh.ch/internet/... www3.stzh.ch/internet/hbd/home/beraten/fachstellen/ingenieurwesen.html	Hochbaudepartement der Stadt Zürich, Ingenieurwesen

Anhang

A Berechnungen mit der MSG-Methode

Tabelle 6: Berechnung des Recyclingbeton-Potentials mit der MSG-Methode, alle Gebäude.

BE Name	BT Beschr.	Beton (m)	BE (m ²)	α BT (kg/m ²)	BE (kg)	ρ^1 (kg/m ³)	Beton (m ³)	Beton² (kg)
Nr. 2, EFH, 1998, 959 m³, Beton, Backsteinmauerwerk hinterlüftet								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Aussenwand tragend	Beton 22 cm mit hinterlüftete Holzverkleidung und Sichtbeton innen, d= 43.5 cm	0.22	77	588	45'146	47	17	40'510
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	179	616	110'253	115	39	94'509
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Decke	Betondecke 22 cm mit 14 cm WD, d= 36 cm	0.22	87	541	47'330	49	19	46'170
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	24	613	14'995	16	4	10'575
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.22	17	531	9'008	9	4	8'950
							133	318'399
Nr. 4, MFH, 2000, 7335 m³, Beton, Backsteinmauerwerk verputzt								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	939	674	633'230	86	188	450'669
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 20 cm mit 6 cm WD, innen verputzt, d= 29 cm	0.20	219	575	126'046	17	44	105'198
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 20 cm gegen Erdreich, innen verputzt, d= 23 cm	0.20	64	548	35'278	5	13	30'912
Sockelwand	Betonkellerwand 40 cm mit 6 cm WD, verputzt, d= 49 cm	0.40	33	1'033	34'513	5	13	32'060
Fortsetzung auf der nächsten Seite								

BE Name	BT Beschr.	Beton (m)	BE (m ²)	α BT (kg/m ²)	BE (kg)	ρ^1 (kg/m ³)	Beton (m ³)	Beton ² (kg)
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 25 cm mit 8 cm WD, gegen Erdreich, d= 33 cm	0.25	18	607	11'171	2	5	11'038
Aussenwand tragend	Betonaussenwand 15 cm mit 10 cm WD, d= 25 cm	0.15	21	367	7'601	1	3	7'465
Flachdach	Betonflachdach 16 cm, 10 cm WD, Kupferverkleidung, d= 26 cm	0.16	35	397	13'999	2	6	13'548
Decke	Betondecke 20 cm mit 8 cm WD, Keramikboden, d= 32 cm	0.20	1'292	574	741'544	101	258	620'010
Decke	Betondecke 20 cm mit 8 cm WD, Parkettboden, d= 32 cm	0.20	559	568	317'265	43	112	268'282
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	124	613	75'771	10	22	53'439
Aussendecke	Betonaussendecke 30 cm mit 5 cm dicken Zementsteine, d= 38.5 cm	0.30	186	895	166'516	23	56	133'895
Aussendecke	Betonaussendecke 25 cm, mit Zementestrich, d= 28.5 cm	0.25	246	681	167'390	23	61	147'581
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonbrüstung 20 cm, roh	0.20	57	483	27'395	4	11	27'216
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonbrüstung 12 cm, roh	0.12	63	290	18'247	2	8	18'128
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	39	725	27'988	4	12	27'806
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 15 cm	0.15	26	362	9'498	1	4	9'436
							815	1'956'681

Nr. 5, DLG, 2000, 34'289 m³, Beton, Glas

Fundament	Betonfundament 55 cm, armiert, d= 60 cm	0.55	1'400	1'457	2'039'492	59	770	1'848'000
Sockelwand	Betonkellerwand 40 cm mit 6 cm WD, verputzt, d= 49 cm	0.40	962	1'033	994'227	29	385	923'558
Aussenwand nicht tragend	Betonaussenwand 12 cm mit hinterlüftete 10 mm Glasscheibe, nicht tragend	0.12	2'530	339	857'423	25	304	728'548
Flachdach	Betonflachdach 24 cm, mit Zementsteinen, d= 47 cm	0.24	1'688	748	1'262'505	37	405	972'187
Decke	Betondecke 24 cm gegen Erdreich, d= 32.5 cm	0.24	1'383	782	1'081'414	32	332	796'524
Decke	Betondecke 24 cm, d= 27.5 cm	0.24	6'285	656	4'125'029	120	1'508	3'619'886
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 25 cm, armiert	0.25	370	604	223'747	7	93	222'288
Summe RC-Beton							3'796	9'110'992

