



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nach- haltiges Baustoffmanagement**

**Bases de décision et recommandations pour une gestion  
durable des matériaux de construction**

**Decision support and recommendations for a sustaina-  
ble construction material management**

**Empa, Materials Science & Technology, Dübendorf**  
**Christof Knoeri**  
**Dr. Hans-Joerg Althaus**

**Ludwig-Maximilians Universität, München**  
**Prof. Dr. Claudia R. Binder**

**Forschungsprojekt ASTRA 2005/004 auf Antrag des Bundes-  
amtes für Strassen (ASTRA)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nach- haltiges Baustoffmanagement**

**Bases de décision et recommandations pour une gestion  
durable des matériaux de construction**

**Decision support and recommendations for a sustaina-  
ble construction material management**

**Empa, Materials Science & Technology, Dübendorf**  
**Christof Knoeri**  
**Dr. Hans-Joerg Althaus**

**Ludwig-Maximilians Universität, München**  
**Prof. Dr. Claudia R. Binder**

**Forschungsprojekt ASTRA 2005/004 auf Antrag des Bundes-  
amtes für Strassen (ASTRA)**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Dr. Hans-Jörg Althaus  
Prof. Dr. Claudia R. Binder

### Mitglieder

Christof Knoeri

## Begleitkommission

### Präsident

Dr. Heinrich Gugerli, AHB Stadt Zürich, Verein eco-bau

### Mitglieder

Hansruedi Eberhard, Eberhard Recycling AG  
Prof. Dr. Stefanie Hellweg, ETH  
Dr. Jürg Hertz, Amt für Umwelt, Kanton Thurgau  
Dr. Fritz Hunkeler, ASTRA  
Matthias Kruse, Ernst Basler & Partner AG  
Dr. Konrad Moser, ExpertConsult  
Dr. Hansruedi Preisig, Zürcher Hochschule Winterthur ZHAW  
Dr. Robin Quartier, VBSA  
Dr. Stefan Rubli, Energie- und Ressourcen-Management GmbH  
Dr. Kaarina Schenk, BAFU  
Prof. Dr. Roland W. Scholz, ETH  
Bruno Suter, ARV  
Rolf Wagner, AWEL, Kanton Zürich  
Prof. Dr. Holger Wallbaum, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

## KO-Finanzierung des Forschungsauftrags

Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich  
Amt für Hochbauten (AHB) der Stadt Zürich  
Eberhard Recycling AG

## Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>6</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>17</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>23</b>
1.1	Hintergrund und bestehende Arbeiten .....	23
1.2	Fragestellung.....	25
<b>2</b>	<b>Konzeptioneller Rahmen und Vorgehen</b> .....	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>Entscheidungsprozess und Nachfrage-verhalten der Bauakteure</b> .....	<b>27</b>
3.1	Einleitung und Forschungsfragen .....	27
3.2	Operationalisierung der Agenten .....	28
3.3	Resultate: Schlüsselakteure, Interaktionen, Präferenzen & Entscheidungen .....	29
3.4	Diskussion und Zusammenfassung .....	38
<b>4</b>	<b>Materialflussanalyse</b> .....	<b>40</b>
4.1	Einleitung und Forschungsfragen .....	40
4.2	Zusammenfassung.....	45
<b>5</b>	<b>Agentenbasierte Angebot-Nachfrage-Modellierung</b> .....	<b>47</b>
5.1	Einleitung und Forschungsfragen .....	47
5.2	Methodik: Agentenbasierte Modellierung.....	48
5.3	Resultate: Nachfragesensitivität und Szenarienanalyse.....	52
5.4	Diskussion und Zusammenfassung .....	56
<b>6</b>	<b>Umweltbeurteilung</b> .....	<b>57</b>
6.1	Einleitung und Forschungsfragen .....	57
6.2	Methodik: Ökobilanzierung (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens) .....	59
6.3	Resultate: Gesamtumweltauswirkungen, Beiträge, Zement und Transportsensitivität ....	63
6.4	Diskussion und Zusammenfassung .....	67
<b>7</b>	<b>Synthese</b> .....	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Empfehlungen</b> .....	<b>70</b>
	<b>Anhänge</b> .....	<b>73</b>
	<b>Abkürzungen</b> .....	<b>78</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>79</b>
	<b>Projektabschluss</b> .....	<b>83</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen</b> .....	<b>86</b>

# Zusammenfassung

## Einleitung

### Hintergrund

Nachhaltiges Baustoffmanagement ist sowohl aus der Ressourcen- wie auch aus der Abfallperspektive zentral für das Funktionieren westlicher Gesellschaften. In Industrienationen gehören Baumaterialien zu den meist konsumierten Gütern und Bauabfall zu den grössten Abfallströmen. Diese Problematik scheint sich in Zukunft aufgrund ansteigender Bevölkerungszahlen, verdichteter Bauweise und knapper werdenden Deponievolumen noch zu verschärfen. Als Lösung wird vermehrt die Wiederaufbereitung von mineralischem Bauabfall zu Recyclinggranulat zur Substitution von natürlichem Sand und Kies im Tief- und Hochbau diskutiert. In der Schweiz wird im Tiefbau ein Grossteil des mineralischen Bauabfalls direkt auf der Baustelle wiederverwertet während Bauabfall aus dem Hochbau mehrheitlich deponiert oder für untergeordnete Anwendungen wiederverwertet wird.

Für die Verwendung von Recyclinggranulaten sind vergleichbare materialtechnische Eigenschaften zu denen herkömmlicher Baustoffen von zentraler Bedeutung. In der Schweiz wurde die Verwendung von Recyclinggranulaten seit Mitte der 90er Jahre vermehrt in die Normierung aufgenommen und ist heute sowohl im Hochbau wie auch im Tiefbau standardisiert. Nebst den materialtechnischen Eigenschaften sind die ökologischen Vorteile von Rückbaustoffen in Frage gestellt worden, da diese wie im Fall von Recyclingbeton etwas mehr Zement benötigen können. Obwohl das Angebot an Sekundärbaustoffen, die Normierung und Referenzobjekte für deren Einsatz sprechen, ziehen Bauakteure insbesondere im Hochbau mehrheitlich konventionelle Baustoffe vor. Da in Zukunft ein weiterer Anstieg an Bauabfallmengen erwartet wird, wird der Unterschied zwischen potentielltem Angebot und Nachfrage nach Recyclingbaustoffen weiter steigen.

## Fragestellung und Vorgehen

### Projektziel und Fragestellung

Das Projekt setzte sich daher eine *ökologische Optimierung von Angebot und Nachfrage von mineralischen Recyclingbaustoffen* zum Ziel. Dabei sollten: Angebot und Nachfrage mineralischer Recyclingbaustoffe analysiert und modelliert, und Szenarien und Strategien für ein ökologisches Baustoffmanagement entwickelt und beurteilt werden. Insbesondere wurden folgende Forschungsfragen bearbeitet:

- i. Welche Mengen und Qualitäten an mineralischen Recyclingbaustoffen sind wann, aufgrund der frei werdenden Rückbaustoffe, zu erwarten?
- ii. Von welchen Schlüsselfaktoren hängt die Nachfrage mineralischer Recyclingbaustoffe ab und wie kann diese beeinflusst werden?
- iii. Wie können Angebot und Nachfrage so in Übereinstimmung gebracht werden, dass eine minimale Umweltbelastung resultiert?

### Vorgehen

Um die verschiedenen Teilperspektiven der Forschungsfragen in konsistenter Form zu integrieren, wurde ein konzeptioneller Rahmen entwickelt welcher vier Analysemodule beinhaltet: (i) ein Modul zu den Entscheidungen der Nachfrage, (ii) ein Materialflussmodul zur Bestimmung des potentiellen Angebots, (iii) ein agentenbasiertes Angebot-Nachfrage-Modul sowie (iv) ein Modul zur Beurteilung der Umweltauswirkungen. Im Folgenden fassen wir die Arbeiten und Erkenntnisse aus den einzelnen Teilbereichen zusammen.

## Resultate der Analysemodule

### Nachfrageentscheide und Verhalten der Bauakteure

In diesem Modul wurden folgende Fragen untersucht:

- Wer entscheidet über die Nachfrage nach Rückbaustoffen;
- Wie interagieren diese Bauakteure und wie verhalten sie sich, das heisst welche Baustoffe werden empfohlen, und eingesetzt; und
- Warum wird so entschieden?

Mittels einer Akteurs-Einfluss-Analyse wurden die Schlüsselakteure identifiziert, in Experteninterviews und Workshops wurden deren Interaktionen sowie Entscheidungskriterien erhoben, und mittels Umfrage wurden deren Entscheidungen quantifiziert.

Bauherren, Bauplaner (Architekten und Ingenieure), und Unternehmer (Baufirmen) waren die Schlüsselakteure bezüglich der Nachfrage nach mineralischen Rückbaustoffen. Während im Tiefbau fast ausschliesslich öffentliche Bauherren bauen, werden im Hochbau private, kommerzielle und öffentliche Bauherren unterschieden. Diese Bauakteure interagieren mit mehrmaligem Einbezug des Bauherrn. Dieser kann den Planern eine erste Vorgabe bezüglich nachhaltigen Bauens geben. Die Planer entwerfen danach das Projekt und geben ihre Empfehlung dem Bauherrn ab, welcher das Projekt bestätigt. In der nächsten Phase werden die Unternehmer mit der Ausschreibung einbezogen, auf welche sie mit der Eingabe einer Offerte reagieren. Mit der finalen Auswahl der Offerte bestimmt wiederum der Bauherr darüber, wer den Auftrag erhält und damit auch welche Materialien nachgefragt und letztendlich verwendet werden.

Mit der Ausnahme von öffentlichen Bauherren (~30%) liegt die Nachfrage nach Rückbaustoffen im Hochbau bei rund 10% und damit deutlich tiefer als im Tiefbau (>30%). Zudem empfehlen Baufachleute (Architekten, Ingenieure und Unternehmer) im Hochbau Rückbaumaterialien mit rund 16% deutlich weniger als dies Ingenieure und Unternehmer im Tiefbau tun (>40%). Darüber hinaus zeugt die klare Differenzierung zwischen, und Allokation von den Rückbaustofftypen zu den verschiedenen Anwendungen im Tiefbau von verbreitetem Knowhow in diesem Bereich. Ausserdem ist im Hochbau die Diskrepanz zwischen der Forderung nach nachhaltigem Bauen (~60%) zu Beginn des Bauprozesses und der letztendlichen Nachfrage nach Rückbaustoffen (~10%) besonders auffällig.

Bezüglich den Entscheidungskriterien und deren Gewichtung sind sich Bauakteure im Hoch- und Tiefbau sehr ähnlich. So wird die Nachfrage nach Rückbaustoffen im Hoch- und Tiefbau mehrheitlich durch dieselben Kriterien geprägt. Ökologische Aspekte wurden kaum oder lediglich zu Beginn des Prozesses miteinbezogen, während technische und ökonomische Aspekte sowie die Empfehlungen und Spezifikationen der Akteure vorher in der Entscheidungskette durchwegs eine Rolle spielten. Mit Ausnahme der Ingenieure stützten sich alle Bauakteure bei materialspezifischen Entscheidungen stark auf dieses Interaktionskriterium. Die Ingenieure als Startpunkte dieser Kette entschieden sich hauptsächlich aufgrund von Normen und Gesetzen sowie ihrer Erfahrung - im Hochbau meist für herkömmliche Baustoffe.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Rückbaustoffe im Tiefbau bereits gut etabliert sind, während Recyclingbeton im Hochbau immer noch ein Nischenprodukt ist. Eine Forderung nach nachhaltigem Bauen zu Beginn des Bauprozesses scheint kaum Auswirkungen auf die späteren Materialentscheidungen zu haben. Diese werden primär durch die Interaktionen mit den anderen Bauakteuren, insbesondere mit den Ingenieuren, geprägt, deren Entscheidungen primär durch Normen und Erfahrung bestimmt werden. Die Wichtigkeit der Interaktionskriterien zeigt, dass eine Beurteilung einzelner Akteursgruppen zu kurz greifen würde und daher, eine Modellierung aller Gruppen und deren Interaktionen notwendig wird.

## Materialflussanalyse

Eine Beurteilung von Szenarien ohne den Einbezug der Materialströme (Angebot) wäre aus Nachfragesicht nicht sinnvoll da zum Beispiel nur verfügbare Materialien nachgefragt werden können. Daher wurden in diesem Modul, fokussierend auf dem Hochbau, als Vorarbeit zur Nachfragemodellierung bestehende Materialflussmodelle angepasst und anschliessend ins Nachfragemodell integriert. Dabei wurde untersucht, welche Mengen der betrachteten Anwendungen in der Schweiz wann nachgefragt werden und welche Mengen und Qualitäten an mineralischen Recycling-Baustoffen wann, aufgrund der frei werdenden Rückbaustoffe, maximal erwartet werden können?

Für die vorliegende Arbeit wurde eine vereinfachte Materialflussmethodik gewählt, welche zu einem Grossteil auf den bisherigen Studien aufbaut. Dieses Modell beruht auf Bauinvestitionen in verschiedenen Gebäudetypen, der Materialisierung dieser Bauten sowie auf den berechneten Bauabfallvolumina aus bestehenden Studien. Für die Modellierung wurden verschiedene Szenarien für die künftigen Baustoffinvestitionen entwickelt.

Die sehr kleinen Mengen an Magerbeton, welche potentiell eingesetzt werden könnten, zeigen, dass nur ein Bruchteil des Abbruchmaterials in dieser Anwendung untergebracht werden kann. Aufgrund der generell abnehmenden Nachfrage im Tiefbau und der Vorbehalte der Tiefbauakteure gegenüber Recyclingmaterialien aus dem Hochbau scheint es daher notwendig, den Einsatz von Recyclingbeton für Anwendungen als Konstruktionsbeton anzustreben. Zudem ist die Menge an Mischabbruch gemessen am Volumen dreimal und gewichtsmässig fast doppelt so gross wie die an Betonabbruch. Daraus folgt, dass bei sinkenden Deponievolumen für Inertstoffe, unter anderem durch steigenden Aushubanfall, vermehrt alternative Verwendungsmöglichkeiten für die ansteigenden Mischabbruchmengen gefunden werden müssen.

Der Vergleich des potentiellen Angebots an Sekundärbaustoffen mit der Nachfrage in verschiedenen Szenarien zeigt, dass bei herkömmlicher Nachfrage (~11%) sowohl vom potentiellen Beton- als auch vom Mischabbruch nur ein Bruchteil nachgefragt wird. Bei 50% Nachfrage, 40% substituierten Aggregaten und einem Anteil von ~50% RC-M (Recyclingbeton aus Mischabbruch) würde der Betonabbruch praktisch komplett und der Mischabbruch zu rund 50% wiederverwertet werden. Bei maximaler Nachfrage (100%), 40% substituierten Aggregaten und einem Anteil von ~70% RC-M könnten die anfallenden mineralischen Beton- und Mischabbruchströme vollständig im Hochbau untergebracht werden.

Alternative Verwendungsmöglichkeiten, insbesondere von Mischabbruch, sind vermehrt zu betrachten, da die herkömmlichen Wiederverwertungs- und Entsorgungspfade limitiert sind. Neben der kontinuierlichen Erhöhung der Nachfrage nach Recyclingbeton (RC) ist auch die Substitutionsrate, das heisst wie viel des natürlichen Kies-Sands mit Recyclingaggregaten substituiert wird, entscheidend für eine Ausschöpfung des potentiellen Angebots an Recyclingaggregaten. Zusätzlich muss aber auch der Anteil an RC-M erhöht werden, damit signifikante Mengen an Mischabbruch aufgefangen werden können.

## Agentenbasierte Angebots-Nachfrage Modellierung

Bisher wurden die relevanten Bauakteure bezüglich der Nachfrage nach Rückbaustoffen identifiziert, und deren Interaktionen, Verhalten und Entscheidungen analysiert. Ebenfalls wurden die Mengen nachgefragter Betonanwendungen und das potentielle Angebot von Sekundärbaustoffen bestimmt. Die Frage, die sich nun in diesem Modul stellt, ist, wie die Entscheidungen der interagierenden Bauakteure beeinflusst werden können. Und dies so, dass möglichst viele Rückbaustoffe nachgefragt werden bzw. dass das Potential von Sekundärressourcen ausgeschöpft wird. Zudem sollte in einem realistischen Nachfrage-Angebot-Modell die Nachfrage durch das potentielle Angebot limitiert werden.

Hierzu wurde das sozio-technische System der Baustoffnachfrage in einem agentenbasierten Modell repräsentiert. Agentenbasierte Modellierung (ABM) beruht auf der Idee, dass Systemverhalten aus den Aktionen und der lokalen Interaktion der Akteure oder eben der „Agenten“ hervorgeht. ABM bietet sich insbesondere an, wenn die Akteursgrup-

pen sehr heterogen sind oder die Interaktion eine zentrale Rolle für das betrachtete Problem spielt. Beide Eigenschaften treffen auf die interagierenden Bauakteure in der Schweiz zu, wie es die bisherigen Analysen zeigten. In der Modellentwicklung wurde mit sehr simplen Modellen begonnen und sukzessive die Komplexität so erhöht bis einerseits das konzeptionelle Modell der Entscheidungen und Interaktionen realistisch wiedergegeben werden konnte (konzeptionelle Validierung) und andererseits das Verhalten auf Systemebenen plausible Resultate zeigte (operationale Validierung).

Sensitivitätsanalysen zeigten, dass weniger die Entscheidungskriterien oder deren Gewichtung, sondern vielmehr die Bekanntheit von Recyclingbeton für die Nachfrage zentral ist. Insbesondere eine Assoziation von nachhaltigem Bauen mit Rückbaustoffen bei Architekten und Ingenieuren ist entscheidend. Weiter ist die Nachfrage in einem Bereich von etwa +/- 20% (Preisdifferenz zwischen RC und konventionellem Beton (CC)) stark preiselastisch. Bei grösseren Preisdifferenzen zwischen konventionellen Baustoffen und Rückbaustoffen, scheint die Nachfrage preisunelastisch zu sein.

Die Nachfragesensitivitäten geben einen ersten Einblick darüber, welche Parameterkombinationen zu einer Erhöhung der Nachfrage führen würden. Da jedoch nicht alle Parameter für Massnahmen zugänglich sind, wurden folgende Szenarien entwickelt: (1) Information: Erhöhung der Bekanntheit nachhaltigen Bauens und Rückbaustoffen bei allen Bauherren, Architekten und Ingenieuren (2) Öffentliche Hand: Bei allen öffentlichen Projekten wird über nachhaltiges Bauen diskutiert, (3) Ökonomische Anreize: Preisvorteil von Recyclingbeton als Rohmaterial, (4) Information und Preisvorteile, (5) Kombiniert: Information kombiniert mit Preisvorteil und Standardisierung in Normen.

In einem reinen Informationsszenario könnte der Anteil an Recyclingbeton auf fast 50% gesteigert werden. Sowohl ökonomische Anreize als auch öffentliche Initiativen alleine greifen zu kurz und können die RC-Nachfrage kaum erhöhen. Erneut zeigt sich, dass ein Massnahmenkatalog am effektivsten ist. Würde demnach das schon effiziente Informationsszenario mit leichten Preisvorteilen kombiniert werden, würden nochmals fast 20% mehr an RC nachgefragt werden. Mit einer Kombination von Informationen und leichten Preisvorteilen für RC lässt sich dementsprechend Angebot und Nachfrage soweit optimieren, dass 100% des Betonabbruchs und rund 50% des Mischabbruchs wiederverwendet werden würden.

## Umweltbeurteilung

Bisher wurde davon ausgegangen, dass Recyceln aus ökologischer Sicht sinnvoll ist und daher eine Erhöhung des Baustoffrecyclens anzustreben sei. Im Tiefbau sind die ökologischen Vorteile von Recyclingbaustoffen auch wenig umstritten. Recyclingbeton (RC) für hochwertige Anwendungen wie Innen- oder Aussenwände im Hochbau kann aber etwas mehr Zement benötigen als ein entsprechender Beton aus neuem Aggregat. Dies kann dazu führen, dass geringere Umweltbelastung aus der Produktion von Recyclingaggregat im Vergleich zu Rundkies überkompensiert werden und der Recyclingbeton schlechter abschneidet als der konventionelle Beton (CC). Zudem ist auch zu betrachten, dass Recyceln nicht nur mineralisches Material sondern auch Eisenschrott (von der Armierung) bereitstellt und auch einen Entsorgungsprozess überflüssig macht. Diese Aspekte wurden in den meisten bisherigen LCA Studien nicht berücksichtigt, was in diesen oft zu einem zu schlechten Abschneiden der Recyclingoption führte.

Die Frage ob Recycling ökologisch sinnvoll ist wurde mittels der Methode der Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz oder Englisch „Life Cycle Assessment“ (LCA) genannt, beantwortet. Es wurde die Produktion von jeweils einem Kubikmeter Beton für ein Innenbauteil, ein Aussenbauteil, und Magerbetonanwendungen untersucht. Für alle Anwendungen wurde konventioneller Beton mit Recyclingbeton mit unterschiedliche Zementmengen und verschiedenen Mengen von Recyclingaggregaten aus Betonabbruch und aus Mischabbruch verglichen. Die Bewertung der Umweltrelevanz erfolgt aufgrund zweier Indikatoren, die für die betrachteten Systeme besonders wichtig sind, nämlich Treibhauseffekt und Verbrauch von abiotischen Ressourcen, sowie aufgrund von zwei Indikatoren (Ecoindicator 99 und UBP), die versuchen sämtliche relevanten Umweltwirkungen in einer Zahl auszudrücken.

Mit Ausnahme der Treibhausgasemissionen schneiden alle Recyclingbetonvarianten (RC) bezüglich den Umweltauswirkungen deutlich besser ab als der konventionelle Beton (CC). Die Reduktionen liegen dabei zwischen 15% und 50%. Zudem konnte festgestellt werden, dass der Mehrzementbedarf von RC bezüglich CC auf etwa 10% limitiert werden muss, damit RC bezüglich allen Umweltaspekten besser abschneidet als ein entsprechender CC. Ebenso dürfen die Transportdistanzen für RC nicht wesentlich, das heisst maximal 15km, länger sein als die für CC.