Fortsetzung auf der nächsten Seite

BE Name	BT Beschr.	Beton (m)	BE (m ²)	α BT (kg/m ²)	BE (kg)	ρ^1 (kg/m ³)	Beton (m ³)	Beton ² (kg)
Nr. 6, PRG, 2003, 8'426 m³, Beton, Metall								
Fundament	Betonfundament 52 cm, armiert, mit Zementestrich, d= 55 cm	0.52	131	1'322	173'162	21	68	163'488
Aussenwand tragend	Betonaussenwand 30 cm, roh	0.30	93	725	67'481	8	28	67'041
Decke	Betondecke 20 cm, roh	0.20	141	483	68'171	8	28	67'726
Decke	Betondecke 25 cm gegen Erdreich, d= 41 cm	0.25	643	933	599'847	71	161	385'649
Decke	Betonverbunddecke (Holorib), roh d=12 cm	0.12	683	278	190'049	23	82	196'600
Decke	Betondecke 25 cm gegen Erdreich, d= 45 cm	0.25	153	935	142'908	17	38	91'714
Decke	Betonverbunddecke (Holorib) 12 cm, 4 cm WD, d= 16 cm	0.12	122	280	34'131	4	15	35'097
							420	1'007'314
21, EFH, 1998, 959 m³, Beton, Backsteinmauerwerk								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	179	616	110'253	115	39	94'509
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Decke	Betondecke 22 cm mit 14 cm WD, d= 36 cm	0.22	87	541	47'330	49	19	46'170
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	24	613	14'995	16	4	10'575
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.20	17	531	9'008	9	3	8'136
							115	277'076
Nr. 22, EFH, 1998, 959 m³, Beton, Holzständerkonstruktion								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230

Fortsetzung auf der nächsten Seite

BE Name	BT Beschr.	Beton (m)	BE (m ²)	α BT (kg/m ²)	BE (kg)	ρ^1 (kg/m ³)	Beton (m ³)	Beton ² (kg)
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	95	616	58'792	61	21	50'397
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.20	17	531	9'008	9	3	8'136
							73	176'218
Nr. 23, EFH, 1998, 959 m³, Beton, Holzblockbaukonstruktion								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	95	616	58'792	61	21	50'397
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.20	17	531	9'008	9	3	8'136
							73	176'218
Nr. 24, EFH, 1998, 959 m³, Kalksandstein, Beton, Holzblockbaukonstruktion								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	95	616	58'792	61	21	50'397
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
							54	129'168

Fortsetzung auf der nächsten Seite

BE Name	BT Beschr.	Beton (m)	BE (m ²)	α BT (kg/m ²)	BE (kg)	ρ^1 (kg/m ³)	Beton (m ³)	Beton ² (kg)
Nr. 25, EFH, 1998, 959 m³, Beton, BK-Zweischalenmauerwerk verputzt								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	179	616	110'253	115	39	94'509
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Decke	Betondecke 22 cm mit 14 cm WD, d= 36 cm	0.22	87	541	47'330	49	19	46'170
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	24	613	14'995	16	4	10'575
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.22	17	531	9'008	9	4	8'950
							116	277'889
Nr. 26, EFH, 1998, 959 m³, Beton, Klinker Zweischalenmauerwerk verputzt								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	179	616	110'253	115	39	94'509
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Decke	Betondecke 22 cm mit 14 cm WD, d= 36 cm	0.22	87	541	47'330	49	19	46'170
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	24	613	14'995	16	4	10'575
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.05	14	126	1'696	2	1	1'620
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.22	17	531	9'008	9	4	8'950
							116	277'889

Fortsetzung auf der nächsten Seite

BE Name	BT Beschr.	Beton (m)	BE (m ²)	α BT (kg/m ²)	BE (kg)	ρ^1 (kg/m ³)	Beton (m ³)	Beton ² (kg)
Nr. 27, EFH, 1998, 959 m³, Beton, Kalksandsichtmauerwerk								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	80	674	53'745	56	16	38'250
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	74	535	39'415	41	16	38'914
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 30 cm, armiert mit 14 cm WD, d= 44 cm	0.30	17	735	12'340	13	5	12'096
Decke	Betondecke 40 cm mit 8 cm WD, d= 52 cm	0.40	13	1'051	13'387	14	5	12'230
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	179	616	110'253	115	39	94'509
Decke	Betondecke 18 cm mit 8 cm WD, d= 30 cm	0.18	8	519	3'976	4	1	3'307
Decke	Betondecke 22 cm mit 14 cm WD, d= 36 cm	0.22	87	541	47'330	49	19	46'170
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	24	613	14'995	16	4	10'575
Balkonbrüstung, Lichtschacht	Betonlichtschacht 5 cm nicht armiert, roh	0.50	14	126	1'696	2	7	16'200
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	16	725	11'342	12	5	11'268
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 22 cm	0.22	17	531	9'008	9	4	8'950
							122	292'469
Nr. 302, EFH, 1998, 471 m³, Beton, Backsteinmauerwerk hinterlüftet								
Fundament	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	17	674	11'331	24	3	8'064
Decke	Betonfundament 20 cm, armiert, d= 28 cm	0.20	68	674	45'862	97	14	32'640
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 22 cm mit 8 cm WD gegen Erdreich d= 30 cm	0.22	78	535	41'822	89	17	41'290
Sockelwand	Betonkelleraussenwand 20 cm nicht armiert	0.20	7	473	3'542	8	1	3'590
Decke	Betondecke 22 cm mit 8 cm WD, d= 34 cm	0.22	122	616	75'393	160	27	64'627
Treppe	Betondecke 20 cm, roh	0.20	12	483	5'556	12	2	5'520
Aussendecke	Betonaussendecke 18 cm mit 10 cm WD, d= 36.5 cm	0.18	19	613	11'485	24	3	8'100
Kellerinnenwand tragend	Betonsichtwand 30 cm	0.30	15	725	10'682	23	4	10'613
							73	174'444

B Modell

B.1 Modellbeschreibung: Kiesflüsse in der Schweiz

In der Figur 18 ist das System dargestellt, das als Basis für die Modellierung dient. Die einzelnen Prozesse und Flüsse sind unten erklärt.

Benutzte Abkürzungen: HB = Hochbau, TB = Tiefbau, RC = Recyclingprodukt, MA = Mischabbruch, R = Restliche Fraktionen (Beton, Kies/Sand).

B.1.1 Prozesse

0 Rohstoff: Das natürliche Kieslager, die konzessionierte Menge Kies, die in den nächsten Jahren abgebaut werden darf (geschätzt).

1, 10 Baustoffe in Hochbau und Tiefbau: Herstellung von Baustoffen aus Primär- und RC-Materialien. Die Zusammensetzung wird bestimmt durch den totalen Materialbedarf von HB und TB und durch den minimalen Anteil von Primärmaterial, der jeweils enthalten sein muss.

2 Hochbau: Gebäude und Erschliessung der Parzellen.

3 Tiefbau: Infrastrukturbauten wie Strasse, Schiene, Staumauer, Kanalisation, ...

4 Aufbereitung: Sortieren und trennen der Bauabfälle, aufbereiten der recycelbaren Stoffe. Die Produkte der Aufbereitung sind: RC-MA (RC-Mischabbruchgranulat) und RC-Rest (RC-Betongranulat, RC-Kies/Sand, RC-Asphaltgranulat).

Was nicht recycelt werden kann geht in die Deponie.

5 Deponie Inert- oder Reaktordeponie.

6 RC-Mischabbruch (RC-MA) Das Recycling-Produkt RC-Mischabbruchgranulat (RC-MA) wird hier zwischengelagert. Wenn der Bedarf im Bauwerk kleiner ist als das Angebot, wächst dieses Lager (= Überschuss an RC-Material).

7 RC-Rest (RC-R) Die restlichen Recycling-Produkte RC-Kies/Sand, RC-Betonabbruchgranulat, RC-Asphaltgranulat, zusammengefasst als RC-R werden hier zwischengelagert. Wenn der Bedarf im Bauwerk kleiner ist als das Angebot, wächst dieses Lager (= Überschuss an RC-Material).

8, 9 Mischung der RC-Baustoffe für HB und TB RC-MA und RC-Rest werden hier in einem Verhältnis gemischt das vorgegeben werden kann (maximaler Anteil von RC-MA). Wenn der Bedarf von RC-Material grösser ist als das verfügbare Angebot wird die Differenz aus Primärmaterial gedeckt.

B.1.2 Flüsse

Lagerveränderungen

A_{roh} Abbau der Kiesreserven, Primärmaterialbedarf.