Die Ergebnisse bestätigen, was auch schon in anderen Studien gezeigt wurde: Zement und Transporte sind die Hauptverursacher von Umweltbelastungen der Betonherstellung. Im Gegensatz zu den älteren Studien liessen sich aber wesentliche ökologische Vorteile für RC in strukturellen Betonanwendungen zeigen. Bisherige Studien vernachlässigten den Umweltnutzen durch die Vermeidung von Entsorgungsprozessen und durch die Rückgewinnung von Armierungsstahl, der durch die Produktion von RC verursacht wird. Diese Studie hingegen hat dies berücksichtigt und gezeigt, dass die Hauptunterschiede zwischen RC und CC von diesen vermiedenen Prozessen stammen.

## Synthese und Empfehlungen

### Synthese der Teilbereiche

Durch konsequentes Informieren der Bauakteure liesse sich im Hochbau längerfristig die Nachfrage nach RC-Beton von momentan 11% auf rund 50% (und bis zu 70% in Kombination mit Preisvorteilen) steigern. Dadurch könnten im Hochbau sämtlicher Betonabbruch sowie rund 50% des Mischabbruchs wiederverwertet werden. Ausserdem würden jährlich in der Schweiz rund 3 Mio t Kiesressourcen eingespart und rund 1.6 Mio m<sup>3</sup> Deponievolumen geschont werden. Letztlich könnte die gesamte durch die Betonproduktion verursachte Umweltbelastung um rund 15% gesenkt werden.

### Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Optimierung von Angebot und Nachfrage mineralischer Rückbaustoffe unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit eine vielschichtige Herausforderung darstellt. Die Empfehlungen berücksichtigen diese systemische Perspektive und lassen sich in drei Bereiche strukturieren: (i) Rahmenbedingungen; (ii) Ausbildung und (iii) Information.

Massnahmen im Bereich der *Rahmenbedingungen* liefern die Grundvoraussetzung für die Gewährleistung der Nachfrage. Normen und Gesetze zur Verwendung von RC mit Mischabbruchgranulat im Hochbau sind eine zentrale Rahmenbedingung für eine erhöhte Nutzung der künftig anfallenden Bauabfälle, werden aber momentan noch zu wenig wahrgenommen. Da die ökologische Nachhaltigkeit von RC bisher in Frage gestellt wurde, stellt deren Einbezug in die Normen, eine weitere zentrale Rahmenbedingung dar.

Massnahmen im Bereich der *Aus- und Weiterbildung* stellen einen zweiten wichtigen Aspekt dar. Hierbei soll der Schwerpunkt auf die Integration der Nutzung von Recyclingbaustoffen in den Ausbildungen der Architekten, Bauingenieure und Bauunternehmer auf der Ebene der Universitäten, Fachhochschulen und Berufsschulen gelegt werden. Dabei sollte insbesondere die statischen Eigenschaften von Recyclingbeton, die Anwendungsbereiche von Recyclingbeton mit Mischabbruch im Hochbau, die ökologische Bewertung von Recyclingbeton, künftige anfallende Mengen von Bauabfall, und der Einsatz von Recyclingbeton im Tiefbau behandelt werden.

Bei den *Informations- und Sensibilisierungsmassnahmen* stehen die Bauherren und die breite Bevölkerung im Vordergrund. Für die Bauherren sollten Informationsmaterialien bereitgestellt werden, die über Normen und Statik, Umweltbewertung, Demoprojekte und Anwendungsmöglichkeiten, Labels, sowie Kontaktpersonen im Zusammenhang mit Rückbaustoffen aufklären. Weiterhin sollten über Kanäle wie Fernsehen, Presse etc. positive Erfahrungen und Leuchtturmprojekte im Bereich Bauen mit RC publik gemacht und die Bevölkerung auf die positiven Effekte einer Wiederverwendung von Mischabbruch, aufmerksam gemacht werden.

# Résumé

## Introduction

### Contexte

La gestion durable des matériaux, aussi bien au niveau des ressources qu'à celui des déchets, est centrale pour le bon fonctionnement des sociétés occidentales. Dans les pays industrialisés, les matériaux de construction font partie des biens les plus consommés et les déchets de chantier contribuent aux plus grands flux de déchets. Cette problématique va probablement gagner en importance dans le futur pour cause d'augmentation de la population et de la surface d'habitation par personne, ainsi que d'augmentation de la densité des constructions et de diminution de l'espace disponible pour la mise en décharge. Une solution de plus en plus discutée consiste à retraiter les déchets de chantier minéraux en granulats recyclés pour la substitution du sable et du gravier naturel dans les secteurs du bâtiment et du génie civil. En Suisse, une grande partie des déchets de chantier minéraux dans le génie civil est réutilisée directement sur le chantier, tandis que les déchets de chantier provenant du bâtiment sont principalement mis en décharge ou réutilisés pour des utilisations de moindre valeur.

Pour pouvoir utiliser les matériaux de construction minéraux recyclés, il faut que leurs propriétés techniques soient comparables à celles des matériaux de construction conventionnels. En Suisse, l'utilisation de granulats recyclés a été progressivement intégrée dans les normes techniques depuis le milieu des années 90 et elle est aujourd'hui standardisée dans le bâtiment et le génie civil. Mais outre leurs propriétés techniques, les avantages écologiques des matériaux recyclés ont été remis en question, par exemple pour le béton recyclé qui requiert plus de ciment que les matériaux conventionnels. Bien que l'offre, les normes techniques et les projets pilotes parlent en faveur des matériaux de construction secondaires, les acteurs de la construction utilisent toujours majoritairement des matériaux conventionnels, surtout dans le bâtiment. Comme dans le futur on peut s'attendre à une augmentation de la quantité de déchets de chantier, l'écart entre l'offre potentielle et la demande en matériaux recyclés va encore augmenter.

## Question de recherche et procédure

### Objectif du projet et question de recherche

Le projet a comme objectif une optimisation de l'offre et de la demande en matériaux de construction minéraux recyclés (MCMR) et l'évaluation de cette optimisation d'un point de vue écologique. Ainsi, l'offre et la demande en matériaux de construction minéraux recyclés ont été analysées et modélisées. Suite à cela, des scénarios et stratégies pour une gestion écologique des matériaux de construction ont été développés et évalués. Les questions de recherche suivantes ont en particulier été développées :

- i. En se basant sur les matériaux de construction rendus disponibles, à quelles quantités et qualités de MCMR peut-on s'attendre et à quel moment?
- ii. De quels facteurs-clés dépend la demande en MCMR et comment peut-elle être influencée ?
- iii. Comment peuvent être optimisées l'offre et la demande de manière à ce qu'une charge environnementale minimale en résulte ?

### Procédure

Un cadre conceptuel contenant quatre modèles d'analyse a été développé pour intégrer de manière systématique les différentes perspectives des questions de recherche mentionnées plus haut : (i) un module pour les décisions concernant la demande, (ii) un module de flux de matériaux pour définir l'offre potentielle, (iii) un module offre/demande basé sur les agents ainsi que (iv) un module pour évaluer les conséquences sur l'environnement. Nous résumons ci-après les travaux et les résultats des différents secteurs.

## Résultats du module d'analyse

### Décisions concernant la demande et comportement des acteurs de la construction

Dans ce module, les questions suivantes ont été analysées :

- Qui décide de la demande en matériaux de construction recyclés ;
- Comment interagissent les acteurs de la construction et comment se comportent-ils, c'est-à-dire quels matériaux de construction sont recommandés et utilisés ;
- Pourquoi ces décisions sont-elles prises ?

Les acteurs-clés ont été identifiés grâce à une analyse acteurs/influence, leurs interactions ainsi que les critères de décision ont été récoltés par des interviews d'experts et des workshops et finalement leurs décisions ont été quantifiées au moyen d'un questionnaire.

Les maîtres d'ouvrage, les planificateurs de construction (architectes et ingénieurs) et les entrepreneurs (entreprises de construction) sont les acteurs-clés concernant la demande en matériaux de construction minéraux recyclés. Alors que dans le génie civil les maîtres d'ouvrages sont presque exclusivement publics, on différencie dans le bâtiment les maîtres d'ouvrage privés, commerciaux ou publics. Ces acteurs de la construction interagissent avec des implications répétées du maître d'ouvrage. Ce dernier peut donner aux planificateurs une première directive pour une construction durable. Les planificateurs développent ensuite le projet et donnent leurs recommandations au maître d'ouvrage, qui confirme le projet. Dans la phase suivante, les entrepreneurs sont intégrés via l'appel d'offre, par rapport auquel ils réagissent en soumettant une offre. En effectuant le choix final de l'offre, le maître d'ouvrage prend à nouveau une décision par rapport à qui reçoit le mandat et ainsi également quels matériaux sont demandés et finalement utilisés.

La demande en matériaux de construction recyclés dans le bâtiment se situe à environ 10% (à l'exception des maîtres d'ouvrage publics avec ~30%) et est ainsi nettement plus basse quand dans le génie civil (>30%). De plus, les professionnels de la construction (architectes, ingénieurs et entrepreneurs) dans le secteur du bâtiment recommandent des matériaux de construction réutilisés à un taux d'environ 16%, ce qui est nettement moins que ce que recommandent les ingénieurs et entrepreneurs dans le génie civil (>40%). De plus, la différenciation évidente entre les différents types de matériaux de construction recyclés et leur utilisation pour différentes applications prouve que le secteur du génie civil a une connaissance plus étendue de ce type de matériau. Par ailleurs, la différence dans le bâtiment entre l'encouragement pour une construction durable (~60%) au début du processus de construction et la demande finale pour des matériaux recyclés (~10%) est particulièrement criante.

En ce qui concerne les critères de décision et leur pondération, les acteurs de la construction du génie civil et du bâtiment ont des jugements très similaires. Ainsi, la demande en matériaux de construction recyclés dans ces deux secteurs est principalement influencée par les mêmes critères. Les aspects écologiques sont à peine évoqués, ou alors exclusivement au début du processus, tandis que les aspects techniques ou économiques ainsi que les recommandations et spécifications des acteurs en amont dans la chaîne de décisions jouent un rôle important. A l'exception des ingénieurs, tous les acteurs de la construction s'appuient fortement sur ce critère d'interaction pour les décisions spécifiques aux matériaux. En tant que point de départ de la chaîne de décisions, les ingénieurs se décident principalement sur la base des normes et des lois ainsi que sur leur expérience – la plupart du temps pour des matériaux traditionnels dans le bâtiment.

En conclusion, nous pouvons dire que les matériaux de construction recyclés sont déjà bien établis dans le génie civil, tandis que le béton recyclé est toujours un produit de niche dans le bâtiment. Une spécification pour une construction durable au début du processus de construction semble avoir très peu d'influence sur les décisions ultérieures touchant aux matériaux. Ces décisions sont influencées tout d'abord par les interactions avec les autres acteurs de la construction, particulièrement avec les ingénieurs, dont les décisions se basent avant tout sur les normes et l'expérience. L'importance des critères

d'interaction montre qu'une évaluation des groupes d'acteurs isolés montrerait seulement une image incomplète, d'où l'utilité d'effectuer une modélisation de tous les groupes et de leurs interactions.

### **Analyse des flux de matière**

Il ne serait pas judicieux d'analyser des scénarios de gestion des matériaux de construction sans prise en compte des flux de matières recyclables en provenance des chantiers (offre), puisque seuls les matériaux disponibles peuvent être réutilisés. Ainsi, dans ce module, les modèles existants de flux de matières (principalement dans le secteur du bâtiment) ont été adaptés et finalement intégrés dans le modèle offre/demande. Les deux aspects suivants ont été analysés : (i) quels volumes vont être demandés pour les applications concernées et (ii) quels volumes et qualités de matériaux de construction recyclés peuvent potentiellement être mis sur le marché et à quel moment en considérant les flux de matières prévus.

Une méthodologie simplifiée de modélisation des flux de matières, basée en grande partie sur des études existantes, a été utilisée dans ce projet. Ce modèle s'appuie sur les investissements de construction pour différents types de bâtiments, sur la composition matérielle de ces bâtiments ainsi que sur les volumes de déchets de chantier calculés dans des études existantes. Différents scénarios d'investissement dans la construction ont été développés pour la modélisation.

Les petites quantités de béton maigre pouvant être potentiellement demandées démontrent que seule une petite fraction des matériaux de démolition peut être utilisée en tant que béton maigre. Au vu de la demande généralement en diminution dans le génie civil et des réticences des acteurs du génie civil envers les matériaux recyclés provenant du bâtiment, il paraît nécessaire de viser l'utilisation du béton recyclé dans des applications du bâtiment en tant que béton de construction. De plus, la quantité de matériaux de démolition non triés est trois fois plus grande et presque deux fois plus importante en poids que la quantité de béton de démolition. Les volumes de mise en décharge pour matériaux inertes étant en diminution, cela signifie que des possibilités d'utilisations alternatives plus nombreuses doivent être trouvées pour les quantités croissantes de matériaux de démolition.

La comparaison entre l'offre potentielle en matériaux de construction secondaires et la demande dans les différents scénarios démontre qu'avec la demande actuelle (~11%) seule une petite fraction du béton de démolition et du matériau de démolition non trié (MD-N) serait réutilisé. Dans un scénario avec 50% d'utilisation de béton recyclé parmi toutes les utilisations de béton, ce béton recyclé étant constitué de 40% d'agrégats substitués et d'une part d'environ 50% de béton recyclé à partir de matériaux non triés (BR-N), le béton de démolition serait pratiquement complètement réutilisé et le MD-N le serait à environ 50%. Dans un scénario dans lequel le béton recyclé devient le standard pour toutes les applications dans le bâtiment (100%), avec un taux d'agrégats substitués de 40% et environ 70% de MD-N, tous les déchets de chantier (MD-N et BR-N) seraient réutilisés dans le bâtiment.

Les possibilités d'utilisations alternatives sont à considérer de plus près, particulièrement pour les matériaux de démolition non triés, car les réutilisations et les mises en décharge traditionnelles sont limitées. En plus de l'augmentation continue de la demande en béton recyclé, les taux de substitution (c'est-à-dire combien de gravier/sable naturel est substitué par des agrégats recyclés) sont déterminants pour une utilisation complète de l'offre potentielle en agrégats recyclés. La part de BR-N doit cependant aussi être augmentée pour que des quantités importantes de MD-N puissent être absorbées.

### **Modélisation offre/demande basée sur les agents**

Les acteurs de la construction déterminant la demande en matériaux recyclés ont été identifiés plus haut, et leurs interactions, comportement et décisions ont été analysés. Les quantités demandées par l'utilisation de béton et l'offre potentielle en matériaux de construction secondaires ont également été déterminées. La question qui se pose dans ce module est comment les décisions des acteurs de la construction impliqués peuvent

être influencées, l'objectif étant que la demande en matériaux réutilisés soit maximale et que le potentiel des ressources secondaires soit exploité entièrement. Nous considérons que dans un modèle réaliste d'offre et de demande, cette dernière devrait être limitée par l'offre potentielle.

Le système sociotechnique de la demande en matériaux de construction a été représenté par un modèle basé sur les agents. La modélisation basée sur les agents (ABM, Agent-based modeling) est basée sur l'idée que le comportement du système provient des actions et des interactions locales des acteurs (« agents »). ABM est particulièrement indiquée quand les groupes d'acteurs sont hétérogènes ou que leurs interactions jouent un rôle central pour le problème considéré. Ces deux propriétés s'appliquent aux acteurs de la construction interagissant en Suisse, comme l'ont montré les analyses précédentes. Pour développer le modèle, nous avons commencé avec des modèles très simples et augmenté successivement la complexité de manière à ce que d'une part le modèle conceptuel représente de manière réaliste les décisions et les interactions (validation conceptuelle) et que d'autre part le comportement au niveau du système montre des résultats plausibles (validation opérationnelle).

Les analyses de sensibilité ont démontré que la notoriété du béton recyclé est centrale pour la demande, beaucoup plus que les critères de décisions et leur pondération. Un aspect central était ainsi l'association ou non de la construction durable avec des matériaux recyclés auprès des ingénieurs et architectes. De plus, la demande est très élastique au niveau du prix dans une fourchette d'environ +/- 20% (différence de prix entre le béton conventionnel et recyclé). La demande ne semble pas élastique pour les plus grandes différences de prix entre les matières conventionnelles et recyclées.

Les sensibilités au niveau de la demande donnent une première indication sur les combinaisons de paramètres qui pourraient entraîner une augmentation de la demande. Comme les paramètres ne sont pas tous appropriés en tant que mesures de régulation, les scénarios suivants ont été développés :

- 1) Information: augmentation de la connaissance de la construction durable et des matériaux recyclés auprès des maîtres d'œuvres, architectes et ingénieurs,
- 2) Pouvoirs publics: construction durable prise en considération pour tout projet public,
- 3) Incitations économiques: avantage de prix du béton recyclé en tant que matière première (10%),
- 4) Information et incitations économiques,
- 5) Combinaison: information combinée avec incitations économiques et meilleurs standards.

La part de béton recyclé pourrait être augmentée à près de 50% par le seul scénario « information », tandis que les incitations économiques et les pouvoirs publics considérés de manière individuelle ont peu d'impact sur la demande. A nouveau, il apparaît clairement qu'une association de différentes mesures est la stratégie la plus efficace. Une combinaison du scénario « information », déjà efficace, avec un léger avantage de prix, augmenterait la demande en béton recyclé de 20% de plus. Cette combinaison permettrait d'optimiser l'offre et la demande de manière à ce que 100% du béton de démolition et 50% du matériau de démolition non trié soit réutilisé.

## Evaluation environnementale

Il a jusqu'ici été considéré que recycler fait sens du point de vue écologique et donc qu'une augmentation du recyclage des matériaux de construction était à favoriser. Les avantages écologiques des matériaux recyclés sont peu remis en question dans le génie civil, de par leur réutilisation sur le site même. Dans le bâtiment, deux aspects sont importants pour comparer l'impact environnemental global du béton traditionnel et recyclé. D'une part, le béton recyclé utilisé pour des applications nobles telles que des murs intérieurs ou extérieurs peut demander plus de ciment qu'un béton constitué d'agrégats conventionnels. Cela peut entraîner plus d'impact environnemental du béton recyclé par rapport au conventionnel car les effets environnementaux positifs du béton recyclé peuvent être surcompensés par le besoin accru de ciment. D'autre part, le recyclage des déchets de chantier ne produit pas seulement des agrégats minéraux, mais aussi de la ferraille (provenant des armatures) et fait ainsi l'économie du processus d'élimination. Ces aspects n'ont pas été considérés dans la plupart des analyses de cycle de vie (ACV) à ce

jour, ce qui mène à des impacts environnementaux plus hauts pour le béton recyclé comparé au béton conventionnel.

Les bénéfices environnementaux potentiels du recyclage des déchets de chantier minéraux ont été analysés au moyen de la méthode de l'analyse de cycle de vie, aussi appelée écobilan ou en anglais LCA (Life Cycle Assessment). La production d'un mètre cube de béton pour respectivement un élément de construction intérieur, un élément de construction extérieur et une utilisation de béton maigre a été analysée. Pour toutes les utilisations, le béton conventionnel a été comparé avec du béton recyclé constitué de différentes quantités de ciment et de différentes quantités d'agrégats recyclés de béton de démolition et de matériaux non triés. L'évaluation de la pertinence environnementale se base sur deux indicateurs qui sont particulièrement importants pour le système concerné, à savoir le potentiel d'effet de serre et l'utilisation de ressources abiotiques, et deux indicateurs (Ecoindicator 99 et UBP) qui visent à résumer tous les effets environnementaux pertinents dans un chiffre.

Toutes les variantes de béton recyclé (BR) font nettement mieux que le béton conventionnel (BC) en ce qui concerne les effets environnementaux, sauf pour les émissions de gaz à effet de serre. Les réductions sont de l'ordre de 15% à 50%. De plus, il a été déterminé que le besoin de ciment supplémentaire pour le BR par rapport au BC doit être limité à environ 10% pour que le BR soit meilleur que le BC pour tous les aspects environnementaux. Les distances de transport pour le béton recyclé ne devraient également pas être significativement plus longues (maximum 15 km) que pour le BC.

Les résultats confirment ce qui a également été prouvé dans d'autres études : le ciment et les transports sont les plus grandes causes de nuisances environnementales dans la fabrication de béton. Cependant, contrairement aux études antérieures, des bénéfices environnementaux évidents ont été prouvés pour le BR par rapport au BC pour les applications de béton structurel. Les anciennes études négligeaient les bénéfices environnementaux dus à l'évitement des processus de mise en décharge et à la récupération de l'acier d'armature, qui sont engendrés par la production de BR. Cette étude inclue ces aspects et montre que la plupart des différences dans l'évaluation environnement du BR peuvent être reliées à ces impacts environnementaux négligés.

## Synthèse et recommandations

### Synthèse des secteurs

La demande en béton recyclé dans le secteur du bâtiment pourrait être augmentée d'actuellement 11% à environ 50% à long terme par une information systématique des acteurs de la construction (et jusqu'à 70% en combinaison avec des incitations économiques). Ainsi, tout le béton de démolition et environ 50% des matériaux non triés du secteur du bâtiment pourraient être revalorisés. De plus, 3 millions de tonnes de ressources en gravier pourraient être économisées en Suisse chaque année, ainsi qu'environ 1.6 millions de m<sup>3</sup> de volumes de mise en décharge épargnés. Finalement, la charge environnementale globale provoquée par la production de béton pourrait être diminuée d'environ 15%.

### Recommandations pour une gestion durable des matériaux de construction

La présente recherche a démontré qu'une optimisation de l'offre et de la demande en matériaux de construction minéraux recyclés en prenant en compte la durabilité écologique présente des enjeux variés. Les recommandations prennent en compte cette perspective systémique et sont structurables en trois domaines : (i) conditions-cadres ; (ii) formation et (iii) information.