A_{HB} Zuwachs des Hochbaus. Diese Funktion wird von aussen gegeben.

$$A_{\text{HB}} = \dot{M}_2(t) = (M_{2,\text{max}} - M_2(0)) \cdot \omega_{\text{HB}} \cdot e^{-\omega_{\text{HB}} \cdot t}$$

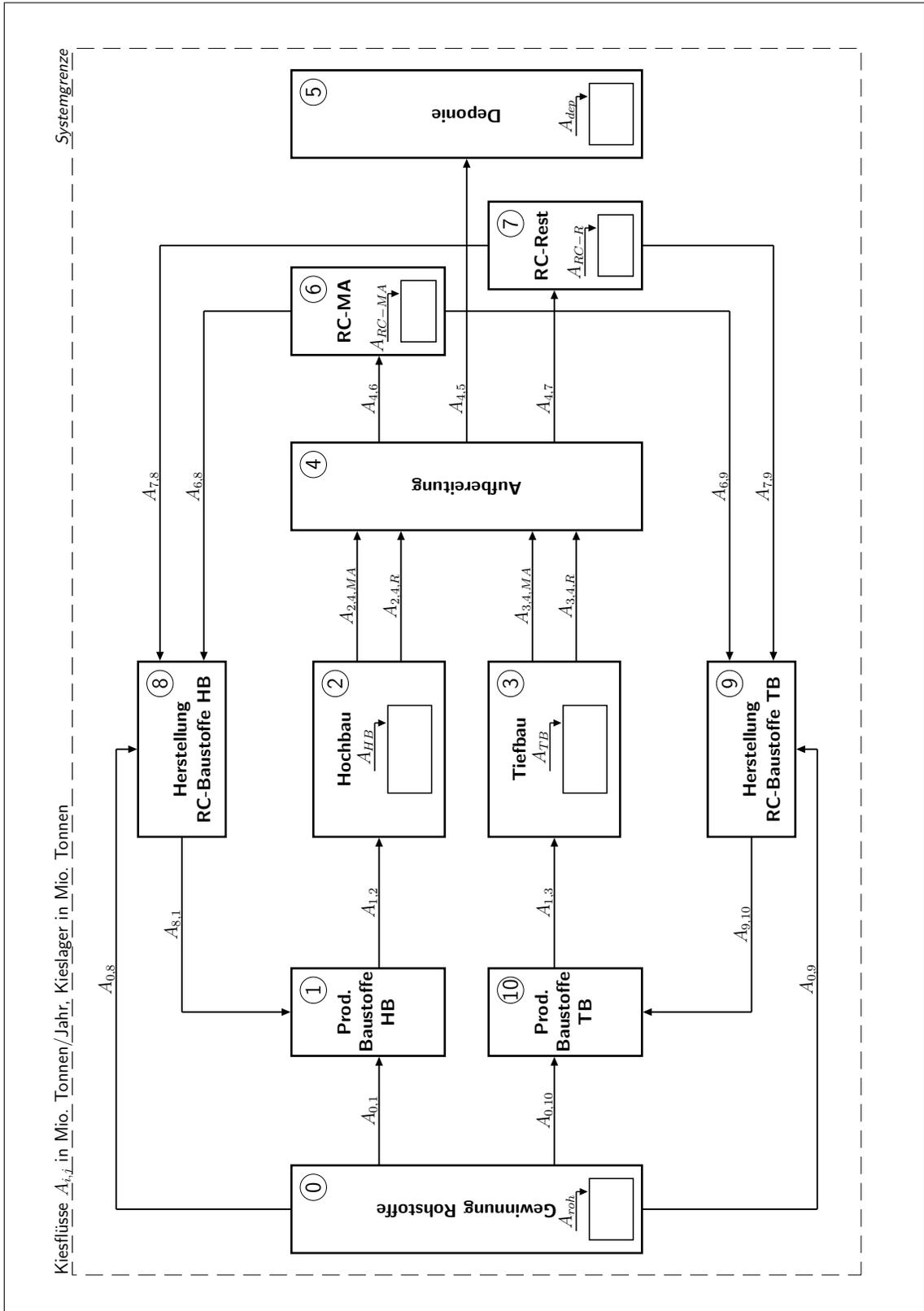
A_{TB} Zuwachs des Tiefbaus. Diese Funktion wird ebenfalls von aussen gegeben.

$$A_{\text{TB}} = \dot{M}_3(t) = (M_{3,\text{max}} - M_3(0)) \cdot \omega_{\text{TB}} \cdot e^{-\omega_{\text{TB}} \cdot t}$$

A_{dep} Zuwachs des deponierten Volumens (= $A_{4,5}$), bzw. Abnahme des verfügbaren Deponieraumes (= $-A_{4,5}$).

$A_{\text{RC-MA}}$ Der Fluss in das Lager von RC-Mischabfall (RC-MA). Er ist > 0 , wenn der Bedarf an RC-MA kleiner ist als das Angebot.

$A_{\text{RC-R}}$ Der Fluss in das Lager von RC-Rest (RC-R). Er ist > 0 , wenn der Bedarf an RC-Rest kleiner ist als das Angebot.