Les mesures dans le domaine des *conditions-cadres* livrent les conditions préalables pour garantir la demande. Les normes et lois réglant l'utilisation du BR à partir de granulats de matériaux de démolition non triés dans le bâtiment sont une condition-cadre centrale pour une demande accrue de BR et donc une réutilisation plus grande des futurs flux de déchets de chantier. Elles sont cependant actuellement trop peu valorisées.

Comme la durabilité écologique du BR a été par le passé remise en question, sa prise en compte dans les normes représente une autre condition-cadre centrale.

Les mesures dans le domaine de *la formation et du perfectionnement professionnel* représentent un second aspect important. Il s'agit ici de mettre l'accent sur l'intégration de l'utilisation des matériaux de construction recyclés dans la formation des architectes, ingénieurs civils et des entrepreneurs de la construction au niveau des universités, hautes écoles et écoles des métiers. Les propriétés statiques du béton recyclé, les domaines d'utilisation du béton recyclé avec des matériaux de démolition non triés dans le bâtiment, l'évaluation écologique du béton recyclé, les quantités prévues de déchets de chantier et l'utilisation du béton recyclé dans le génie civil devraient être traités.

Les maîtres d'œuvre et la population au sens large sont concernés par les mesures *d'information et de sensibilisation*. Du matériel d'information devrait être mis à disposition des maîtres d'œuvre, traitant des normes et de la statique, de l'évaluation environnementale, de projets de démonstration et de possibilités d'utilisation, des labels, ainsi que de personnes de contact en rapport avec les matériaux de construction réutilisés. De plus, il faudrait rendre public les expériences positives et les projets-phares dans le domaine de la construction avec du BR via des canaux tels que télévision ou presse, et attirer l'attention de la population sur les effets positifs d'une réutilisation des déchets de chantier.

# Summary

## Introduction

### Background

Sustainable management of construction materials is from a resource as well as the from a waste management perspective a key issue for the well-functioning of western societies. In industrialized countries, construction materials are among the most heavily consumed goods (in weight) and construction and demolition (C&D) waste are among the highest waste flows. These issues are likely to become problematic in the future due to a continuously growing population, increasing space demand per person, increasing construction density, and limited landfill capacities. A possible solution is to reuse aggregated from C&D waste to substitute natural aggregates in civil and structural engineering. In Switzerland, this has been already practiced in civil engineering, where large volumes of mineral C&D waste are currently reused onsite. In contrast, C&D waste from structural engineering (i.e. buildings) is usually down-cycled (i.e. used in low-grade applications such as lean concrete) or landfilled.

To be able to use recycled mineral construction materials (RMCM) their technical properties should be comparable to the ones of conventional construction materials. In Switzerland, since the mid 90ties the reuse of recycled aggregates has been increasingly included in technical norms and today it is standardised in civil and structural engineering. Besides potential drawbacks regarding its technical properties, the potential environmental benefits of RMCM have been questioned; as for example recycling concrete requires more cement than conventional construction materials. Today construction actors, in particular in structural engineering, still prefer conventional materials to RMCM; despite the availability of recycling aggregates, technical standards, and pilot projects showing the potential of RMCM. With increasing of C&D waste in the future, the gap between potential supply and demand of RMCM is expected to increase.

## Research questions and procedure

### Goal and research questions

The project aims at aligning supply and demand of recycled mineral construction materials (RMCM) and assessing the alignment from an ecological perspective. Doing so, supply and demand of RMCM are analysed and modelled, and scenarios and strategies for a sustainable construction material management are developed and assessed. In particular the following research question are addressed:

- i. What type and amount of recycling construction material will be available from the Swiss civil and structural engineering stock, under different scenarios? (Supply)
- ii. What are the key parameters affecting the demand for mineral recycling construction materials (RMCM)? (Demand)
- iii. How could supply and demand be aligned with a minimal ecological impact?

### Procedure

For consistently integrating the different perspectives of the research questions mentioned above a conceptual framework was developed, which contains four modules: (i) a module concerned with the decisions regarding the demand of RMCM, (ii) a material flow module analysing the potential supply, (iii) an agent-based demand and supply modelling module, and (iv) a module assessing the environmental impacts of RMCM. In the following the results from the individual modules are summarised.

## Results

### Decisions and behaviour of construction actors regarding the RMCM

This module was concerned with the following research questions:

- Who are the key actors deciding about the demand for RMCM;
- How do these construction actors interact and behave, (i.e. which construction materials were recommended and used); and
- Why do they decide like this?

Key actors were identified in an actor-impact analysis, their interaction and decision criteria were determined in expert interviews and expert workshops, and decisions and behaviour of construction actors were quantified in a survey.

Awarding authorities (i.e. principal agents), architects, engineers and contractors were identified as the key actors determining the demand for RMCM. Mainly public awarding authorities construct in civil engineering while in structural engineering private, commercial and public were analysed. Construction actors interact with each other. During this process the awarding authorities are involved several times. Being at the beginning of the chain, awarding authorities can make an initial specification for sustainable construction to architects and engineers. Architects and engineers then design the project and give their recommendation back to the awarding authorities. In the next phase constructors get involved in the tendering process, by submitting their tender according to the tender documents. With the final tender selection again the awarding authority decides which offer to take, and thus which materials are demanded and used.

With the exception of public awarding authorities (~30%) the demand for RMCM is generally lower in structural engineering (~10%) compared to civil engineering (>30%). Construction experts in structural engineering (i.e. architects, engineers and contractors) recommend clearly less RMCM (~16%) than engineers and contractors in civil engineering (>40%). Furthermore, the clear differentiation between different types of RMCM and their allocation to different applications shows the prevalent RMCM know-how in civil engineering. Structural engineering, in contrast, shows a large discrepancy between the initial call for sustainable construction (~60%) from the awarding authorities and the final demand for RMCM (~10%).

Regarding decision criteria and criteria weights, construction actors in civil and structural engineering are fairly similar. In both construction sectors, the demand for RMCM is determined by the same criteria. Ecological aspects are mostly neglected, while technical and economic aspects, and in particular recommendations of other actors (interaction criteria) were important throughout the actor interaction chain. With the exception of engineers, all material specific decisions were strongly affected by the interaction criteria. Engineers, standing at the beginning of this interaction chain, mainly decide based on their experience and norms and standards and neglect the wishes of the awarding authority, which results in a clear preference for conventional materials in structural engineering at least.

In summary, RMCM are well established in civil engineering, while recycling concrete in structural engineering is still a niche product. Specifying sustainable construction at the beginning of the construction process has little influence on the subsequent material specific decisions. The latter are primarily determined by the interaction with other actors, in particular with the engineers, which mainly decide based on norms, standards and their experience with RMCM. The importance of the actor interactions and the interaction criteria in each decision shows, that analysing individual actor groups will provide an incomplete picture of the demand for RMCM, and modelling the interacting actor groups is required.

### Material flow analysis

Assessing construction material management scenarios without considering the C&D waste flows (supply) might be misleading, since only available materials can be reused. By adapting existing construction materials stock and flow models, this module provides

the basis for the subsequent integrated supply-demand model, concentrating on structural engineering. The following two aspects were analysed; (i) what volumes of the concerned applications will be demanded, and (ii) what volumes and qualities of RMCM could potentially be supplied considering the expected C&D waste flows.

Within this project a simplified material flow modelling methodology was applied, which primarily draws from existing studies. The model is based on construction investments in different building types, the material composition of those buildings, and C&D waste volumes derived from existing studies. For future projections different construction investment scenarios were developed.

The relatively small amount of potential lean concrete applications shows that only a tiny fraction of C&D waste could be reused as lean concrete. Considering the generally decreasing demand from civil engineering and the reservation of civil engineering actors against recycling materials from structural engineering, recycling concrete for structural applications seems to be the only solution for the construction waste coming from structural engineering. Furthermore, the amount of mixed rubble is almost three times the volumes (and about twice the weight) of concrete rubble. This indicates, that with decreasing landfill capacities there is a need for alternative applications for the increasing mixed rubble streams.

A comparison of the potential supply of RMCM with demand for RMCM in different scenarios shows, that with the current demand (~11%) only a fractional amount of potential the mixed and concrete rubble supply would be reused. In a scenario, where in 50% of all concrete applications recycled concrete (RC), with 40% substituted aggregates and about 50% recycling concrete with mixed rubble aggregates (RC-M), is applied; concrete rubble could be completely and mixed rubble up to 50% reused. In a scenario where RC becomes the standard for all structural engineering applications (100%), with a 40% aggregate substitution rate and ~70% RC-M, all C&D waste (concrete and mixed rubble) streams could be reused within structural engineering.

Alternative reuse opportunities, in particular for mixed rubble have to be considered, since traditional reuse and disposal routes are limited. Besides a continuous increase of the demand for recycled concrete (RC), a higher substitution rate for aggregates (i.e. fraction of natural aggregates substituted by recycled aggregates) is important for tapping the full supply potential of RMCM. Finally, the fraction of RC-M has to be increased to catch the significant and increasing volumes of mixed rubble.

### **Agent based supply-demand modelling**

So far, relevant construction actors regarding the demand for RMCM were identified, and their interaction, behaviour and decision-making were analysed. In addition, the amount of concrete applications that will be demanded and the potential supply of RMCM were determined. This module is now concerned with how the decisions of the interacting construction actors could be influenced, to increase the demand for RMCM until reaching the full potential of RMCM supply, based on available C&D waste. We consider that in a realistic supply-demand model demand should be limited by the potential supply.

The socio-technical system of construction material management was represented in an agent-based model. Agent-based modelling (ABM) is based on the idea of emerging system behaviour from local interactions of actors or "agents" respectively. ABM is seen to be appropriate if actor groups are heterogeneous, and local interaction is particularly important for the issue considered. Previous analysis showed that both attributes are pronounced for Swiss construction actors. The iterative model development phase started with simple prototype models, subsequently the complexity was increased until the conceptual model of actors' decisions and interaction could be realistically represented (conceptual validation), and the plausible results on a systemic level were reached (operational validation).

The sensitivity analysis showed that the awareness of construction actors' regarding RMCM was the most important criterion for an increased demand for RMCM, much more

than decision criteria or criteria weightings. Thereby a key aspect was whether architects and engineers associated of sustainable construction (often specified by awarding authorities) with RMCM or not. Furthermore, demand for RMCM seems to be price sensitive around about +/- 20% (price difference between RC and conventional concrete (CC)), while bigger price differences had no additional effect on the demand.

Sensitivities of the demand give first insights about which parameter combinations could lead to an increased demand. However, since not all parameters are appropriate as policy measures, the following scenarios were developed;

- 1) Information: increased awareness of awarding authorities, architects and engineers regarding sustainable construction and RMCM,
- 2) Public initiative: all public construction projects consider RMCM as an option,
- 3) Economic incentives: 10% price advantage of RC compared to CC,
- 4) Information and economic incentives combined,
- 5) Combined: information, economic incentives and better standards.

The information scenario alone would increase the share of RMCM up to almost 50%, while economic incentives and public initiative alone have little impact on the demand. Once again it becomes clear that bundling different measures is the most effective strategy. A combination of the already effective information scenario with a slight price advantage would boost the demand for another 20%. This combination would align supply and demand insofar, that all concrete rubble and about 50% of the mixed rubble could be reused.

### **Environmental impact assessment**

Scholars have assumed clear environmental benefits of RMCM compared to conventional materials and consequently from an environmental perspective, increasing the demand for RMCM would be the primary goal. In civil engineering, where most of the reuse is done onsite, environmental benefits of RMCM are usually undoubted. In structural engineering two aspects are relevant when comparing the overall environmental impact of RC and CC. First, recycling concrete (RC) for high-grade applications like supporting indoor or outdoor walls in structural engineering, however, might require additional amounts of cement compared to conventional concrete (CC). This could lead to higher environmental impacts of RC compared to CC as the positive environmental impacts of RC might be overcompensated by the additional need for cement. Second, C&D waste recycling does not only produce mineral aggregates but also iron scrap for recycling, and avoids several disposal processes. These aspects have been neglected in most previous life-cycle assessments studies, leading to higher environmental impacts for RC compared to CC.

Potential environmental benefits of C&D waste recycling and its reuse in RMCM was analysed with the life cycle assessment (LCA) methodology. As a functional unit, one metre cube of structural concrete for an indoor, an outdoor, and a lean concrete application were analysed. For all applications CC was compared with RC using different amounts of cement, aggregate substitution rates, and aggregate types (e.g. mixed and concrete rubble). The environmental impact assessment was conducted using two indicators of particular importance for the system considered, global warming potential (GWP) and abiotic resource use, and two end-point indicators combining all relevant environmental impacts into one number (Ecoindicator 99 und UBP).

All RC mixtures have clear environmental benefits compared to CC regarding all indicators with the exception of GWP. The reductions of the environmental impacts were between 15% and 50%. The results show as well that to ensure environmental benefits for RC regarding all indicators, the additional amount of cement required for RC compared to CC should be limited to about 10%. Similarly additional transport distances for RC should not exceed 15km compared to CC.

The results confirm that cement and transport are the main contributors to the environmental impacts of the concrete production. In contrast to previous studies, clear environmental benefits for recycling concrete (RC) compared to conventional concrete (CC) for structural concrete application could be demonstrated. Previous studies neglect the environmental benefits of avoided disposal processes and iron scrap mining through the C&D

waste recycling and RC production. This study includes these aspects and shows that most of the differences in the environmental assessment of RC can be related to the neglected environmental impacts.

## Synthesis and recommendations

### Synthesis

With consequent information and awareness rising of construction actors in structural engineering the demand for RMCM could be increased from currently 11% to about 50% (and up to 70% in combinations with prize incentives). This could lead to a complete reuse of concrete rubble and 50% of the mixed rubble tonnages. In such a scenario 3 Mio tonnes natural gravel resources could be conserved and about 1.6 Mio m<sup>3</sup> landfill volumes preserved. Finally the environmental impacts of the total concrete production in Switzerland could be reduced by about 15%.

### Recommendations for a sustainable construction material management

This study showed that a sustainable alignment of supply and demand of recycled mineral construction materials (RMCM) is a multi-faced endeavour. The recommendations consider this systemic view and are structured into the following three areas: (i) framework conditions, (ii) education, and (iii) information.

*Measures in the area of framework condition* provide the basis for an increased demand in the long run. Norms and standards regulating the use of recycled concrete with mixed rubble aggregates (RC-M) in structural engineering are a central enabler for an increased demand for RC and accordingly an increase reuse of future C&D waste streams. These norms and standards are currently not perceived equivalently to conventional standards. Since environmental benefits of RC have been questioned, their inclusion in norms and standards is an important framework condition.

Measures in the *educational sector* are a second important aspect for a sustainable management of construction materials. Thereby, the focus should be on integrating the use of recycling concrete (RC) in the education of architects, engineers, and contractors in universities, applied and professional colleges. In particular the technical properties of RC, the application opportunities of RC-M in structural engineering, ecological benefits of RC, expected future C&D waste streams, and RC applications in civil engineering should be addressed.

Awarding authorities and the general public are addressed with *information and awareness rising* measures. Awarding authorities should be provided with appropriate information material regarding norms and static behaviour of RMCM, their environmental impact assessment, application opportunities and demonstration projects, labels including the use of RMCM, and expert contacts for clarification of issues related to RMCM. The general public has to be addressed through broad media streams such as television, print media and online publications, in which reference projects with RMCM and the positive aspects of reuse of C&D waste to substitute aggregates should be highlighted.



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und bestehende Arbeiten

### Überblick

Nachhaltiges Baustoffmanagement ist sowohl aus der Ressourcen- als auch aus der Abfallperspektive zentral für das Funktionieren westlicher Gesellschaften. Einerseits zählen Baumaterialien nach Wasser zu den weltweit am meisten konsumierten Produktionsgütern und sind für beinahe 50% der global extrahierten Ressourcen verantwortlich [1], andererseits gehört Bauabfall gewichtsmässig mit bis zu 50% zu den grössten Abfallströmen in Industrienationen [2].

Aufgrund wachsender Weltbevölkerung und vermehrt verdichteter Bauweise wird mit einer Verschärfung der Problematik gerechnet, die einen ansteigenden Bedarf an primärer Ressourcen und ansteigenden Bauabfallströmen zur Folge hat [2-5]. Des Weiteren wird der traditionelle Entsorgungsweg von Bauabfall in Deponien immer mehr in Frage gestellt. Dies geschieht einerseits aufgrund knapper werdender Deponievolumen [6] und andererseits aufgrund von Vorbehalten bezüglich der Umweltauswirkungen von Bauabfalldeponien [7, 8].

In Industrienationen ist der Löwenanteil der Baustoffe (Beton, Mauerwerk, Strassenbeläge und Foundationsschichten) und somit auch der Bauabfälle mineralisch. Die Aufbereitung und Wiederverwertung dieses mineralischen Bauabfalls als Substitut für natürliche Aggregate (Kies und Sand) wird vermehrt als Option zur Schonung natürlicher Ressourcen, Limitierung der Abfallströme und Minimierung der Umweltauswirkungen in der Gewinnung natürlicher Aggregate diskutiert [9-11].

### Baustoffflüsse in der Schweiz

In der Schweiz ist Bauabfall mit Abstand (rund 70%) die grösste Abfallfraktion. Diese umfasst Aushubmaterial, mineralischen Bauabfall und brennbare und andere Abfälle. Dabei ist das Aushubmaterial mit jährlich 60-80 Mio t mit Abstand die grösste Fraktion [14]. Der Rest wird von 85% mineralischem Bauabfall<sup>1</sup> dominiert, während sich die restlichen 15% auf Glas, Gips, Keramik, Metalle und Holz verteilen [12-15]. Aufgrund einer Verknappung der Deponievolumen [6, 16] sowie einer verdichteten Bauweise [10] wird erwartet, dass die Bauabfallmengen künftig weiter ansteigen [17-19]. In einem „Business-as-usual-Szenario“ wird davon ausgegangen, dass die Bauabfallmengen von heute rund 11 Mio t auf ca. 20 Mio t im Jahr 2050 ansteigen werden [20].

**Abb. 1** zeigt die geschätzten Baustoffflüsse im Jahr 2000 in der Schweiz. Jährlich werden rund 68 Mio t Baustoffe verbaut, davon sind rund 11% recycelte Baustoffe [20]. 4,5 Mio t Material werden direkt auf der Baustelle wiederverwendet. Zudem werden 3 Mio t nach Behandlung in externen Recyclingprozessen wieder dem Bauwerk zugeführt. Somit werden jährlich immer noch ca. 3 Mio t deponiert und 0,5 Mio t thermisch entsorgt.

Die direkte Wiederverwertung im Tiefbau ist zu einem Grossteil für die vergleichsweise hohe (rund 70%) Recyclingrate im gesamten Bausektor verantwortlich. Schweiz weit werden Bauabfälle aus dem Hochbau mehrheitlich deponiert oder für minderwertige Anwendungen (z. B. Magerbeton) wiederverwendet [20]. Dies hat sich jedoch in den letzten 10 Jahren regional stark verändert und Regionen mit entsprechender Infrastruktur recyceln heute bis 95% des Bauabfalls aus dem Hochbau. Damit liegt die Schweiz im internationalen Vergleich im Mittelfeld, wobei hingegen Holland als Spitzenreiter mineralische Bauabfälle zu 96% recycelt [3].

### Materialeigenschaften und Normierung

Die Wiederverwertung von Bauabfällen als Substitute für natürliche Aggregate verlangte in einem ersten Schritt die Sicherstellung der technischen Machbarkeit. Umfangreiche Labor- und Praxistests zeigten, dass heutige Recyclingbaustoffe<sup>2</sup> mit konventionellen

<sup>1</sup> Mineralischer Bauabfall umfasst Betonabbruch, Mischabbruch, Ausbauasphalt, und Strassenabbruch gem. BAFU (2006)

<sup>2</sup> Da in bestehenden Normen und Standards keine einheitliche Terminologie gefunden wurde, werden innerhalb dieses Berichts Recyclingbaustoffe und Rückbaustoffe als Synonyme verwendet.

Baustoffen vergleichbare Eigenschaften erreichen [21-23]. Dies wurde bei ersten Anwendungen vor allem für den Einsatz von Recyclingbeton als Konstruktionsbeton in Frage gestellt. Bei fachgerechter Verarbeitung reichen diese Eigenschaften aber zumindest für einen Grossteil der heutigen Anwendungen aus [24]. Seit Mitte der 90er Jahre wird die Wiederverwertung von mineralischen Bauabfällen zunehmend in die Normen- und Gesetzgebung einbezogen. So wurden beispielsweise die ökologischen Anforderungen an eine Wiederverwertung in einer Richtlinie vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) festgelegt [15] und die Verwendung der verschiedenen mineralischen Abfallfraktionen in Normen des Verbands Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) geregelt [25-29]. 2010 hat der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA), mit dem SIA Merkblatt 2030 Recyclingbeton, eine der letzten normativen Lücken bezüglich der Anwendung von Recyclingbeton geschlossen [30]. Darüber hinaus wurden mineralische Recyclingbaustoffe auch als Kriterium in das MinergieEco Label aufgenommen [31].

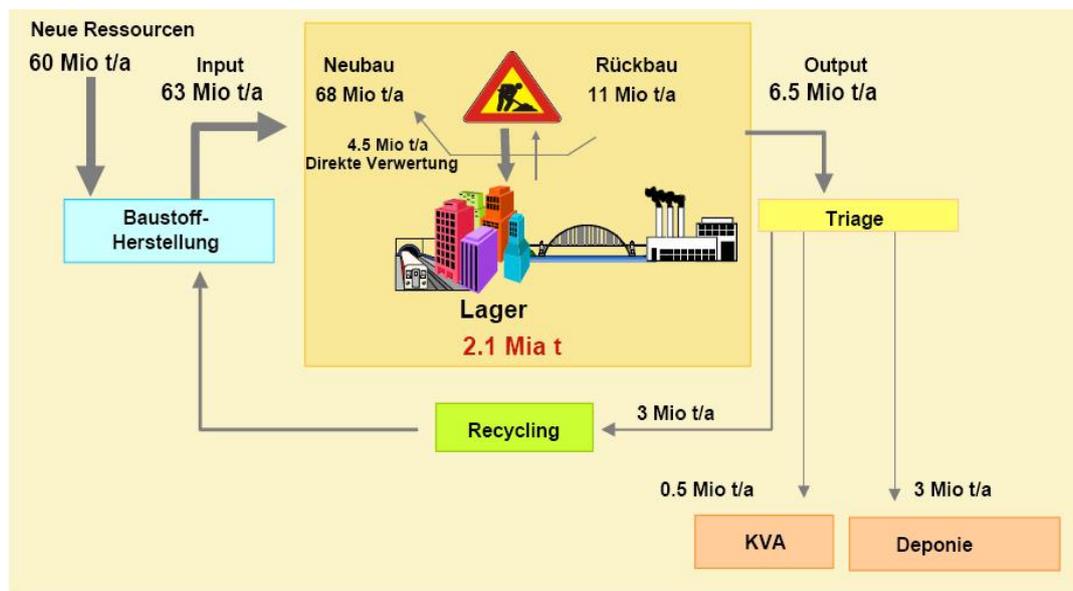


Abb. 1: Baustoffflüsse 2000, Quelle: Baustoffmanagement 21 [20]

### Umweltauswirkung und Ökobilanzierung

Da ein Grossteil der Wiederverwertung im Tiefbau vor Ort geschieht und Aggregate, wie zum Beispiel Recycling-Kies-Sand und alluvialer Kies, vergleichbare Eigenschaften haben, sind die ökologischen Vorteile von Recycling hier wenig bestritten [32-34]. Die Ausnahme ist die Problematik von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) für Recycling von teerhaltigen Belägen [35, 36]. Die VSS Richtlinie SN 670 141 untersagt daher die Wiederverwertung von stark teerhaltigen Belägen [26].

Im Hochbau benötigen unterschiedliche Aggregateigenschaften wie zum Beispiel die grössere Oberfläche von Betongranulat im Vergleich zu alluvialem Kies andere Mischungsverhältnisse oder Produktionsschritte. So benötigt etwa Recyclingbeton (RC<sup>1</sup>) mehr Zement und andere Zementwasserwerte, um auf der Endproduktebene mit konventionellem Beton (CC) vergleichbare Eigenschaften zu erhalten. Dies beeinflusst neben der Aggregatsproduktion auch die Ökobilanz von Beton, insbesondere dadurch, dass ein Grossteil der Umweltwirkungen von Beton aus der Zementproduktion stammt [37]. Daher wurden die ökologischen Vorteile von Recyclingbeton im Vergleich zu konventionellem Beton vermehrt in Frage gestellt [11, 38, 39].

### Bauakteure

Obwohl die grosse Menge an Sekundäraggregat, ergiebige Materialtests, Normierungen und Referenzobjekte für eine Anwendung von Recyclingbaustoffen im Hochbau sprechen werden diese hauptsächlich im Tiefbau eingesetzt. Der Tiefbau ist dann auch verantwortlich für den Grossteil des Recycling mineralischer Baustoffe. Bauakteure im Hochbau ziehen im Moment mehrheitlich konventionelle Baustoffe vor [40]. Als einer der häufig-

<sup>1</sup> Recycling concrete gem. SIA 2030 (2010)

ten Gründe hierfür wird der Preis genannt [40-42]. Betrachtet man jedoch die Preisdifferenz zwischen RC und CC in der Schweiz so variiert diese zwischen 7% tieferen bis zu 2% höheren Kosten für RC [43, 44]. Demnach müssen andere Faktoren den Ausschlag zugunsten von konventionellen Baustoffen geben. Deponien als billige Alternative zum Bauabfallrecycling, Abfallimage von Rückbaustoffen, Zweifel an technischen Eigenschaften und Umweltvorteilen sowie ein Mangel an klaren Qualitätsstandards werden als Hinderungsgründe für eine bessere Akzeptanz aufgeführt [10, 20, 40, 45-48].

### **Zwischenfazit**

Bisherige Forschungsarbeiten zeigen, dass mineralische Recyclingbaustoffe mit konventionellen Baustoffen vergleichbare Materialeigenschaften erreichen, was zu deren Normierung in der Schweiz führte. Allerdings werden die ökologischen Vorteile von Rückbaustoffen vermehrt in Frage gestellt. Trotz der gesetzlichen und normativen Grundlage entscheidet sich ein Grossteil der Bauakteure, insbesondere im Hochbau, immer noch für konventionelle Baustoffe. Da in Zukunft ein weiterer Anstieg an Bauabfallmengen erwartet wird, wird der Unterschied zwischen potentielltem Angebot und Nachfrage nach Recyclingbaustoffen weiter steigen.

## **1.2 Fragestellung**

### **Projektziel**

Das Projekt setzt sich eine *ökologische Optimierung von Angebot und Nachfrage von mineralischen Recyclingbaustoffen* zum Ziel.

Dabei sollen:

- Angebot und Nachfrage mineralischer Recyclingbaustoffe analysiert und modelliert werden und
- Szenarien und Strategien für ein ökologisches Baustoffmanagement entwickelt und beurteilt werden.

### **Forschungsfragen**

Insbesondere wurden folgende Forschungsfragen betreffend des Angebots (i), der Nachfrage (ii) und der Umweltbelastung (iii) bearbeitet:

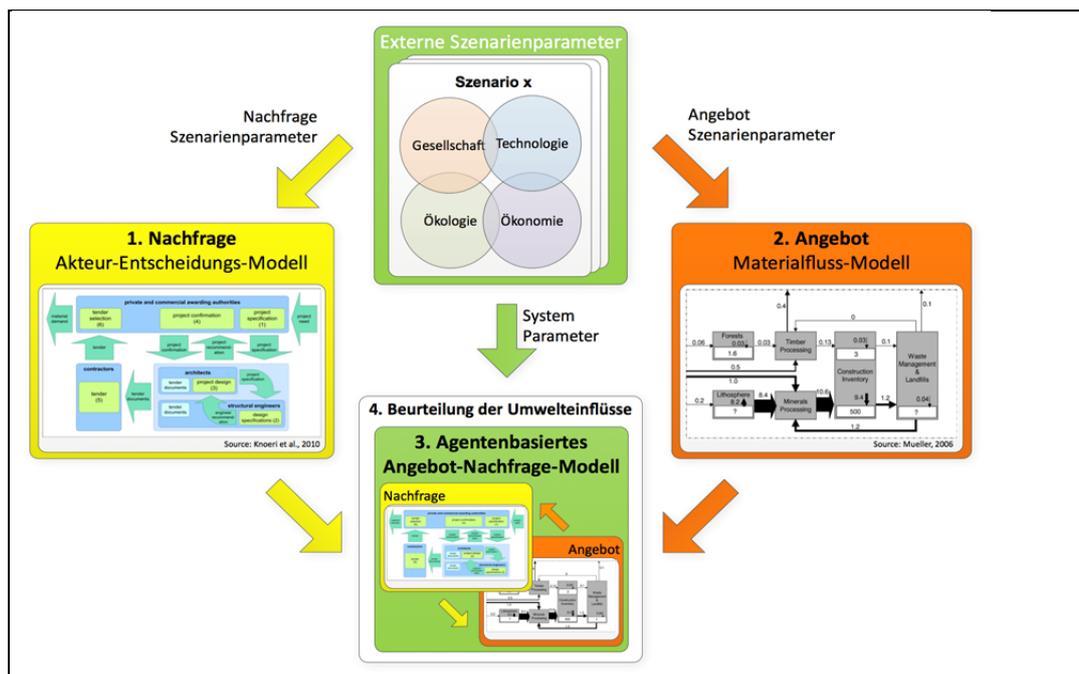
- i. Welche Mengen und Qualitäten an mineralischen Recyclingbaustoffen sind wann, aufgrund der frei werdenden Rückbaustoffe, zu erwarten?
- ii. Von welchen Schlüsselfaktoren hängt die Nachfrage mineralischer Recyclingbaustoffe ab und wie kann diese beeinflusst werden?
- iii. Wie können Angebot und Nachfrage so in Übereinstimmung gebracht werden, dass eine minimale Umweltbelastung resultiert?

## 2 Konzeptioneller Rahmen und Vorgehen

Um die verschiedenen Teilperspektiven der Forschungsfragen in konsistenter Form zu integrieren, wurde folgender konzeptioneller Rahmen entwickelt (Abb.2). Dieser beinhaltet vier Analysemodule: eines zu den Entscheidungen der Nachfrage (1), des Weiteren ein Materialflussmodul zur Bestimmung des potentiellen Angebots (2), ein agentenbasiertes Angebot-Nachfrage-Modul (3) sowie ein Modul zur Beurteilung der Umweltauswirkungen (4).

1. Um die Schlüsselfaktoren der Nachfrage zu eruieren, mussten zuerst die Entscheidungen der Bauakteure analysiert werden. Dies umfasste die Identifikation der betroffenen Akteure, die Analyse der Interaktionen sowie eine empirische Erfassung der Entscheidungsparameter.
2. Da man die Nachfrage nicht unabhängig vom Angebot bzw. des potentiell wiederverwertbarer Bauabfalls modellieren kann, wurden danach die Mengen und Qualitäten der potentiellen Recyclingbaustoffe in einem Materialflussmodell abgeschätzt.
3. Die Erkenntnisse wurden anhand der Entscheidungen der Bauakteure sowie Materialflussanalysen in ein agentenbasiertes Angebot-Nachfrage-Modell integriert. Darin bestimmten die Interaktionen und Entscheidungen der Bauakteure die Nachfrage nach Rückbaustoffen in Abhängigkeit der verfügbaren Ressourcen. Zudem wurden die Effekte verschiedener Massnahmen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement getestet.
4. Die Umweltauswirkungen verschiedener Materialoptionen wurden mittels Ökobilanzierung berechnet. Dabei wurden die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus sowohl von konventionellen Baustoffen als auch von Rückbaustoffen bilanziert und miteinander verglichen.

Jedes dieser Module benötigt verschiedene Parameter für die jeweiligen Szenarien. Dabei handelt es sich vor allem um Parameter, die angeben, welche technischen Anwendungen betrachtet werden oder welche zukünftigen Bauinvestitionen erwartet werden. Um eine Synthese der verschiedenen Teilperspektiven zu ermöglichen, wurden daher konsistente Szenarien bezüglich gesellschaftlicher, technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen (externe Parameter) gewählt. Diese Synthese ermöglicht schliesslich Aussagen über die potenziellen Umweltauswirkungen, die je nach Massnahmen des Baustoffmanagements eintreten könnten.



**Abb. 2:** Konzeptioneller Rahmen

### 3 Entscheidungsprozess und Nachfrageverhalten der Bauakteure

Die detaillierten Ergebnisse zum Entscheidungsprozess und dem Nachfrageverhalten der Bauakteure sind in den Originalpublikationen [49, 50] zu finden.

#### 3.1 Einleitung und Forschungsfragen

##### Einleitung

Wie bereits erwähnt, haben sich Recyclingbaustoffe bisher eher im Tiefbau durchgesetzt, während Bauakteure im Hochbau im Moment überwiegend konventionelle Baustoffe [40] vorziehen. In diesem Kapitel soll es daher um die Entscheidungsfindung und das Nachfrageverhalten der Bauakteure im Bezug auf Rückbaustoffe im Hoch- und Tiefbau gehen. Von grosser Bedeutung dabei ist das Ergründen der Diskrepanz in der Anwendung von Rückbaustoffen in diesen beiden Bausektoren.

Laut Befragungen sind die Kosten das Hauptkriterium der Bauakteure bei der Materialwahl. Dementsprechend erscheint auch in der Forschungsliteratur der Preis als einer der häufigsten Hinderungsgründe für eine stärkere Verbreitung von Recyclingbaustoffen [40-42]. Betrachtet man jedoch die Preisdifferenz zwischen konventionellen Baustoffen und Rückbaustoffen, so ist diese oft marginal [51]. In der Schweiz etwa liegt der Preis für Recyclingbeton (RC) zwischen 7% tiefer und 2% höher als der für konventionellen Beton (CC) [43, 44]. Diese verhältnismässig kleine Preisdifferenz bezieht sich jedoch lediglich auf die Rohmaterialpreise, während eine Preisdifferenz in den Gesamtauftragskosten wesentlich geringer ausfällt. Daraus lässt sich schliessen, dass andere Faktoren für die Entscheidungsfindung ausschlaggebender sein müssen. Zweifel an technischen Eigenschaften und Umweltvorteilen von Rückbaustoffen, Deponien als billige Alternative zum Bauabfallrecycling, Abfallimage von Rückbaustoffen, Verfügbarkeiten von Recyclinganlagen sowie ein Mangel an klaren Qualitätsstandards und politischer Unterstützung wurden als Hinderungsgründe für eine bessere Akzeptanz von Rückbaustoffen aufgeführt [10, 20, 40, 45-48]. Bisher ist jedoch unklar, inwiefern sich diese Kriterien und deren Gewichtung je nach Akteur und Anwendung unterscheiden und was deren kumulativer Einfluss auf die Nachfrage ist.

Ein weiterer wichtiger Faktor für das Verhalten von Bauakteuren ist deren Heuristik im Bezug auf die Entscheidungsfindung. Heuristiken sind vereinfachte Entscheidungsmuster, nach welchen Individuen schnelle und effiziente Entscheidungen in sich wiederholenden Situationen treffen können. Heuristiken sind je nach Position der Entscheidungsträger in Projekten und Organisationen unterschiedlich [52]. Wird am Status quo [53] und dessen Heuristik auch bei unsicheren Entscheidungen [53, 54] vehement festgehalten, kann das zum technologischen Lock-in-Effekt führen, der die Akzeptanz neuer Technologien und Materialien behindert [55]. Daher wurde im Zuge dieser Studie ebenfalls untersucht, wie rational Bauakteure entscheiden bzw. welche Heuristiken sie für ihre Entscheidung verwenden.

##### Fragestellung

Innerhalb des Entscheidungsmoduls wurde folgende Fragestellung bearbeitet:

- *Wie entscheiden und verhalten sich Schweizer Bauakteure in Bezug auf mineralische Recyclingbaustoffe?*

Dabei wurden insbesondere vier Detailfragen bearbeitet:

- i. *Wer entscheidet über die Nachfrage? Welche Gruppe von Akteuren ist hauptsächlich an der Auswahl von mineralischen Baumaterialien beteiligt?*
- ii. *Wie interagieren die Entscheidungsträger? Inwiefern und wie interagieren die wichtigsten Akteure in den verschiedenen Phasen eines Bauprojekts?*
- iii. *Wie verhalten sich die Akteure? Welche Baumaterialien werden innerhalb eines Bauprojekts empfohlen, spezifiziert oder gewählt?*

- iv. *Warum wird so entschieden?* Was waren die Entscheidungskriterien der Bauakteure? Wie sah deren Gewichtung aus und wie wurden die Alternativen bezüglich der einzelnen Kriterien beurteilt?
- v. Methodik: Operationalisierung der Akteure und Umfrage

### 3.2 Operationalisierung der Agenten

Im Hinblick auf die integrierte Modellierung wurde, basierend auf der strukturierten Akteursanalyse [56], der „Agenten-Operationalisierungsansatz“ entwickelt [49]. Das Ziel des Ansatzes ist, partizipative sozialwissenschaftliche Methoden so zu kombinieren, dass Akteure und deren Interaktionen und Entscheidungsprozesse empirisch bestimmt werden und einfach in kontextspezifische Modelle integriert werden können. Damit wurden gleichzeitig drei wichtige Kritikpunkte an die agentenbasierte Modellierung (ABM) adressiert: 1) Der Ansatz stellt eine spezifische Strategie bereit, wie empirisches Wissen in die ABM einbezogen werden kann und damit wie die Methode über konzeptionelle Demonstrationen hinaus zur Lösung von spezifischen Problem weiterentwickelt werden kann. 2) Die Eingliederung empirischer Entscheidungsdaten führt zu einer realitätsnäheren Repräsentation des Verhaltens des Akteurs. 3) Die konzeptionelle Validität der Modelle wird erhöht und stärker gewichtet. Für eine detaillierte Diskussion dieser methodischen Aspekte soll an dieser Stelle auf die Originalpublikation verwiesen sein [49].

Tab. 1 zeigt die vier Schritte des Ansatzes sowie deren theoretische Grundlagen. Als Vorbedingung wurde eine klare Problemdefinition vorausgesetzt. Dies ist nicht nur für die nachträgliche Modellierung [57] sondern auch für die partizipative empirische Erhebung zentral [58].

1. Als Erstes wurden die relevanten Bauakteure im Hinblick auf die Nachfrage nach mineralischen Rückbaustoffen identifiziert. Dabei wurden die gegenseitigen Einflüsse der Akteure analysiert und die verschiedenen Akteursgruppen gemäss ihrer Rolle aufgelistet.
2. Daraufhin wurde die Interaktion der relevanten (in Schritt 1 identifizierten) Bauakteure innerhalb eines Bauprojekts in 14 Experteninterviews analysiert und in einem Expertenworkshop validiert.
3. In demselben Expertenworkshop wurden auch die Entscheidungskriterien der Bauakteure in einem Verfahren zur Konsensbildung [59] bestimmt. Diese wurden dann in einer schriftlichen Umfrage (N = 424, Rücklaufquote von 11.1%) indirekt, das heisst mittels des Analytischen Hierarchie Prozesses (AHP) [60], quantifiziert.
4. Zuletzt wurde in dieser Umfrage auch das Verhalten erfragt, welches Rückschluss auf den Einsatz von Rückbaustoffen ermöglicht. Dies erlaubte eine Konsistenzprüfung der Entscheidung.

**Tab. 1:** Operationalisierung der Akteure

Schritt	Theorie	Methoden
<b>Vorbedingung: Klare Problemdefinition</b>		
<b>1 Identifikation der relevanten Akteure</b>	Soziale-Netzwerk-Theorie [61]	Akteur-Einfluss-Analyse
<b>2 Analyse der Interaktion der Akteure</b>	Wirtschaft und soziale Strukturen [62] Einbettungstheorie [63]	Experteninterviews Expertenworkshops
<b>3 Quantifizierung der Entscheidungsprozesse der Akteure</b>	Multikriterien- (MCDA) [64] Analytischer Hierarchieprozess (AHP) [65]	Entscheidungsanalyse Experteninterviews Expertenworkshops Umfragemethoden
<b>4 Analyse der Verhaltenskonsistenz</b>	Theorie des geplanten Verhaltens [66] interpersonelles Verhalten [67]	Umfragemethoden

### 3.3 Resultate: Schlüsselakteure, Interaktionen, Präferenzen & Entscheidungen

In diesem Kapitel wird auf die anfangs genannten vier Detailfragen zur Nachfrage der Schlüsselakteure, zu deren Interaktionen und zu ihren Präferenzen und Entscheidungen eingegangen.

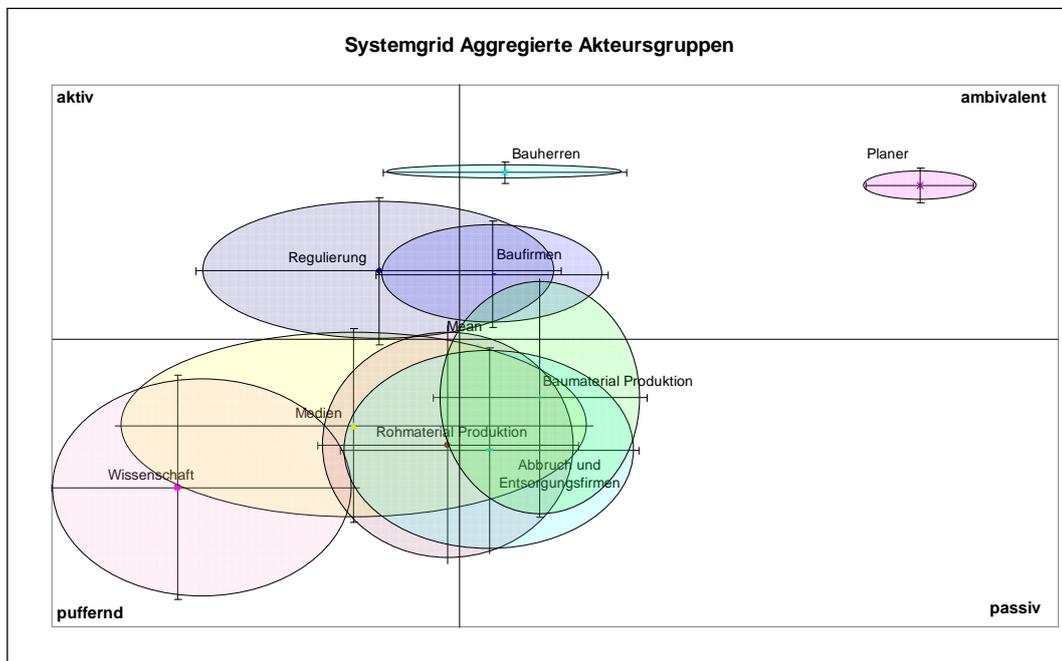
#### Schlüsselakteure

Zunächst muss festgestellt werden, wer die Schlüsselakteure betreffend der Nachfrage nach Recyclingbaustoffen sind.