Figur 18: Das System für die Modellierung.

Flüsse zwischen den Prozessen

A_{0,1} Minimaler Input von Primärmaterial in den Hochbau, gegeben durch den minimalen Anteil von Primärmaterial im Baustoff $k_{p,HB}$.

$$A_{0,1} = k_{p,HB} \cdot A_{1,2}$$

A_{0,10} Minimaler Input von Primärmaterial in den Tiefbau, gegeben durch $k_{p,TB}$.

$$A_{0,10} = k_{p,TB} \cdot A_{1,3}$$

A_{1,2} Totaler Bedarf an Material in den Hochbau. Die Zusammensetzung ist gegeben durch den minimalen Anteil Primärkies und den maximalen Anteil RC-Material.

$$A_{1,2} = A_{0,1} + A_{8,1}$$

A_{1,3} Totaler Bedarf an Material in den Tiefbau. Die Zusammensetzung ist gegeben durch den minimalen Anteil Primärkies und den maximalen Anteil RC-Material.

$$A_{1,3} = A_{0,10} + A_{9,10}$$

A_{2,4} Abbruchmaterial aus dem Hochbau aus Erneuerung, Abbruch und Neubau. Der Abbruch setzt sich aus Mischabbruch (MA) und restlichem Material (Rest) zusammen. Wieviel Abbruchmaterial insgesamt anfällt, wird durch die Abbruchquote $\alpha_{HB}(t)$ bestimmt.

$$A_{2,4} = \alpha_{HB} \cdot M_2(t) = A_{2,4,MA} + A_{2,4,R}$$

A_{2,4,MA} Mischabbruchmaterial aus dem Hochbau, er macht einen festen Anteil des gesamten Abbruchmaterialies aus dem Hochbau aus ($k_{MA,HB}$).

$$A_{2,4,MA} = k_{MA,HB} \cdot \underbrace{\alpha_{HB} \cdot M_2}_{=A_{2,4}}$$

A_{2,4,Rest} Restliches Abbruchmaterial (ohne MA) aus dem Hochbau aus Erneuerung, Abbruch und Neubau.

$$A_{2,4} = (1 - k_{MA,HB}) \cdot \alpha_{HB} \cdot M_2$$

A_{3,4} Abbruchmaterial aus dem Tiefbau aus Erneuerung, Abbruch und Neubau. Der Abbruch setzt sich aus Mischabbruch (MA) und restlichem Material (Rest) zusammen. Wieviel Abbruchmaterial anfällt wird durch die Abbruchquote $\alpha_{TB}(t)$ bestimmt.

$$A_{3,4} = \alpha_{TB}(t) \cdot M_3(t) = A_{3,4,MA} + A_{3,4,R}$$

A_{3,4,MA} Mischabbruchmaterial aus dem Tiefbau, er macht einen festen Anteil des gesamten Abbruchmaterialies aus dem Tiefbau aus ($k_{MA,TB}$).

$$A_{3,4,MA} = k_{MA,TB} \cdot \underbrace{\alpha_{TB} \cdot M_3}_{=A_{3,4}}$$

A_{3,4,Rest} Restliches Abbruchmaterial (ohne MA) aus dem Hochbau aus Erneuerung, Abbruch und Neubau.

$$A_{3,4} = (1 - k_{MA,TB}) \cdot \alpha_{TB} \cdot M_3$$

A_{4,5} Der Fluss in die Deponie. Annahme: Der MA-Anteil in die Deponie ist verschieden vom restlichen deponierten Material. Die Anteile, die deponiert werden sind zeitabhängig, das heisst $k_{dep,R}(t)$, $k_{dep,MA}(t)$.

$$A_{4,5} = k_{dep,R} \cdot (A_{2,4,R} + A_{3,4,R}) + k_{dep,MA} \cdot (A_{2,4,MA} + A_{3,4,MA})$$

A_{4,6} Angebot an RC-Mischabbruchgranulat (RC-MA). Dieser Fluss kann maximal wieder verbaut werden. Das Angebot in HB und TB wird mit dem Verteilungskoeffizienten $k_{MA,HB}(t)$ aufgeteilt.

A_{4,7} Angebot an restlichen RC-Produkten (RC-R). Dieser Fluss kann maximal wieder verbaut werden. Das Angebot wird proportional zum Bedarf aufgeteilt: Anteil in HB := $B_{HB} = A_{8,1}/(A_{8,1} + A_{9,10})$

A_{6,8} RC-MA, der in den Hochbau geht (Input RC-MA). Die Grösse dieses Flusses wird zuerst bestimmt durch die Verteilung des totalen RC-MA-Angebots ($A_{4,6}$) in Hochbau und Tiefbau ($k_{MA,HB}(t)$).