In einem ersten Schritt wurde dazu die Vielzahl der Schweizerischen Bauakteure, die Einfluss auf die Nachfrage haben, in die folgenden Akteursgruppen aggregiert:

- Planer (Architekten und Ingenieure)
- Bauherren (private, kommerzielle und öffentliche)
- Baufirmen (Generalunternehmer, Baumeister, Tiefbaufirmen)
- Baumaterialproduzenten (Zement-, Beton-, Ziegel-, Mauersteinproduzenten)
- Abbruch- und Entsorgungsfirmen (aber auch Recyclingunternehmen, Deponien, Verbrennungsanlagen)
- Rohmaterialproduzenten (Kiesproduzenten, Abbaufirmen von Naturstein)
- Medien (Tagespresse und Fachjournale)
- Regulierungen (Gesetzgebung und Normenvereinigungen)
- Wissenschaft und Forschungsinstitute

Danach wurden die gegenseitigen Einflüsse bezüglich der Nachfrage nach Rückbaustoffen quantifiziert und die Akteursgruppen gemäss ihre Aktivität (Summe der Einflüsse auf andere Akteure) und Passivität (Summe der Einflüsse von anderen Akteuren) in ein Systemgrid eingezeichnet (Abb. 3). Unterteilt mit dem Mittelwert der beiden Skalen erhält man folgende vier Akteurstypen: puffernde, passive, aktive und ambivalente Akteure.



**Abb. 3:** Systemgrid der Schlüsselakteure für die Nachfrage nach Recyclingbaustoffen mit Aktivität (y-Achse) und Passivität (x-Achse) inklusive der Abweichungen in der Beurteilung.

Bauherren, Bauplaner (Architekten und Ingenieure) und Unternehmer (Baufirmen) wurden als ambivalente Schlüsselakteure identifiziert, welche starken Einfluss auf andere Akteure ausüben, aber auch stark beeinflusst werden. Regulierungen (Normenvereini-

gungen und Gesetzgebung) haben eine aktive Rolle mit großem Einfluss, während Bau- und Rohmaterialproduzenten sowie Abbruch- und Entsorgungsfirmen eine passivere Rolle im System haben. Das wiederum bedeutet, dass sie stark von der Nachfrage beeinflusst werden, aber diese wenig beeinflussen. Medien- und Wissenschaftsakteure haben ähnliche Einflusswerte, werden jedoch deutlich weniger beeinflusst. In der folgenden Analyse werden Bauherren, Architekten, Ingenieure und Unternehmer als Schlüsselakteure der Nachfrage genauer betrachtet.

### Interaktion der Bauakteure

Für die Erhebung der Interaktion der Bauakteure wurde davon ausgegangen, dass die Projektentscheidung bereits gefällt wurde. Das Ergebnis des Entscheidungsprozesses, welches zum Projekt führte, beeinflusste kaum die Materialentscheidung zwischen konventionellen Baustoffen und Rückbaustoffen und stand daher nicht im Fokus. Sowohl für den Hochbau als auch den Tiefbau wurde die Interaktion innerhalb eines Bauprojekts untersucht.

Im *Hochbau* wurde zwischen privaten, kommerziellen und öffentlichen Bauherren unterschieden.

Der öffentliche Bauherr entscheidet zusammen mit der Projektbestätigung (4), an welche Bedingungen eine Teilnahme an der Submission geknüpft ist (Eignungskriterien) und nach welchen Zuschlagkriterien der Auftrag vergeben wird. Die Eignungs- sowie die Zuschlagkriterien sind Teil der Ausschreibung [68]. Die Auftragsvergabe oder Offertenauswahl (6) ist bei den öffentlichen Bauherren demzufolge eine vordefinierte Entscheidung gemäss der Zuschlagkriterien.

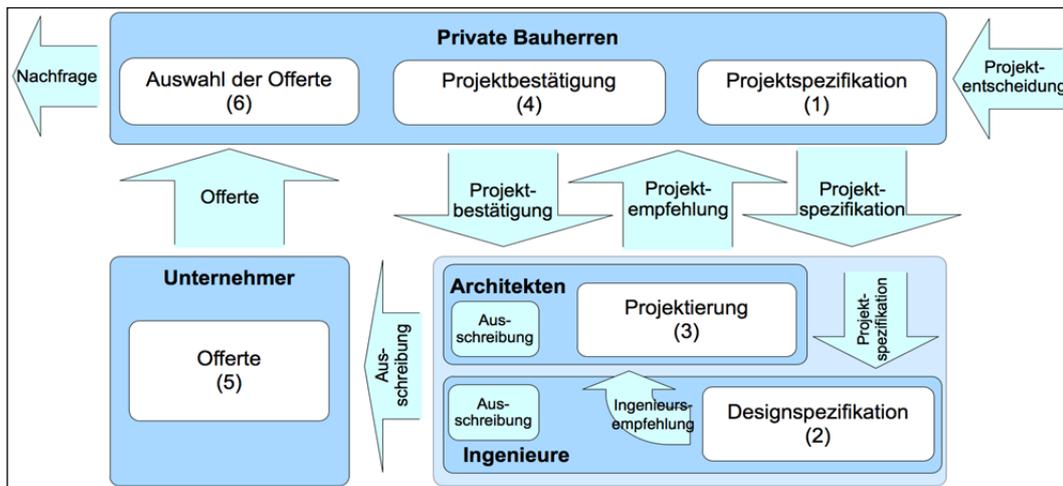
Eine Umfrage auf den verschiedenen administrativen Ebenen zeigte, dass Nachhaltigkeitskriterien, analog zu den Empfehlungen und der Gerichtspraxis, kaum oder nur mit untergeordneter Bedeutung als Zuschlagskriterien eingesetzt werden. Generell kann festgehalten werden, dass der Preis (50-80%) und die Kriteriengruppe bestehend aus Qualität, Terminen und Referenzen (15-40%) die wichtigsten Zuschlagskriterien sind.

Im *Tiefbau* handelt es sich vorwiegend um öffentliche Bauherren, welche nach ihrer administrativen Ebene (Gemeinde, Kanton oder Bund) differenziert werden. Es wurden die Entscheidungen der Verwaltung betrachtet und nicht die der politischen Behörden, was zum Beispiel bedeuten kann, dass in einer Gemeinde der Bauverwalter den Bauherrn vertritt und der Einfluss des Gemeinderats als Rahmenbedingung (Kriterium) ins Modell integriert wird. Die Bauherren definieren analog zu öffentlichen Bauherren im Hochbau zusammen mit der Projektbestätigung sowohl die Vergabe- als auch die Zuschlagskriterien. Da die Rolle des Architekten im Tiefbau mehrheitlich vom Ingenieur übernommen wird, wurden die Projektierung und die Designspezifikation in eine Entscheidung zusammengefasst.

Tab. 2 zeigt die Interaktion von privaten Bauherren (gleicher Ablauf bei kommerziellen Bauherren) mit dem Architekten, dem Ingenieur und den Unternehmern für ein Bauprojekt. Der Prozess startet mit der Projektspezifikation (1), in welcher der Bauherr neben einer Reihe allgemeiner Vorgaben auch spezifiziert, ob er (a) generell nachhaltiges Bauen unterstützt, (b) Rückbaustoffe einsetzen möchte, oder ob er sich (c) dieser Frage entzieht. Diese Spezifikation geht vom Bauherrn zum Architekten seiner Wahl, welcher sie während der Projektierung an den Ingenieur weiterleitet. Der Ingenieur trifft die erste materialspezifische Entscheidung, indem er in der Designspezifikation (2) die Ausschreibung konventioneller Materialien, Rückbaustoffe oder eine offene Ausschreibung empfiehlt. Basierend auf dieser Empfehlung sowie auf der Vorgabe des Bauherrn bezüglich nachhaltigen Bauens empfiehlt danach der Architekt in der Projektierung (3) dem Bauherrn entweder spezifisch konventionelle Baustoffe oder Rückbaustoffe auszusprechen, oder er bewegt ihn zu einer offenen Ausschreibung. Der Bauherr revidiert das Projekt durch die Projektbestätigung (4). Die empfohlene Spezifikation wird daraufhin vom Architekten oder dem Ingenieur in die Ausschreibung übernommen. Diese Submission geht an verschiedene Unternehmer, welche ihre Offerte (5) einreichen. Mit der finalen Offertenauswahl (6) bestimmt der Bauherr schliesslich definitiv welche Materialien für das Bauprojekt nachgefragt werden.

Generell kann der Bauherr durch den Architekten stark beeinflusst werden. Dies wird mit einer zusätzlichen Entscheidungsschleife berücksichtigt, die eine Modellierung einer Diskussion zwischen Bauherrn und Architekt ermöglicht. Die Diskussion zwischen Archi-

tekt und Ingenieur in der Projektierungsphase wird insofern miteinbezogen, als dass der Architekt die Projektvorgabe des Bauherrn zusammen mit den allgemeinen Projektinformationen an den Ingenieur weitergibt und dieser daraufhin die statische Empfehlung an den Architekten erstellt.



**Abb. 4:** Interaktion der Bauakteure im Hochbau für das Beispiel von privaten Bauherren

Der öffentliche Bauherr entscheidet zusammen mit der Projektbestätigung (4), an welchen Bedingungen eine Teilnahme an der Submission geknüpft ist (Eignungskriterien) und nach welchen Zuschlagskriterien der Auftrag vergeben wird. Die Eignungs- sowie die Zuschlagskriterien sind Teil der Ausschreibung [68]. Die Auftragsvergabe oder Offertenauswahl (6) ist bei den öffentlichen Bauherren demzufolge eine vordefinierte Entscheidung gemäss der Zuschlagskriterien.

Eine Umfrage auf den verschiedenen administrativen Ebenen zeigte, dass Nachhaltigkeitskriterien, analog zu den Empfehlungen und der Gerichtspraxis, kaum oder nur mit untergeordneter Bedeutung als Zuschlagskriterien eingesetzt werden. Generell kann festgehalten werden, dass der Preis (50-80%) und die Kriteriengruppe bestehend aus Qualität, Terminen und Referenzen (15-40%) die wichtigsten Zuschlagskriterien sind.

Im *Tiefbau* handelt es sich vorwiegend um öffentliche Bauherren, welche nach ihrer administrativen Ebene (Gemeinde, Kanton oder Bund) differenziert werden. Es wurden die Entscheidungen der Verwaltung betrachtet und nicht die der politischen Behörden, was zum Beispiel bedeuten kann, dass in einer Gemeinde der Bauverwalter den Bauherren vertritt und der Einfluss des Gemeinderats als Rahmenbedingung (Kriterium) ins Modell integriert wird. Die Bauherren definieren analog zu öffentlichen Bauherren im Hochbau zusammen mit der Projektbestätigung sowohl die Vergabe- als auch die Zuschlagskriterien. Da die Rolle des Architekten im Tiefbau mehrheitlich vom Ingenieur übernommen wird, wurden die Projektierung und die Designspezifikation in eine Entscheidung zusammengefasst.

**Tab. 2:** Beispiele und Gewichtung von Zuschlagskriterien für Tiefbauleistungen nach Komplexität und Verkehrsbeeinträchtigung auf Bundesebene [69].

Kriterium /Komplexität	klein	mittel	gross
Preis	80-100%	60-90%	45-75%
Bauzeit	0-20%	0-30%	10-40%
Inhalt/Qualität der eingereichten Unterlagen		10%	10%
QM-Konzept			5%

Während Bauherren über die Projektspezifikation in Abhängigkeit verschiedener Kriterien entscheiden, werden die Zuschlagskriterien primär objektabhängig bestimmt. Da den Vergabestellen ein erheblicher Ermessensspielraum im Setzen der Zuschlagskriterien

für Baumeisterleistungen bleibt, wurde eine Umfrage bei den Vergabestellen der verschiedenen administrativen Ebenen durchgeführt. Wie schon im Hochbau zeichnete sich ab, dass der Preis und die Kriteriengruppe Qualität, Termine und Referenzen die wichtigsten Zuschlagskriterien sind. Da die Objekte insbesondere im Strassenbau oft sehr klar vordefiniert sind, wird der Preis mit 60-100% sogar noch etwas höher bewertet als im Hochbau. Die Lehrlingsausbildung wird jedoch oft als untergeordnetes (<10%) Kriterium verwendet. Auf Bundesebene wurden folgende Standardzuschlagskriterien für Bauleistungen im Strassen und Tiefbau vorgeschlagen (Tab. 2).

Auf Kantonsebene werden exemplarisch die Kriterien des Tiefbauamts des Kantons Zürich aufgeführt. Es werden Preise mit 60-100%, Bauzeit und Referenzen mit bis zu 30% sowie Lehrlingsausbildung bis zu 10% für die Vergabe von Tiefbauleistungen einberechnet [70]. Auf der Gemeindeebene wurden ein Agglomerationskern, eine Agglomerationsgürtel sowie eine ländliche Gemeinde nach ihren geläufigsten Zuschlagskriterien für Tiefbauleistungen befragt (Tab. 3).

**Tab. 3:** Beispiele und Gewichtung von Zuschlagskriterien für Tiefbauleistungen nach Stadt-Land-Verteilung auf Gemeindeebene

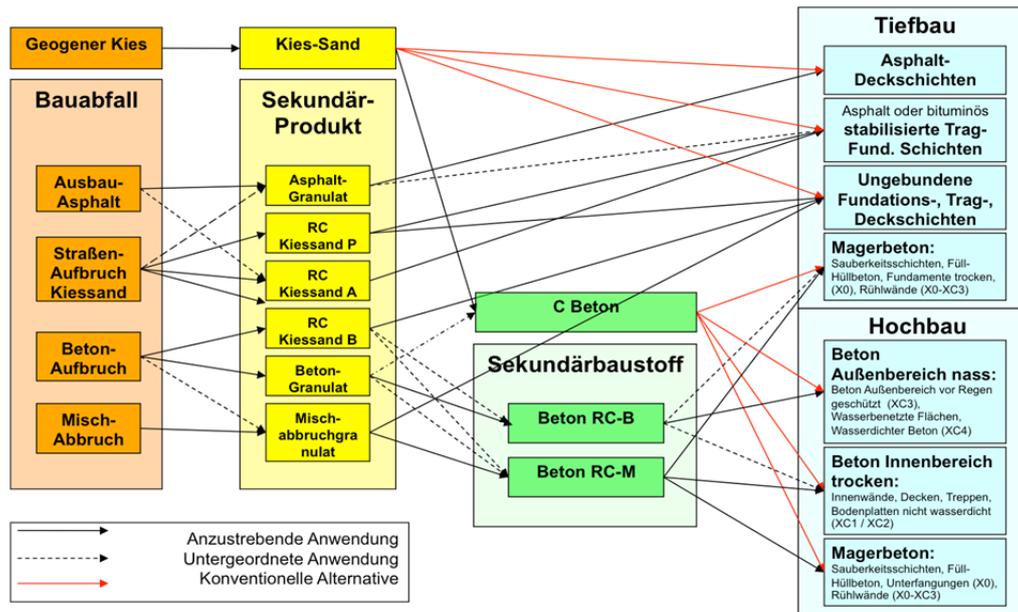
Kriterium	Agglomerationskern Gemeinde [71]	Agglomerationsgürtel Gemeinde [72]	Ländliche Gemeinde [73]
Preis	50-70%	40-60%	60-80%
Termin / Qualität / Referenzobjekte / Schlüsselpersonen	20-40%	Die Gewichtung wird individuell jedem Auftrag angepasst.	15-30%
Lehrlingsausbildung	10%	Das Angebot mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis wird gewählt.	5-10%
Ökologie / Nachhaltigkeit	Kein Zuschlagskriterium		Kein Zuschlagskriterium

### Präferenzen der Bauakteure

Bevor die Präferenzen der Bauakteure für die einzelnen Entscheidungen erhoben wurden, wurden die zu betrachtenden Anwendungen sowie die jeweiligen technisch machbaren Materialalternativen bestimmt.

### Anwendungen

Die Anwendungsmöglichkeiten wurden aufgrund der heutigen Normen erarbeitet. **Abb. 5** zeigt die Anwendungsmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen und Baustoffen gemäss aktueller Normierung und Empfehlungen. Da im Tiefbau bereits Asphaltgranulat weit verbreitet für Asphaltdeckschichten verwendet wird, wurden sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau je drei Anwendungen und deren Materialalternativen zu weiteren Betrachtungen herangezogen (Tab. 4).



**Abb. 5:** Anwendungsmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen und Baustoffen gemäss Normierung und Empfehlung.

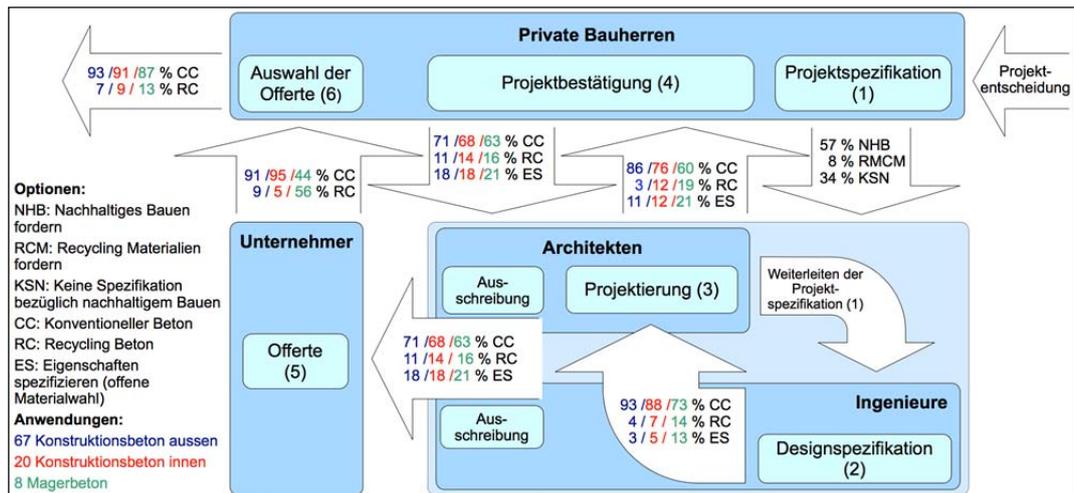
**Tab. 4:** Anwendungen, Materialalternativen, Abkürzungen, Aggregatzusammensetzungen und entsprechende Referenzen.

	Anwendung	Materialalternative	Kürzel	Aggregat Zusammensetzung	Referenz
Hochbau	Konstruktionsbeton aussen	- konventioneller Beton	CC	Natürlicher Kies-Sand (>80%)	
		- Recyclingbeton B	RCB	Betonabbruchgranulat (25-100%)	
	Konstruktionsbeton innen	- konventioneller Beton	CC	Natürlicher Kies-Sand (>80%)	[15, 24,
		- Recyclingbeton M	RCM	Mischabbruchgranulat (25-100%)	30]
	Magerbeton	- konventioneller Beton	CC	Natürlicher Kies-Sand (>80%)	
	- Recyclingbeton M	RCM	Mischabbruchgranulat (25-100%)		
Tiefbau	Stabilisierte Trag- und Fundationsschichten	- Natürlicher Kies-Sand	CA	Natürlicher Kies-Sand	[25]
		- Recycling Kies-Sand P	RAP	Strassenaufbruch (>95%)	[29]
		- Recycling Kies-Sand A	RAA	Strassenaufbruch (>80%) Asphaltauflage (<20%)	[26, 29]
	Ungebundene Trag- und Fundationsschichten	- Natürlicher Kies-Sand	CA	Natürlicher Kies-Sand	[25]
		- Recycling Kies-Sand P	RAB	Strassenaufbruch (>80%) Betonabbruchgranulat (<20%)	[28, 29]
		- Mischabbruchgranulat	RAM	Mischabbruchgranulat (<97%)	[27]
	Magerbeton	- konventioneller Beton	CC	Natürlicher Kies-Sand (>80%)	
	- Recyclingbeton B	RCB	Betonabbruchgranulat (25-100%)	[15, 24,	
	- Recyclingbeton M	RCM	Mischabbruchgranulat (25-100%)	27, 28]	

**Präferenzen im Hochbau**

Abb. 6 zeigt die Präferenzen sowie die Verhaltenshäufigkeiten der interagierenden Bauakteure im Hochbau am Beispiel von privaten Bauherren. Eine Mehrheit der privaten Bauherren (57%) forderte zu Beginn des Bauprozesses in der Projektspezifikation (1) generell nachhaltiges Bauen, während hingegen Recyclingmaterialien eher wenig gefordert wurden (8%). Die erste anwendungs- und materialspezifische Entscheidung, die Designspezifikation (2) der Ingenieure, zeigte ein komplett anderes Bild. Hier wurden ganz klar konventionelle Materialien bevorzugt (93-73%), auch wenn sie etwas weniger bei untergeordneten Anwendungen wie etwa Magerbeton auftraten. In der nachfolgenden Projektierung (3) folgten die Architekten mehrheitlich der Ingenieurempfehlung, indem sie ebenfalls konventionellen Beton (86-60%) empfahlen oder auch vermehrt die Material-

wahl offen liessen. Private Bauherren übernahmen dann zu einem Grossteil die Empfehlung der Architekten in der Projektbestätigung (4), welche als Grundlage für die Ausschreibung diente. Die Ausschreibung wurde danach je nach Projektsetting entweder vom Architekten oder dem Ingenieur an ausgewählte Unternehmer geschickt. Diese zeigten bei den Eingaben ihrer Offerten (5) die grösste Differenzierung zwischen Konstruktionsbeton- und Magerbetonanwendungen. Für letztere wurden zu gleichen Teilen CC und RC offeriert, während für Konstruktionsbeton fast ausschliesslich CC berücksichtigt wurde. Mit der finalen Auswahl des Offerts (6) bestimmten die Bauherren auch die Materialwahl im Projekt. Private Bauherren bevorzugten hier klar konventionelle Materialien (93-87%).