Der Bedarf wird bestimmt durch den maximalen Anteil von RC-Material, der aus dem Fluss $A_{8,1}$ und dessen Zusammensetzung ($A_{6,8}$ und $A_{7,8}$) überhaupt in den HB gelangen kann.

Wenn

$$\underbrace{k_{MA,HB} \cdot A_{4,6}}_{= \text{Angebot}} < \underbrace{k_{MA,HB,max} \cdot A_{8,1}}_{= \text{Bedarf}}$$

dann

$$A_{6,8} = k_{MA,HB} \cdot A_{4,6} \quad (= \text{Angebot})$$

sonst

$$A_{6,8} = k_{MA,HB,max} \cdot A_{8,1} \quad (= \text{Bedarf})$$

A_{7,8} RC-Rest, der in den Hochbau geht. Die Grösse dieses Flusses wird bestimmt durch den Input von RC-MA und dem maximalen Anteil von RC-Produkten, der überhaupt in den HB gelangen kann. Für die Berechnung von $A_{7,8}$ wird ein „Hilfsfluss“ benutzt:

$B_{RC-R,HB} := \text{Bedarf RC-Rest nach Input MA} = \text{Bedarf RC-Rest} + (\text{Bedarf RC-MA} - \text{Input RC-MA})$

Wenn

$$\underbrace{B_{HB} \cdot A_{4,7}}_{= \text{Angebot}} < \underbrace{B_{RC-R,HB}}_{= \text{Bedarf}}$$

dann

$$A_{7,8} = B_{HB} \cdot A_{4,7} \quad (= \text{Angebot})$$

sonst

$$A_{7,8} = A_{8,1} - A_{4,6} \quad (= \text{Bedarf})$$

A_{0,8} Der Anteil von Primärkies, der zusätzlich zum minimalen Anteil in den Hochbau gelangt. Dieser Fluss ergänzt den Anteil von RC-Material, falls das Angebot von RC-Produkten kleiner ist als dessen Bedarf.

Wenn

$$A_{8,1} - (A_{6,8} + A_{7,8}) > 0$$

dann

$$A_{0,8} = A_{8,1} - (A_{6,8} + A_{7,8})$$

sonst

$$A_{0,8} = 0$$

A_{6,9}, A_{7,9}, A_{0,9} Analog dem HB werden die Flüsse der RC-Produkte für den TB berechnet.

B.1.3 Parameter und Koeffizienten

α_{HB}, α_{TB} Erneuerung- und Abbruch des bestehenden Bauvolumens von Hoch- und Tiefbau in Prozent des Lagers. Diese Werte können als Funktion der Zeit variieren. Es wurde ein logistisches Wachstum angenommen:

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

mit ω als Formparameter und $\mu = \frac{\alpha_0}{\alpha_{max}}$

k_{MA,HB} Für die Verteilung von RC-Mischabbruchgranulat in das Bauwerk (HB, TB) wurde ebenfalls ein logistisches Wachstum angenommen (siehe oben).

k_{dep,MA}, k_{dep,R} Anteil vom Abbruch, der deponiert wird. Für die zeitliche Entwicklung wurde ebenfalls eine logistische Kurve angenommen. Da es eine Abnahme über die Zeit gibt, wird $\mu < 1$ sein. In der Figur 7 ist die zeitliche Entwicklung dieses Parameters dargestellt.

ω Parameter, der die exponentielle Abnahme des Zuwachses bremst.

In der Tabelle 7 sind die Werte der von uns gewählten Parameter für die Modellierung aufgelistet.

B.1.4 Gleichungen und Bedingungen

Das Modell umfasst also 11 Prozesse mit 11 Lageränderungen und 19 Flüssen. Das heisst, es müssen 30 Gleichungen gelöst werden, um das System zu beschreiben.

Die Aufstellung der Gleichungen wurde gemäss [9] vorgenommen:

1. Beschreibung der Lageränderungen (\dot{M}) mit Hilfe der Bilanzgleichungen über die Prozesse.

$$\begin{aligned}\dot{M}_0 &= -A_{0,1} - A_{0,10} - A_{0,8} - A_{0,9} \\ \dot{M}_1 &= A_{0,1} + A_{8,1} - A_{1,2} \\ \dot{M}_{10} &= A_{0,10} + A_{9,10} - A_{10,3} \\ \dot{M}_2 &= A_{1,2} - A_{2,4} = A_{1,2} - A_{2,4,MA} - A_{2,4,R} \\ \dot{M}_3 &= A_{1,3} - A_{3,4} = A_{1,3} - A_{3,4,MA} - A_{3,4,R} \\ \dot{M}_4 &= A_{2,4} + A_{3,4} - A_{4,5} - A_{4,6} - A_{4,7} \\ \dot{M}_5 &= A_{4,5} \\ \dot{M}_6 &= A_{4,6} - A_{6,8} - A_{6,9} \\ \dot{M}_7 &= A_{4,7} - A_{7,8} - A_{7,9} \\ \dot{M}_8 &= A_{6,8} + A_{7,8} + A_{0,8} - A_{8,1} \\ \dot{M}_9 &= A_{6,9} + A_{7,9} + A_{0,9} - A_{9,10}\end{aligned}$$

2. Funktionen für die Entwicklung von Hoch- und Tiefbau.

$$\begin{aligned}M_2(t) &= (M_{2,max} - M_2(0)) \cdot (1 - e^{-\omega_{HB} \cdot t}) + M_2(0) \\ M_3(t) &= (M_{3,max} - M_3(0)) \cdot (1 - e^{-\omega_{TB} \cdot t}) + M_3(0)\end{aligned}$$

Zuwachs von Hoch- und Tiefbau Annahme: Exponentielle Abnahme des Zuwachses, das heisst, ein Plateau ($M_{2,max}$, $M_{3,max}$) wird erreicht.

3. Lager und Lagerveränderungen einiger Prozesse

$$M_1 = M_4 = M_8 = M_9 = M_{10} = 0$$

und

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_4 = \dot{M}_8 = \dot{M}_9 = \dot{M}_{10} = 0 \quad \forall t \geq 0$$

4. Abbruchflüsse aus Hoch- und Tiefbau:

$$\begin{aligned}A_{2,4} &= \alpha_{HB}(t) \cdot M_2(t) \\ A_{2,4,MA} &= ab_{MA,HB} \cdot A_{2,4} \\ A_{2,4,R} &= (1 - ab_{MA,HB}) \cdot A_{2,4} \\ A_{3,4} &= \alpha_{TB}(t) \cdot M_3(t) \\ A_{3,4,MA} &= ab_{MA,TB} \cdot A_{3,4} \\ A_{3,4,R} &= (1 - ab_{MA,TB}) \cdot A_{3,4}\end{aligned}$$

5. Der Fluss A_{roh} , das heisst der Input von Primärmaterial in das Bauwerk:

$$\begin{aligned}A_{roh} &= \underbrace{\dot{M}_2 + \dot{M}_3}_{\text{Änderung Lager}} \\ &+ \underbrace{M_2 \cdot \alpha_{HB} \cdot \left(ab_{MA,HB} \cdot k_{dep,MA} + \underbrace{(1 - ab_{MA,HB}) \cdot k_{dep,R}}_{= ab_{R,HB}} \right)}_{\text{Anteil in Deponie aus dem HB}} \\ &+ \underbrace{M_3 \cdot \alpha_{TB} \cdot \left(ab_{MA,TB} \cdot k_{dep,MA} + \underbrace{(1 - ab_{MA,TB}) \cdot k_{dep,R}}_{= ab_{R,TB}} \right)}_{\text{Anteil in Deponie aus dem TB}} \\ &- \underbrace{(A_{6,8} + A_{7,8} + A_{6,9} + A_{7,9})}_{\text{RC-Produkte in Bauwerk}}\end{aligned}$$