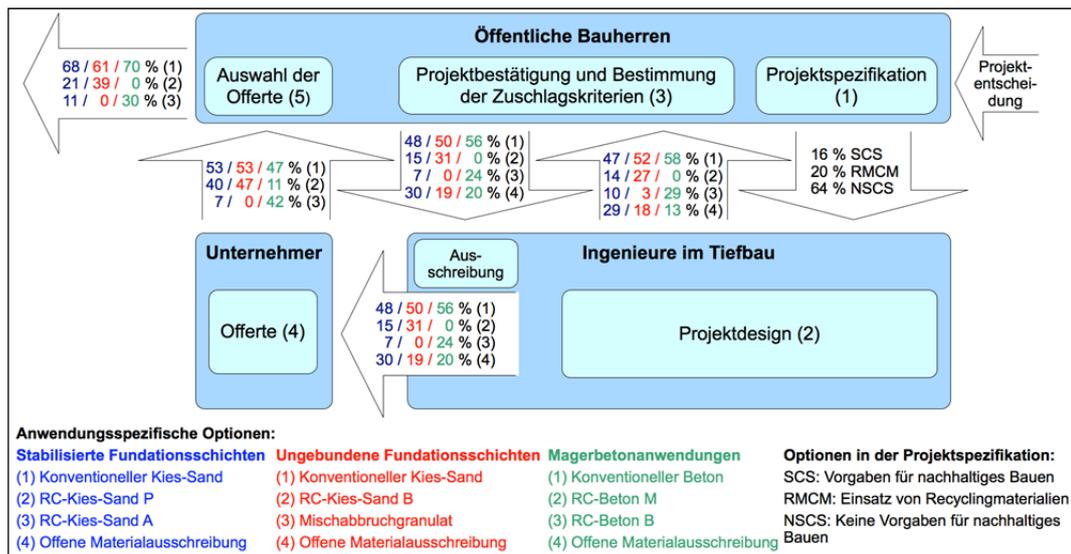
**Abb. 6:** Präferenzen (Entscheidungen) der Bauakteure im Hochbau (private Bauherren)

**Vergleich zwischen den Bauherren:** Ein Vergleich zwischen privaten und kommerziellen Bauherren zeigte kaum Unterschiede in den Präferenzen bei der Projektspezifikation, der Bestätigung und der Auswahl des Offerts. Im Gegensatz dazu haben öffentliche Bauherren häufiger Rückbaustoffe in Betracht gezogen, die tiefere Werte für CC in der Projektbestätigung (59-47%) und Offertauswahl (81-74%) besaßen.

**Fazit Hochbau:** Die Entscheidung zu nachhaltigem Bauen der Bauherren zu Beginn des Bauprozesses scheint, mit Ausnahme der öffentlichen Bauherren, wenig Einfluss auf die nachfolgenden Materialentscheidungen zu haben. Fachleute des Hochbaus spezifizierten, empfahlen und offerierten mehrheitlich konventionelle Baustoffe. Dies galt mehr oder weniger unabhängig von der Anwendung insbesondere für Ingenieure (85%) und Architekten (76%). Unternehmer unterschieden deutlich zwischen Konstruktionsbeton, bei dem kaum (7%) Rückbaustoffe offeriert wurden, und Magerbetonanwendungen, bei denen RC-Beton eine gängige Alternative zu sein scheint (56%). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass fast ausschliesslich konventionelle Baustoffe nachgefragt werden, wobei sich auch hier öffentliche Bauherren mit rund 30% an nachgefragten Rückbaustoffen deutlich von privaten und kommerziellen Bauherren (10%) unterscheiden.

### Präferenzen im Tiefbau

Abb. 7 zeigt die Verhaltenshäufigkeiten der interagierenden Gruppen der Bauakteure im Tiefbau. Die Vergabestellen im Tiefbau geben seltener nachhaltiges Bauen vor (16%) in der Projektspezifikation (1) als ihre Kollegen im Hochbau. Am häufigsten (65%) wurde keine Vorgabe bezüglich nachhaltigen Bauens gemacht und falls doch, dann wurde direkt Recyclingmaterialien gefordert (20%). Ingenieure empfahlen in der Projektierung (2) zu 47-58% konventionelle Materialien. Der Gesamtanteil an empfohlenen Rückbaustoffen war ziemlich konstant, wobei jedoch die Materialwahl deutlich von der Anwendung abhing. Bauherren folgten eng der Ingenieurempfehlung in der Projektbestätigung (3). Die Unternehmer wiesen mit rund 50% die höchsten Anteile an Recyclingbaustoffen in ihren Offerten (4). Mit der finalen Auswahl der Offerte (5) wurden insgesamt 30-39% an Rückbaustoffen nachgefragt.



**Abb. 7:** Präferenzen (Entscheidungen) der Bauakteure im Tiefbau

**Fazit Tiefbau:** Auffallend ist, dass der Anteil an Entscheidungen zugunsten von Rückbaustoffen über den ganzen Bauprozess hin etwa konstant blieb (in der Grössenordnung von 1/3). Die Ausnahme bildeten hier die Bauunternehmen, welche mit rund 50% deutlich mehr Rückbaustoffe offerierten. Zwischen den unterschiedlichen Anwendungen differenzierten die Baufachleute (Ingenieure und Unternehmer) stark. Sie berücksichtigen besonders, welcher Typ Rückbaustoff eingesetzt werden sollte. Dementsprechend waren RC Kies-Sand P für stabilisierte Fundationsschichten, RC Kies-Sand B für ungebundene Fundationsschichten sowie RC Beton B für Magerbetonanwendungen die favorisierten Alternativen. Die beiden aus dem Hochbau stammenden Rückbaumaterialien (RC Beton M und Mischabbruchgranulat) wurden trotz technischer Machbarkeit und vorhandenen Normen im Tiefbau kaum eingesetzt. Die Tatsache, dass rund ein Drittel aller Entscheidungen im Tiefbau zugunsten von Rückbaustoffen ausfiel zeugt von einer breiten Akzeptanz von Rückbaumaterialien.

### Vergleich der Präferenzen zwischen Hochbau und Tiefbau

Mit der Ausnahme von öffentlichen Bauherren (~30%) liegt die Nachfrage nach Rückbaustoffen im Hochbau bei rund 10% und damit deutlich tiefer als im Tiefbau (>30%). Zudem empfehlen Baufachleute (Architekten, Ingenieure und Unternehmer) im Hochbau Rückbaumaterialien mit rund 16% deutlich weniger als dies Ingenieure und Unternehmer im Tiefbau tun (>40%). Darüber hinaus zeugt die klare Differenzierung zwischen Anwendungen und Rückbaustofftypen von verbreitetem Knowhow über jene im Tiefbau. Ausserdem ist im Hochbau die Diskrepanz zwischen der Forderung nach nachhaltigem Bauen (~60%) zu Beginn des Bauprozesses und der Nachfrage nach Rückbaustoffen (~10%) besonders auffällig.

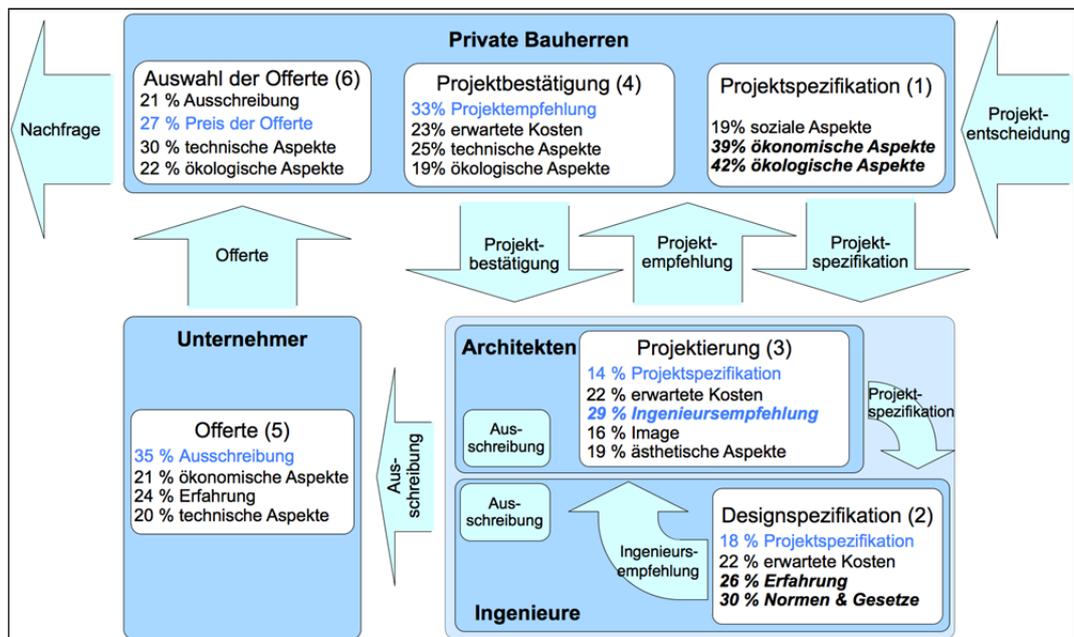
### Entscheidungen der Bauakteure

Im Folgenden wird die Gewichtung der Kriterien bei den verschiedenen Entscheidungen genauer betrachtet. Da sich die Gewichtung der Kriterien sowohl im Tiefbau als auch im Hochbau zwischen den Anwendungen kaum unterschieden, werden im Weiteren aggregierte Werte für die drei Anwendungsbeispiele betrachtet.

### Entscheidungen im Hochbau

Abb. 8 zeigt die durchschnittlichen Gewichtungen der Kriterien bei den Entscheidungen der Bauakteure betreffend der Recyclingbaustoffe im Hochbau. In der Projektspezifikation (1) betrachteten private Bauherren vor allem ökonomische (39%) und ökologische (42%) Kriterien, während soziale Aspekte eine eher untergeordnete Rolle spielten. Ingenieure verliessen sich in ihrer Designspezifikation (2) vorwiegend auf ihre Erfahrung (26%) sowie Normen und Gesetze (34%) und verhältnismässig wenig auf die Projektspezifikation der Bauherren. Für die Projektierung (3) der Architekten war die Ingenieuremp-

fehlung (29%) am wichtigsten, gefolgt von den erwarteten Kosten (22%) und ästhetischen Aspekten (19%). Auch hier wurde der Projektspezifikation der Bauherren wenig Gewicht (14%) zugemessen. In der nachfolgenden Projektbestätigung verliessen sich private Bauherren hauptsächlich auf die Empfehlung der Architekten (33%) sowie auf zu erwarteten Kosten (23%) und technische Aspekte (25%). Unternehmer berücksichtigten in der Offerte (5) als wichtigsten Faktor die Ausschreibung (35%) sowie zu etwa gleichen Teilen ihre Erfahrungen und die ökonomischen und technischen Aspekte. In der finalen Auswahl der Offerte (6) der privaten Bauherren waren technische Aspekte (30%) und Kosten (27%) die wichtigsten Kriterien.



**Abb. 8:** Durchschnittliche Gewichtung der Kriterien bei den Entscheidungen der Bauakteure im Hochbau (private Bauherren) bezüglich der Recyclingbaustoffe

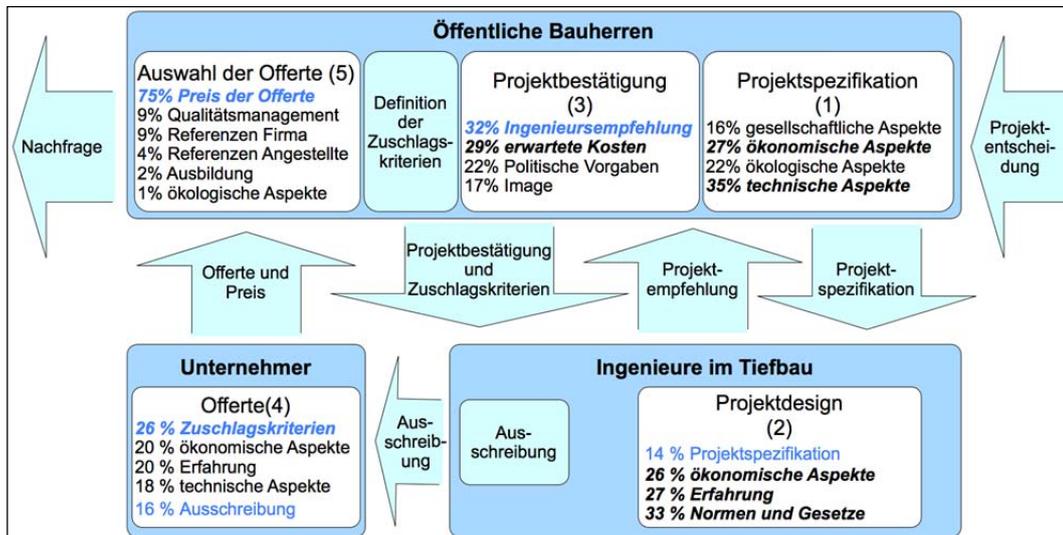
**Vergleich der Bauherren:** Kommerzielle Bauherren berücksichtigten in der Projektbestätigung stärker technische und ökonomische Aspekte (Preis und Vermarktbarkeit). Dementgegen schienen öffentliche Bauherren, die Kriterien gleichwertig zu berücksichtigen und generell weniger Gewicht auf die Empfehlungen zu legen. Aufgrund des öffentlichen Vergabewesens war der Unterschied zwischen öffentlichen Bauherren und privaten und kommerziellen Bauherren bei der Auswahl des Offerts am grössten. In den vordefinierten Zuschlagskriterien der öffentlichen Bauherren (siehe auch Tabellen 2 + 3) dominierte klar der Preis.

**Fazit Hochbau:** Ökonomische und ökologische Kriterien spielten für die Entscheidung über nachhaltiges Bauen zu Beginn des Baus eine zentrale Rolle. Mit Ausnahme der Ingenieure war in den nachfolgenden Entscheidungen stets das Interaktionskriterium (Empfehlung, Ausschreibung, Offertpreis) am wichtigsten. Die Entscheidung der Ingenieure, die am Beginn dieser Interaktionskette stand, wurde primär von den vorhandenen Normen und Gesetzen sowie deren Erfahrung geprägt.

### Entscheidungen im Tiefbau

**Abb. 9** zeigt die durchschnittliche Gewichtung der Kriterien für die Bauakteure im Tiefbau. In der Projektspezifikation (1) der Bauherren zu Beginn des Baus waren vor allem technische (35%) und ökonomische (27%) Kriterien wichtig. Wie schon im Hochbau entschieden auch die Tiefbauingenieure in der Projektierung (2) mehrheitlich basierend auf Normen und Gesetzen (33%), ihrer Erfahrung (27%) und ökonomischen Aspekten (26%). Sie legten jedoch wenig Wert auf die Projektspezifikation der Bauherren (14%). Für die Projektbestätigung (3) der Bauherren waren allerdings die Empfehlungen der Ingenieure (32%) sowie die erwarteten Kosten (29%) am wichtigsten. Unternehmer berücksichtigten stark die Ausschreibung sowie die Zuschlagskriterien, welche zusammen 42% ausmach-

ten. Wie bereits im Hochbau dominierte der Preis die Zuschlagskriterien in der Offertwahl (5) auch im Tiefbau (siehe auch Tabelle 2 + 3).



**Abb. 9:** Durchschnittliche Gewichtung der Kriterien bei den Entscheidungen der Bauakteure im Tiefbau bezüglich der Recyclingbaustoffe

### Vergleich der Entscheidungen zwischen Hochbau und Tiefbau

Bezüglich der Kriterien und deren Gewichtung sind sich Hoch- und Tiefbau sehr ähnlich. So wird die Nachfrage nach Rückbaustoffen im Hoch- und Tiefbau mehrheitlich durch dieselben Kriterien geprägt. Als Unterschiede konnte eine etwas stärkere Gewichtung von ökonomischen Aspekten im Tiefbau und eine von ökologischen Aspekten im Hochbau festgestellt werden.

Ökologische Aspekte wurden kaum oder lediglich zu Beginn des Prozesses miteinbezogen, während technische und ökonomische Aspekte sowie die Empfehlungen und Spezifikationen anderer Akteure durchwegs eine Rolle spielten. Mit Ausnahme der Ingenieure stützten sich alle Bauakteure bei materialspezifischen Entscheidungen stark auf das Interaktionskriterium. Die Ingenieure als Startpunkte dieser Kette entschieden sich hauptsächlich aufgrund von Normen und Gesetzen sowie ihrer Erfahrung.

### Entscheidungsprozesse und Konsistenz der Analyse

Bisher wurden die verschiedenen Alternativen (Handlungsoptionen), das Verhalten (Präferenzen) der Bauakteure sowie die Entscheidungskriterien und deren Gewichtung betrachtet. Damit der gesamte Entscheidungsprozess analysiert werden konnte, wurde auch die Gewichtung der Alternativen bezüglich der einzelnen Kriterien erhoben.

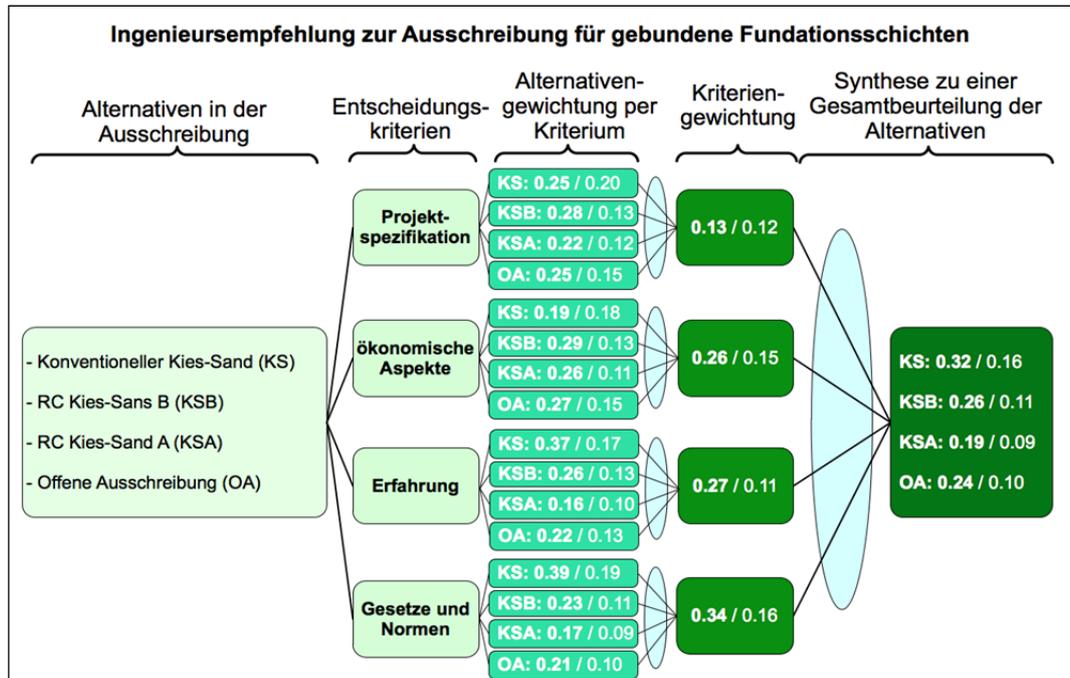
Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) nach Saaty [60, 65] lieferte dazu das ideale Analyseinstrument. Abb. 10 zeigt den Ablauf einer einzelnen Entscheidung der Ingenieure im Tiefbau zur Ausschreibung für ungebundene Trag- und Foundationsschichten. Zuerst wurden Handlungsoptionen für die Entscheidung und die Alternativen in der Ausschreibung definiert. Des Weiteren wurden folgende Entscheidungskriterien identifiziert: Projektspezifikation, ökonomische Aspekte, Erfahrung, sowie Normen und Gesetze. Danach wurden die Alternativen bezüglich jedem der Kriterien miteinander verglichen, was zur Gewichtung der Alternativen pro Kriterium führte. Daraufhin wurden die Kriterien paarweise gegeneinander abgewogen. Die Kombination der Gewichtung der Alternativen und die der Kriterien führte in der Synthese zu einer Gesamtbeurteilung der Alternativen.

Im betrachteten Beispiel (**Abb. 10**) rangiert natürlicher Kies-Sand mit einem Wert von 0,32 vor RC Kiessand B (0,26), einer offenen Ausschreibung (0,24) und RC Kiessand A (0,19). Die Gewichtung der Kriterien zeigte wie schon bei den aggregierten Werten, dass Gesetze und Normen (34%) als wichtigstes Kriterium noch vor der Erfahrung (27%) und den ökonomischen Aspekten (26%) in die Entscheidung einfließen. Die Gewichtung der Alternativen pro Kriterium zeigt, dass ökonomische Aspekte eher für Rückbaustoffe (KSB 0,29, KSA 0,26) oder für eine offene Ausschreibung (0,27) sprechen würden. Zudem wird

deutlich, dass das finale Ranking von den hohen Werten bei natürlichem Kiessand bei der Erfahrung (0,37) und bei den Gesetzen und Normen (0,39) bestimmt wird.

Obwohl die bestehenden Normen sowohl natürliche als auch RC Kiessande erlauben, verblüfft es, dass natürlicher Kiessand beinahe doppelt so hohe Werte wie RC Kiessande oder eine offene Ausschreibung erhielt.

Die Tiefe bei der Analyse der Entscheidungen ermöglicht demnach nicht nur eine Beurteilung der Wichtigkeit verschiedener Kriterien, sondern auch eine Aussage über die bevorzugten Alternativen von Bauherren je nach Kriterien.



**Abb. 10:** Entscheidungsprozess gemäss dem Analytischen Hierarchie Prozess (AHP), welcher zur Ingenieurempfehlung der Ausschreibung für gebundener Fundamentsschichten führt (Durchschnittswerte und Standardabweichung)

Schlussendlich kann die Gesamtbeurteilung der Alternativen mit dem tatsächlichen Verhalten verglichen werden. Dies erlaubt eine Beurteilung der Entscheidungskonsistenz der Bauakteure. In einem mit der Entscheidung konsistenten Verhalten würde diejenige Alternative mit dem höchsten Wert in der Gesamtbeurteilung gewählt werden. Diese wäre im vorherigen Beispiel etwa natürlicher Kiessand. Daher wurden für alle Akteure in der Stichprobe die höchstgewerteten Alternativen mit dem tatsächlichen Verhalten verglichen. Es zeigte sich, dass in 75% aller Fälle die beste Option in den erhobenen Entscheidungen auch tatsächlich ausgewählt wurde. Diese relativ hohe Konsistenz spricht für diese Methode. Die verbleibende Differenz von 25% kann zudem mit der oft gefundenen Diskrepanz zwischen Intension (in diesem Fall Entscheidung) und Verhalten erklärt werden [74, 75].