6. Die Veränderung des natürlichen Lagers kann somit aus dem Fluss A_{roh} berechnet werden:

$$M_0(t) = M_0(0) - \int_{t=0}^{t=T} A_{roh} dt$$

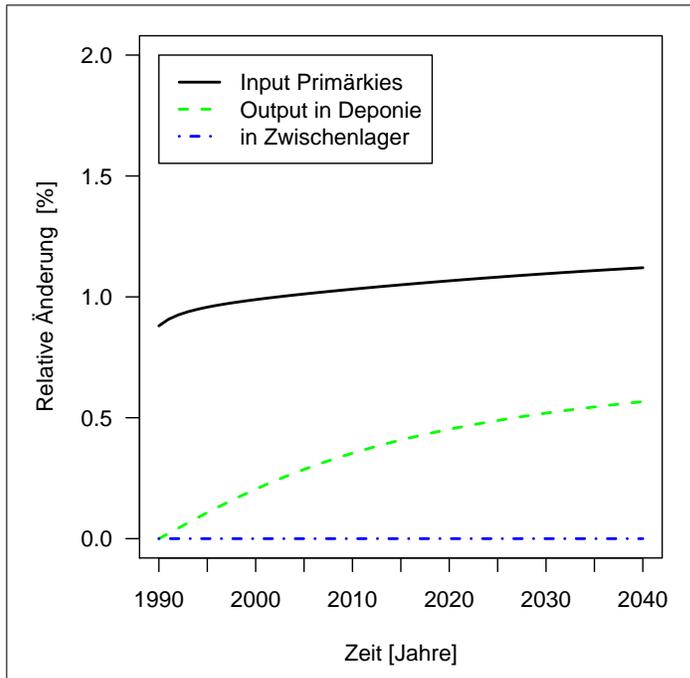
B.2 Parameter und Koeffizienten für das Modell

Tabelle 7: Die Wahl der Parameter für das Modell. NB = Nebenbedingung, die bei der Parameterschätzung eingehalten werden musste.

Bereich	Parameter	Wert	NB	Bereich	Parameter	Wert	
Hochbau	$M_2(0)$	800		Anteil RC-MA in HB	$k_{MA,HB}(0)$	0.1	
	$M_{2,max}$	2200	≥ 2200		$k_{MA,HB,max}$	0.704	
	μ_{HB}	0.364			$\mu_{k,MA,HB}$	0.142	
Tiefbau	$M_3(0)$	700		Anteil RC-R in HB, gekoppelt mit Bedarf	$k_{R,HB}(0)$	0.1	
	$M_{3,max}$	1200	1200-1300		$k_{R,HB,max}$	0.704	
	μ_{TB}	0.583			$\mu_{k,R,HB}$	0.142	
Abbruch	$\alpha_{HB}(0)$	0.0037		max. Bedarf HB		0.704	
	$\alpha_{HB,max}$	0.008	≥ 0.008				
	$\mu_{a,HB}$	0.463					
α	$\alpha_{TB}(0)$	0.006		Koeffizienten			
	$\alpha_{TB,max}$	0.006			Min. Anteil Primär	$k_{p,HB}$	0.2
	$\mu_{a,TB}$	1			in Bauwerk	$k_{p,TB}$	0.2
Deponie	$k_{dep}(0)$	0.8		Anteil MA	$ab_{MA,HB}$	0.3	
	$k_{dep,min}$	0.05		im Abbruch	$ab_{MA,TB}$	0.1	
	$\mu_{k,dep}$	16					
Deponie MA	$k_{dep,MA}(0)$	0.8		Max. Anteil RC-MA	$k_{MA,max,HB}$	0.8	
	$k_{dep,MA,min}$	0.1		im RC-Material	$k_{MA,max,TB}$	0.8	
	$\mu_{k,dep,MA}$	8					
Kurvenparameter	ω_{HB}	0.0188	≥ 0.025	Natürliches Lager	$M_0(0)$	1000	
	ω_{TB}	0.03	≥ 0.030	Deponievolumen	$M_{dep}(m^3)$	30	
	$\omega_{\alpha_{HB}}$	0.1	≥ 0.100		$M_{dep}(0)(Tonnen)$	81	
ω	$\omega_{\alpha_{TB}}$	1	≥ 0.010	Dichte Kies/Sand (t/m ³)		2.7	
	$\omega_{k_{MA}}$	0.1					
	ω_{k_R}	0.1					
	$\omega_{k_{dep}}$	0.025					
	$\omega_{k_{dep,MA}}$	0.03					

B.3 Sensitivitätsanalyse

Eine systematische Sensitivitätsanalyse wurde aus Zeitgründen nicht gemacht, das Modell wurde jedoch auf Parameteränderungen von $\pm 1\%$ untersucht. Die Figur 19 zeigt exemplarisch was geschieht, wenn das maximale Lager im Hochbau um 1% erhöht wird. Grundlage ist das Szenario 1. Der Primärkiesinput steigt ebenfalls um rund 1%, der Fluss in die Deponie steigt aber nur auf 0.6%, da ein Teil der Abbrüche recycelt wird. Der Fluss in das Zwischenlager der Aufbereiteten Recyclingstoffe bleibt hier Null.



Figur 19: Ein Beispiel für eine mögliche Sensitivitätsanalyse: Wenn im Szenario 1 das maximale Lager des Hochbaus um 1% vergrößert wird, dann verändern sich der Primärkiesinput im Prozentbereich und der Fluss in die Deponie um rund 0.6%. Der Fluss in das Zwischenlager der Recyclingprodukte bleibt hier bei Null.