### 3.4 Diskussion und Zusammenfassung

**Nachfrage nach Rückbaustoffen:** Rückbaustoffe scheinen im Tiefbau bereits gut etabliert zu sein, da dort etwa bei einem Drittel der untersuchten Projekte Rückbaustoffe eingesetzt wurden. Im Gegensatz dazu ist Recyclingbeton im Hochbau mit rund 10% Verwendung immer noch ein Nischenprodukt.

**Nachhaltiges Bauen und Rückbaustoffe:** Sehr deutlich wird aus den Resultaten im Hoch- sowie stellenweise auch im Tiefbau ersichtlich, dass eine Forderung nach nachhaltigem Bauen zu Beginn des Bauprozesses nicht oder kaum Auswirkungen auf die Materialentscheidungen (bzgl. der mineralischen Baustoffen) hat. Eine mögliche Erklärung könnte

die Assoziation von nachhaltigem Bauen mit dem Energieverbrauch sein, da Rückbaustoffe in diesem Zusammenhang eher selten in das Bewusstsein der Verantwortlichen treten.

*Die Rolle der Ingenieure:* Die Materialentscheidungen werden primär durch die Interaktionen mit den anderen Bauakteuren geprägt. Zu Beginn dieser Interaktionskette steht sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau der Ingenieur, dessen Entscheidung primär durch Normen und seine Erfahrung mit Rückbaustoffen bestimmt wird. Der Bezug auf Normen und Gesetze limitiert die Produkthaftung der Ingenieure, während die hohe Gewichtung der Erfahrung von Festhalten am Status quo zeugt. Dies bestätigt die kritische Rolle von Normen und Gesetzen für die Nachfrage von Rückbaustoffen [40].

*Kostenüberlegungen:* Ökonomische Aspekte werden in den meisten Entscheidungen mitberücksichtigt, sind jedoch nicht das wichtigste Kriterium. Dies widerspricht der verbreiteten Meinung, dass stets die günstigste, technisch machbare Option nachgefragt wird [76]. Ökonomische Kriterien sind wichtiger bei der Entscheidung ob nachhaltiges Bauen spezifiziert werden sollte oder nicht, als bei den nachfolgenden Materialentscheidungen. Das wiederum unterstreicht die Verbindung von nachhaltigem Bauen mit kosteneffizienten Energiesparmassnahmen wie etwa Wärmedämmung und alternativen Heizungssystemen [77].

*Unterschiede zwischen Anwendungen:* Eine klare Unterscheidungen der Anwendungen der verschiedenen Recyclingmaterialien zeigte sich im Tiefbau. Im Hochbau hingegen wird weniger zwischen Anwendungen differenziert. Bauakteure differenzieren ihre Gewichtung der Kriterien zwar nicht zwischen den verschiedenen Anwendungen, jedoch unterscheidet sich ihr Verhalten. Daraus lässt sich schliessen, dass die Verhaltensunterschiede auf der Gewichtung der Alternativen und nicht auf der Gewichtung der Kriterien beruhen.

*Methodik:* Die gewählte Tiefe der Analyse erwies sich als notwendig, da gewisse Unterschiede, wie etwa die Differenzierung zwischen verschiedenen Alternativen, erst auf der untersten Analysestufe (Gewichtung der Alternativen pro Kriterium) gezeigt werden konnte. Zudem zeigten sich auf jeder Ebene Unterschiede bei den Akteursgruppen, den Interaktionen, dem Verhalten und den Gewichtungen der Kriterien und Alternativen. Des Weiteren wird das Vorgehen durch die gute Konsistenz von Entscheidungen und Verhalten gestützt.

*Ausblick:* Die Wichtigkeit der Interaktionskriterien zeigt, dass eine Beurteilung einzelner Akteursgruppen zu kurz greifen würde und daher eine Modellierung aller Gruppen notwendig wird. Aufgrund der Heterogenität der Akteursgruppen ist es eminent wichtig, welche einzelnen Akteure miteinander interagieren. Diese gegenseitige Interaktion wird durch die Auswahl der Baupartner gesteuert, welche auf ökonomischen Überlegungen, persönlichem Kontakt, Reputation und Referenzen [78] basiert.

Viele der Entscheidungskriterien (wie etwa Rohmaterial- und Offertpreise) hängen direkt vom Angebot an Rückbaustoffen ab. Zudem können nur verfügbare Materialien nachgefragt werden. Eine Beurteilung von Szenarien ohne den Einbezug der Materialströme wäre dementsprechend aus Nachfragesicht nicht sinnvoll. Daher werden als Vorarbeit zur Nachfragemodellierung bestehende Materialflussmodelle angepasst und anschliessend ins Nachfragemodell integriert.

## 4 Materialflussanalyse

### 4.1 Einleitung und Forschungsfragen

Für die Beurteilung und Modellierung der Materialflüsse im Zusammenhang mit Angebot und Nachfrage nach mineralischen Rückbaustoffen sind zwei Aspekte zentral. Einerseits muss bestimmt werden, welche Mengen der betrachteten Anwendungen in Bauprojekten nachgefragt werden und zwar unabhängig davon, ob konventionelle Baustoffe oder Rückbaustoffe verwendet werden. Andererseits müssen die heutigen und künftigen Bauabfallflüsse abgeschätzt werden, um das Angebotspotential von Rückbaustoffen zu eruieren.

In diesem Kapitel werden daher die folgenden zwei Fragestellungen behandelt:

- Welche Mengen der betrachteten Anwendungen werden in der Schweiz und in den jeweiligen Bauprojekten nachgefragt?
- Welche Mengen und Qualitäten an mineralischen Recycling-Baustoffen können wann, aufgrund der frei werdenden Rückbaustoffe, erwartet werden?

Die Analyse der Entscheidungen von Bauakteuren in Kapitel 3 hat gezeigt, dass Rückbaustoffe im Tiefbau weitgehend akzeptiert sind. Dies bestätigen auch bisherige Studien in diesem Bereich [40, 79, 80]. Zudem ist die Strassen- und Bahninfrastruktur in der Schweiz zu einem Grossteil fertig gestellt. Der grössere Teil der Bauinvestitionen im Tiefbau fliesst seit 2000 in Unterhalts- und Umbauprojekte [81]. Daher soll im Weiteren der Schwerpunkt bei den Materialflüssen im Hochbau liegen.

#### **Methodik: Materialflussanalyse beruhend auf Bauinvestitionen und Abfallvolumen**

Im Bereich der Potentialabschätzung von Rückbaustoffen im Hochbau sind bereits umfangreiche Studien vorhanden. Insbesondere sind dabei die Arbeiten von Wüest & Partner zu nennen, welche Ende der 90er Jahre die Bauabfälle der Schweiz, basierend auf bestehenden Gebäudelagern, deren Materialisierung sowie Abbruchraten, abschätzten [12, 13]. Dieses Modell wurde kürzlich mit Daten aus der Gebäudeversicherungsstatistik des Kantons Zürich aktualisiert [82]. Ein vergleichbarer Ansatz wurde auch von Lichtensteiger [18, 83] gewählt, welcher mittels eines Kohorten-Modells und Gebäude-Archetypen die Bauabfallflüsse berechnete. Auf kantonaler und lokaler Ebene wurden von Rubli und Schneider die Potentiale von Rückbaustoffen abgeschätzt [17, 19, 80, 84] und erstmals auch die Baustoffflüsse dynamisch modelliert [85].

Daher wurde für die vorliegende Arbeit eine vereinfachte Materialflussmethodik gewählt, welche zu einem Grossteil auf den bisherigen Studien beruht. Dieses Modell beruht auf Bauinvestitionen in verschiedenen Gebäudetypen, der Materialisierung dieser Bauten sowie auf den berechneten Bauabfallvolumen aus bestehenden Studien.

*Nachfrage:* Für die Berechnung der Mengen der betrachteten Betonanwendungen wurden die Bauinvestitionen in Szenarien bis 2050 extrapoliert und mit der Materialisierung der Bauten kombiniert. Die Daten zu den Bauinvestitionen stammen aus der Bau- und Wohnstatistik des Bundesamts für Statistik (BfS) [81]. Die Materialisierung der verschiedenen Gebäudetypen wurde aus der aktualisierten Studie von Wüest & Partner [82] übernommen und mit Lichtensteiger [18] und Mauch [86] plausibilisiert. Daraus lässt sich die Materialintensität pro investierten Franken in bestimmte Gebäudeklassen im Hochbau berechnen.

*Angebot:* Zum Abschätzen des Potentials des künftigen Angebots an Rückbaustoffen wurden die gesamten Bauabfallmengen aus Wüest & Partner [82] bis 2050 in Szenarien extrapoliert. Die Zusammensetzung der Bauabfälle wurde ebenfalls aus derselben Studie übernommen und durch die Ergebnisse von Schneider und Rubli [17, 85] plausibilisiert. Somit lassen sich die Mengen an Beton- und Mischabbruch berechnen.

*Szenarien:* Die historischen Zeitreihen (1995-2008) zeigen gewisse Schwankungen, welche als makroökonomische Zyklen interpretiert werden könnten. Die sehr unterschiedlichen Phasenlängen ebenso wie die relativ kurzen Zeitreihen liessen jedoch keine Ableitung einer periodischen Trendfunktion zu. Daher wurden die Datenreihen mit Potenzialfunktionen extrapoliert, um realistische Werte auf den lange beobachteten Zeitraum (bis 2050) zu erhalten. Zu diesem Trendszenarium wurde ein Fehlerterm addiert bzw. subtrahiert, um ein maximales bzw. minimales Szenario zu erhalten. Der Fehlerterm wird mit

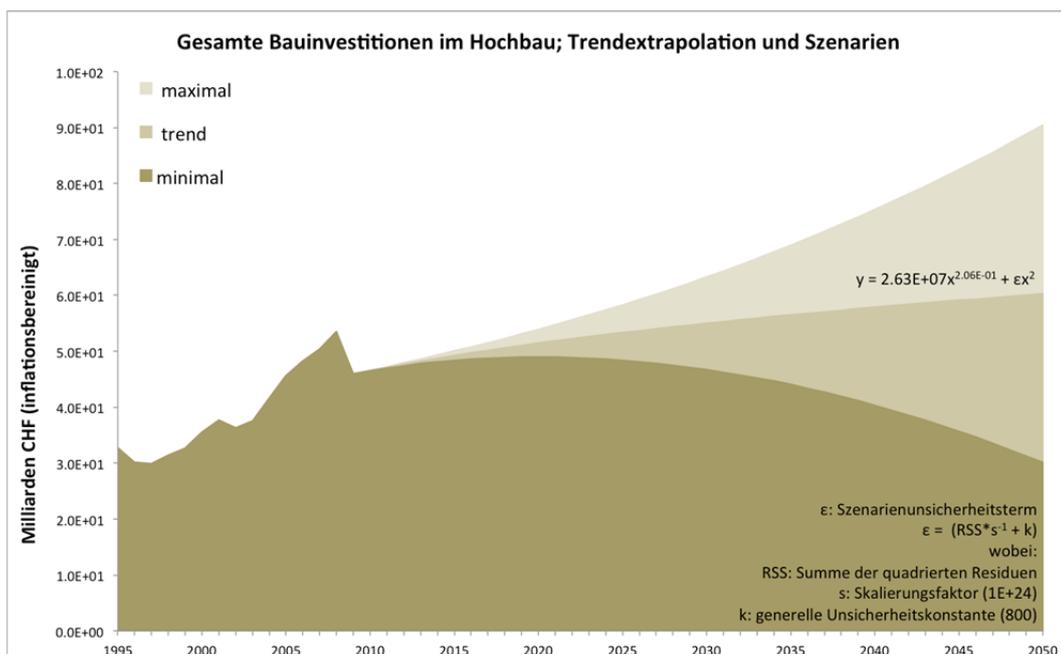
zunehmendem Abstand vom heutigen Zeitpunkt aufgrund der ansteigenden Unsicherheit grösser. Da ein Grossteil der Bauinvestitionen in Umbauten und Renovierung geht und zudem vermehrt verdichtet gebaut wird, wurden die Szenarien für Angebot und Nachfrage kombiniert. Das bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass das Schweizer Bauwerk nicht beliebig wachsen kann, ohne dass gleichzeitig auch vermehrt Bauabfall produziert wird. Dies stimmt mit bestehenden Studien zum Baustoffmanagement überein [20].

*Angebot vs. Nachfrage:* Die Modellierung des Materialflüsse liefert mit der Nachfrage nach Anwendungen den Treiber für die Modellierung der Nachfrage sowie die Verfügbarkeit der Rückbaustoffe mit den prognostizierten Bauabfallvolumen. Ein Vergleich dieser Massenströme liefert erste grobe Aussagen darüber, wie das Angebot unter verschiedenen Annahmen ausgeschöpft wird.

### Bauinvestitionen

**Abb. 11** zeigt die gesamten Bauinvestitionen im Hochbau anhand der historischen Daten des BfS von 1995 bis 2008 sowie das Minimal-, Trend- und Maximalszenario für den Zeitraum bis 2050. Bei stark zurückgehenden Investitionen (Minimalszenario) werden längerfristig Investitionen wie Mitte der 90er Jahre erwartet. Im Trendszenario steigen die Investitionen leicht an, während bei einem Maximalszenario mit einer Verdoppelung der heutigen Investitionen zu rechnen ist.

Da in den letzten 15 Jahren die prozentuale Verteilung der Bauinvestitionen auf die verschiedenen Bauherren und Gebäudekategorien praktisch unverändert geblieben ist, wurde angenommen, dass im Hochbau auch in Zukunft diesbezüglich relativ konstant investiert wird. Die Gesamtinvestitionen wurden dementsprechend auf die Gruppen der Bauherren und die Gebäudekategorien aufgeteilt.

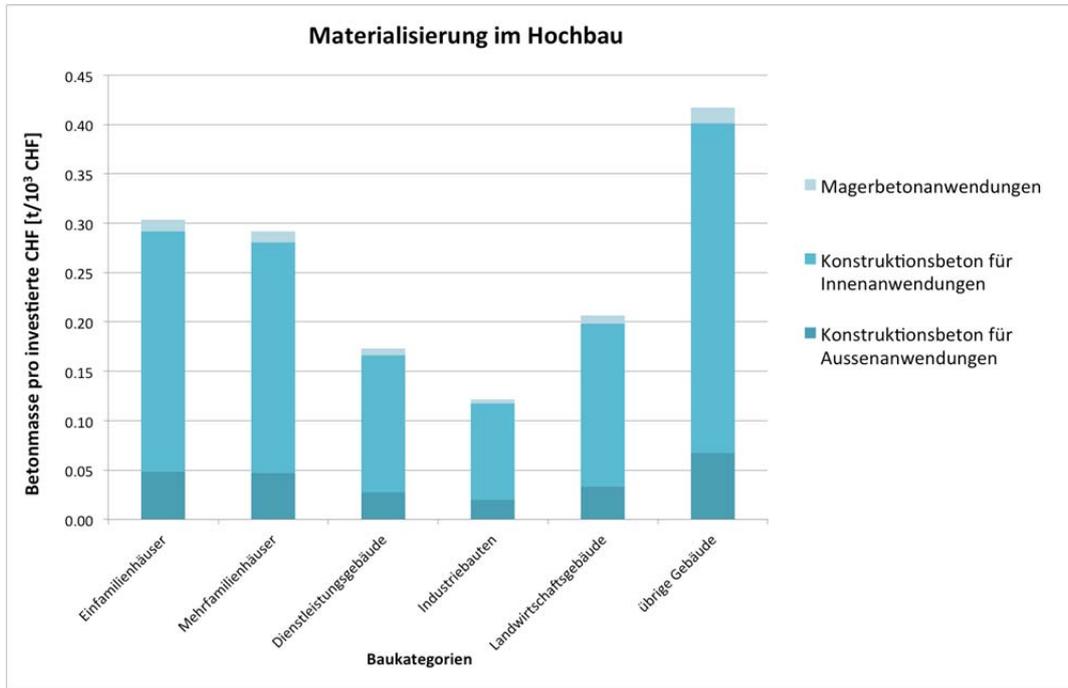


**Abb. 11:** Bauinvestitionen als Treiber der Nachfrage nach mineralischen Baustoffen in Milliarden CHF (Kaufkraft korrigiert), historische Daten 1995-2008, Trendextrapolation und Szenarien bis 2050.

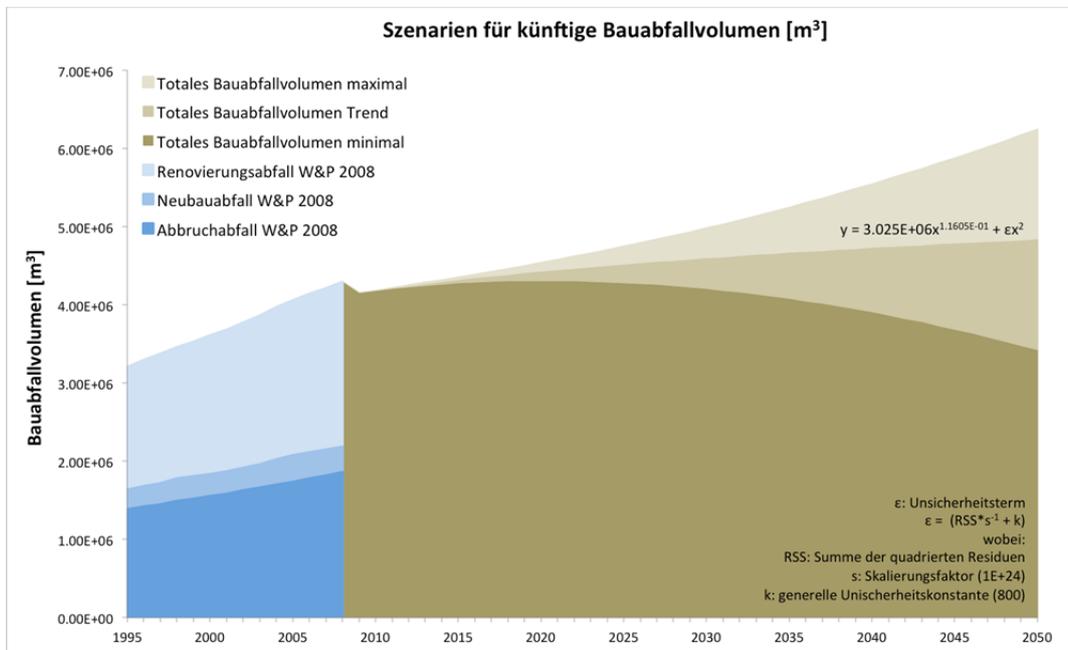
### Materialisierung

Für jede dieser Gebäudekategorien wurde daraufhin die Materialisierung anhand der Formel Verbauung von Beton pro investierten Franken berechnet. Abb. 12 zeigt die Materialisierung der verschiedenen Gebäudekategorien pro investierte tausend Franken. Es zeigt sich, dass die beiden Kategorien Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH), welche zusammen weit über die Hälfte der Investitionen ausmachen, sehr ähnlich materialisiert sind. Dienstleistungsgebäude sowie Industrie- und Landwirtschaftsbauten zeigen deutlich tiefere Betonanteile, während in sonstigen Bauten mehr Beton pro Franken verbaut wird. Für die Modellierung wurde der Durchschnittswert von 0,252 t pro 1000

CHF mit einer Standardabweichung von 0,107 t pro 1000 CHF verwendet. Mit dieser Verteilung konnte die beobachtete Variabilität gut reproduziert werden. Es wird ebenfalls klar, dass Magerbetonanwendungen nur einen Bruchteil der Mengen ausmachen und daher zum Auffangen der riesigen Abfallvolumen bei weitem nicht ausreichen.



**Abb. 12:** Materialisierung der verschiedenen Gebäudekategorien in Tonnen Magerbeton und Konstruktionsbeton bei den Innen- und Aussenanwendungen pro investierte 1000 CHF



**Abb. 13:** Bauabfallvolumen zur Potentialabschätzung des Angebots an Rückbaustoffen: 1995-2008 Datenreihen aus Wüest und Partner (2008), Trendexploration und Szenarien bis 2050.

### Bauabfallvolumen

Vergleichbar mit den Bauinvestitionen wurde wiederum ein Zeitabschnitt, in diesem Fall von der Studie von Wüest und Partner [82], von 1995 bis 2008 herangezogen, an dem die Trends bis 2050 ermittelt wurden. **Abb. 13** zeigt die erwarteten Bauabfallvolumen von verschiedenen Szenarien. Im Trendszenario steigen die Abfallvolumen nur leicht an, während im Minimalszenario die Bauabfälle auf das Niveau von 1995 sinken. Im Maximalszenario wird im Vergleich zu 1995 beinahe eine Verdoppelung erwartet. Die Herkunft des Bauabfalls je nach Neubau, Renovierung und Abbruch zeigt in den Datenreihen von Wüest und Partner (1995-2008), dass deren Anteile ebenfalls konstant blieben. Die Hauptanteile stammen aus Abbruch und Umbau.

### Bauabfallzusammensetzung

Tab. 5 zeigt die prozentuale Zusammensetzung des Bauabfalls aus dem Hochbauabbruch, Neubau und Umbau. Die Datengrundlage bildet erneut die Studie von Wüest und Partner (2008). Erwartungsgemäss sind die Anteile an Betonabbruch und Mauerwerkabbruch beim Abbruch deutlich höher als beim Umbau, da diese Gebäudeteile beim Umbau häufig stehen bleiben. Die allgemeine mineralische Fraktion (vorwiegende Leichtbauteile und Keramik) ist wiederum beim Umbau grösser. Für die Modellierung wurde dementsprechend angenommen, dass vom Gesamtabfallvolumen rund 15% Betonabbruch und rund 44% Mischabbruch stammen. Gewichtsmässig dominieren die mineralischen Bauabfälle aber noch deutlicher, da Betonabbruch 27% und Mischabbruch 45% ausmachen. Für die Berechnung der Tonnagen wurden Festkörperdichten von 2,4 t/m<sup>3</sup> für Betonabbruch und 1,632 t/m<sup>3</sup> Mischabbruch angenommen.

**Tab. 5:** Zusammensetzung des Bauabfalls aus dem Hochbau in % [m3] nach der Herkunft (Daten: BAFU [82])

Herkunft	Abbruch	Neubau	Umbau	Total	Betonabbruch	Mischabbruch
Beton	24.8%	13.8%	7.8%	<b>15.2%</b>	<b>15.2%</b>	
Strassenaufbruch	19.6%	26.2%	8.2%	<b>14.2%</b>	}	<b>44.4%</b>
Mauerwerk	31.3%	8.4%	10.7%	<b>19.0%</b>		
Mineralische Fraktion	5.8%	5.3%	16.4%	<b>11.2%</b>		
Asphalt	1.0%	1.0%	2.5%	1.8%		
Kompostierbares Material	6.3%	22.5%	33.3%	21.4%		
Holz	7.8%	22.2%	19.1%	14.7%		
Metall	0.6%	0.8%	2.0%	1.3%		
Vermischtes Material	2.8%	0.0%	0.0%	1.8%		

### Potentialvergleich von Angebot und Nachfrage

Vergleicht man nun die nachgefragten Betonanwendungen mit den potentiell verfügbaren Recyclingaggregaten so können erste Aussagen über die Ausschöpfung dieses Potentials unter verschiedenen Nachfrageszenarien gemacht werden. Da Investitions- und Abfallszenarien gekoppelt wurden, werden im Folgenden die Trendszenarien betrachtet. Einerseits wurde dabei die gesamte Nachfrage nach Recyclingbeton von den heutigen rund 11%, auf 50% und 100% gesteigert. Andererseits wurde der Anteil an Recyclingbeton aus Mischabbruch RC-M von 10% auf 70% gesteigert. Für jedes dieser Szenarien wurden die beiden Aggregatssubstitutionsraten von 25% (minimal Anteil für RC) und 40% (Anteil für Zusatzkredits im MinergieEco Label) betrachtet.

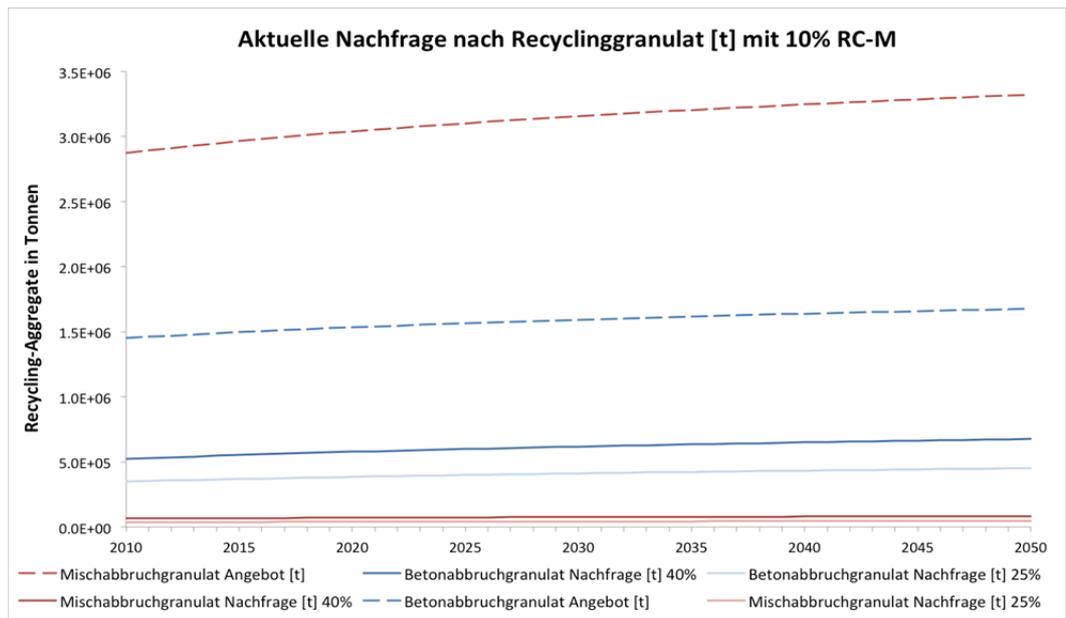
Abb. 14 bis Abb. 16 zeigen die Ausschöpfung der Sekundärressourcen in der Schweiz für die in der Diagonalen der Tabelle 6 genannten Szenarien. Diese gehen von der aktuellen Situation von 11% RC-Nachfrage, über ein Szenario, in dem gleichviel RC wie CC nachgefragt würde, hin zu Situationen, in denen RC zum Standard ernannt worden wäre.

Die heutige Nachfrage (Abb.14) bevorzugt klar RC-C. Dementsprechend werden die potentiellen Mengen an Betonabbruchgranulat auch bereits zu 25 bis 38% wiederverwendet, während Mischabbruch kaum (1 bis 2%) wiederverwendet wird. Falls 50% der Betonanwendungen mit Recyclingbeton gemacht würden und davon wiederum die Hälfte

RC-M wäre (Abb. 15), könnten bei einer Substitutionsrate von 40% sämtliche Betonabbruch- sowie rund 50% der Mischabbruchflüsse aus dem Hochbau wieder im Hochbau verwendet werden. Würde RC zum Standard und in sämtlichen Projekten nachgefragt werden, so könnten mit den heutigen Aggregatssubstitutionsraten von 25 bis 40% sowohl Beton- als auch Mischabbruchflüsse innerhalb des Hochbaus wiederverwendet werden (Abb. 16).

**Tab. 6:** Ausschöpfung des Beton- und Mischabbruchangebots über 50 Jahre bei unterschiedlicher RC-Nachfrage (11% - 100%), Anteil an RC-M (10-70%) und der Aggregatsubstitutionsrate (25 oder 40%)

Anteil RC an Gesamt-nachfrage	Anteil RC-M an RC Nachfrage	10% RC-M		50% RC-M		70% RC-M		
		Aggregats-substitutionsrate	25%	40%	25%	40%	25%	40%
11%	Betonabbruch		25%	38%	14%	21%	9%	16%
	Mischabbruch		1%	2%	7%	12%	8%	13%
50%	Betonabbruch		100%	100%	65%	95%	38%	74%
	Mischabbruch		6%	11%	30%	53%	42%	57%
100%	Betonabbruch		100%	100%	100%	100%	76%	100%
	Mischabbruch		12%	21%	60%	100%	83%	100%



**Abb. 14:** Aktuelle Ausschöpfung bei 11% RC-Nachfrage (wovon 10% RC-M)

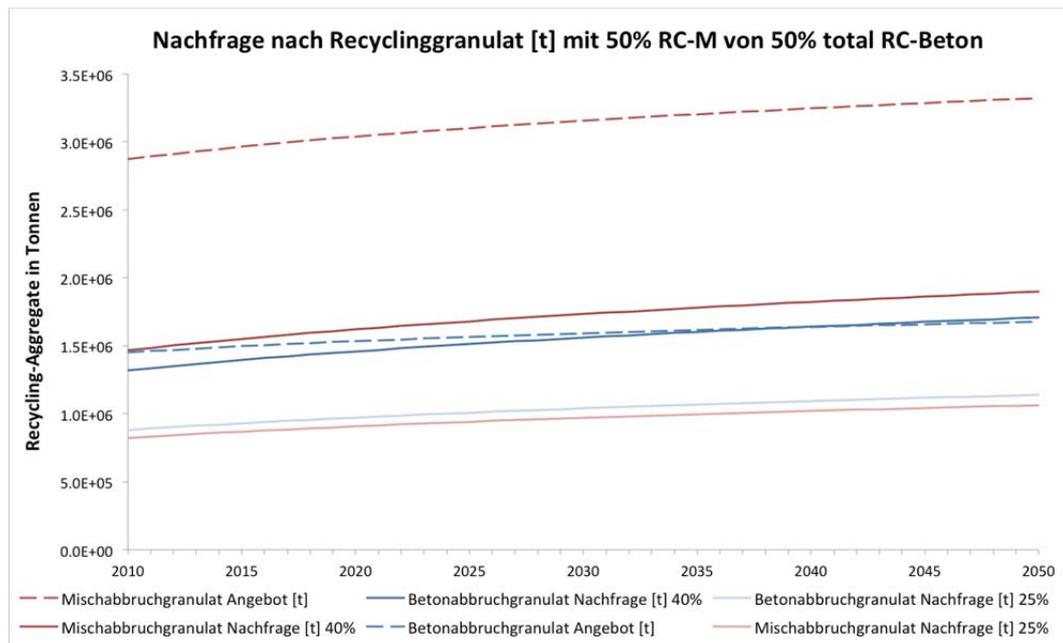


Abb. 15: Potentielle Ausschöpfung bei 50% RC-Nachfrage (wovon 50% RC-M)

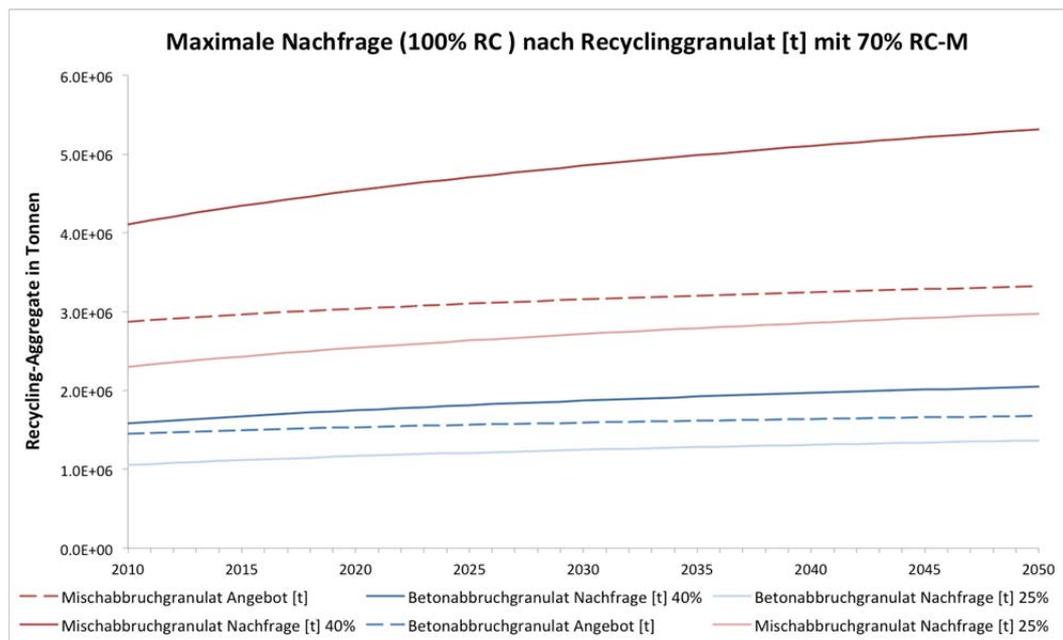


Abb. 16: Potentielle Ausschöpfung bei 100% RC-Nachfrage (wovon 70% RC-M)

## 4.2 Zusammenfassung

**Bauinvestitionen:** Für die Modellierung wurden verhältnismässig stabile Szenarien für die künftigen Baustoffinvestitionen entwickelt. Obwohl Investitionen auf dem Bauparkt starke Fluktuationen zeigen, konnten keine schlüssigen Investitionszyklen abgeleitet werden.

**Materialisierung:** Die sehr kleinen Mengen an Magerbetons, welche nachgefragt werden, zeigen, dass nur ein Bruchteil des Abbruchmaterials in dieser Anwendung untergebracht werden kann. Aufgrund der generell abnehmenden Nachfrage im Tiefbau und der Vorbehalte der Tiefbauakteure gegenüber Recyclingmaterialien aus dem Hochbau scheint es daher notwendig, Konstruktionsbetonanwendung aus Recyclingbeton anzustreben.

**Baubabfallzusammensetzung:** Sowohl im Bezug auf das Volumen als auch hinsichtlich des Gewichts dominieren die mineralischen Abfallfraktionen den Bauabfall. Dabei ist die

Menge an Mischabbruch gemessen am Volumen dreimal und gewichtsmässig fast doppelt so gross wie die an Betonabbruch. Daraus folgt, dass bei sinkenden Deponievolumen für Inertstoffe [87] vermehrt alternative Verwendungsmöglichkeiten für die ansteigenden Mischabbruchmengen gefunden werden müssen.

*Ausschöpfung des Potentials:* Der Vergleich des potentiellen Angebots an Sekundärbaustoffen mit der Nachfrage in verschiedenen Szenarien zeigt, dass bei herkömmlicher Nachfrage (~11%) sowohl vom potentiellen Beton- als auch vom Mischabbruch nur ein Bruchteil nachgefragt wird. Bei 50% Nachfrage, 40% substituierten Aggregaten und einem Anteil von ~50% RC-M würde der Betonabbruch praktisch komplett und der Mischabbruch zu rund 50% wiederverwertet werden. Erst bei maximaler Nachfrage (100%), 40% substituierten Aggregaten und einem Anteil von ~70% RC-M könnten die anfallenden mineralischen Beton- und Mischabbruchströme vollständig im Hochbau untergebracht werden.

*Fazit:* Alternative Verwendungsmöglichkeiten, insbesondere von Mischabbruch, sind vermehrt zu betrachten, da die herkömmlichen Wiederverwertungs- und Entsorgungspfade (Magerbeton und Inertstoffdeponien) limitiert sind. Neben der kontinuierlichen Erhöhung der RC-Nachfrage ist die Substitutionsrate (Anteil des natürlichen Aggregats, welches durch RA substituiert wird) entscheidend für eine Ausschöpfung des potentiellen Angebots an Recyclingaggregaten. Zusätzlich muss aber auch der Anteil an RC-M erhöht werden, damit signifikante Mengen an Mischabbruch aufgefangen werden können. Dies ist insbesondere zu beachten, da die erwarteten Mengen an Mischabbruch beinahe dreimal so hoch sind wie die des Betonabbruchs.

## 5 Agentenbasierte Angebot-Nachfrage-Modellierung

Die folgenden Ausführungen basieren auf einer Publikation im Journal of Social Simulation and Artificial Societies [88] (Anhang I.3).

### 5.1 Einleitung und Forschungsfragen

Agentenbasierte Modellierung (ABM) wird zunehmend zu einem Standardtool zur Analyse von Transitionen in komplexen sozio-ökologischen [89, 90] und sozio-technischen Systemen [91-94]. Der Grund dafür ist vor allem ihre Fähigkeit Effekte von interagierenden heterogenen Individuen und Netzwerken auf das System zu modellieren [95, 96]. Baustoffmanagement kann als ein komplexes, sozio-technisches System bezeichnet werden, in dem verschiedene Bauherren in Interaktion mit Architekten, Ingenieuren und Unternehmern bestimmen, welche Baustoffe im Projekt eingesetzt werden.

Die meisten bisherigen ABM-Studien von sozio-technischen Systemen haben einen Energiefokus und untersuchten etwa Konsumgüter wie Glühlampen [97], Energieerzeugung und Transformation auf Haushaltsebenen wie Photovoltaiksysteme [98], Haushalts-Wärme-Kraftkoppelung [99], Heizungssysteme [100], Biomasse-Elektrifizierung [101] und Nutzerverhalten in Gebäuden [102]. Erst kürzlich wurde ABM auch für nachhaltiges Materialmanagement eingesetzt, um die Hintergründe von Recycling und Materialflüssen besser zu verstehen [103]. Bisherige ABM-Studien im Baubereich fokussierten sich mehrheitlich auf die Haushalte und vernachlässigten deren Interaktion mit Anbietern, Unternehmern und Designern von verschiedenen Technologien [100]. Daraus liess sich schliessen, dass die Effekte interagierender Bauakteure auf die Adaption neuer Technologien, wie etwa Rückbaustoffe, noch weitgehend unerforscht sind.

Bisher wurden die relevanten Bauakteure bezüglich der Nachfrage nach Rückbaustoffen identifiziert. Zudem wurden deren Interaktionen, Verhalten und Entscheidungen analysiert (Kapitel 3). Ebenfalls wurden die Mengen nachgefragter Betonanwendungen und das potentielle Angebot von Sekundärbaustoffen bestimmt (Kapitel 4). In Kapitel 4 wurde beschrieben, welche Nachfrageszenarien zu welcher Ausschöpfung dieser Sekundärressourcen und daher einer Schonung der Deponievolumen führen würden. Die Frage, die sich nun stellt, ist, wie die Entscheidungen der interagierenden Bauakteure beeinflusst werden können. Und dies möglichst so, dass möglichst viele Rückbaustoffe nachgefragt werden bzw. dass das Potential von Sekundärressourcen ausgeschöpft wird. Zudem sollte in einem realistischen Nachfrage-Angebot-Modell die Nachfrage durch das potentielle Angebot limitiert werden.

Daher wird in diesem Kapitel folgender Fragestellung nachgegangen:

- Von welchen Schlüsselfaktoren hängt die Nachfrage nach mineralischen Recyclingbaustoffen ab und wie kann diese modelliert werden?

Obwohl die Interaktionen und Entscheidungen der Bauakteure empirisch erhoben wurden, lässt deren Implementation in einem Computermodell immer noch erheblichen Spielraum zu. Daher muss ein Modell zuerst operational validiert werden. Die Validierung analysiert, welche Algorithmen für das Verhalten der Agenten ein realistisches Verhalten auf der Systemebene liefern. Weiter ist entscheidend, auf welche Veränderungen von Modellparametern das Modell wie sensitiv reagiert. Schliesslich sind aber nicht alle Variablen zugänglich und nur bestimmte können durch Massnahmen wie etwa Kampagnen oder neue Gesetze beeinflusst werden.

Daher wurden folgende Detailfragen bearbeitet:

- Wie beeinflusst die lokale Akteursinteraktion die Nachfrage auf der Systemebene? (operationale Validierung)
- Von welchen Schlüsselfaktoren hängt die Nachfrage nach mineralischen Recycling Baustoffen ab? (Sensitivität)
- Welche Parameterkombinationen führen zu maximaler Wiederverwertung künftiger Bauabfallströme? (Szenarien)

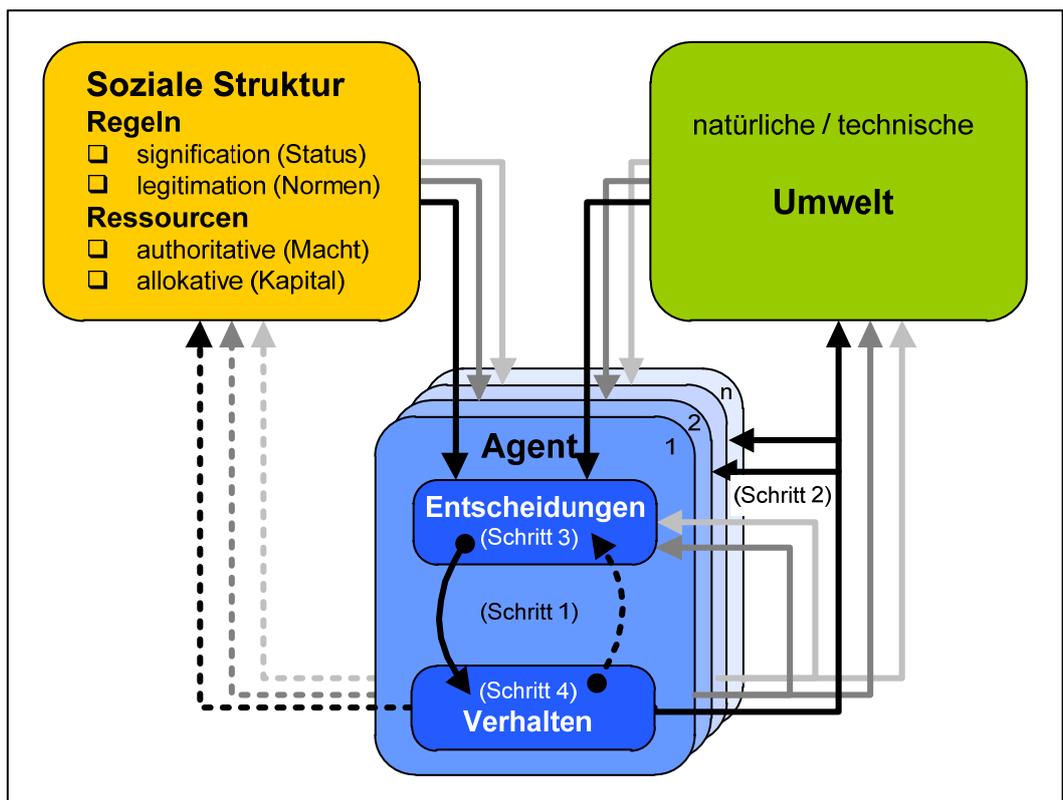
## 5.2 Methodik: Agentenbasierte Modellierung

### Grundzüge der Methodik

Agentenbasierte Modellierung (ABM) beruht auf der Idee, dass Systemverhalten aus den Aktionen und der lokalen Interaktion der Akteure oder eben der „Agenten“ hervorgeht [104-106]. ABM bietet sich insbesondere an, wenn die Akteursgruppen sehr heterogen sind oder die Interaktion eine zentrale Rolle für das betrachtete Problem spielt. Beide Eigenschaften treffen auf die interagierenden Bauakteure in der Schweiz zu, wie die bisherigen Analysen zeigten.

Abb. 17 zeigt den theoretischen Rahmen [49], welcher auf der Strukturationstheorie von Giddens [107] und der strukturierten Akteursanalyse [56] basiert. Die Strukturationstheorie von Giddens beschreibt als soziale Prozesstheorie, wie die soziale Struktur, im Sinne von Regeln und Ressourcen, aus dem lokalen Verhalten entsteht [107]. Die strukturierte Akteursanalyse liefert den Ansatz, wie die Akteure auf den verschiedenen Ebenen analysiert werden können [56]. Die vier Schritte des in Kapitel 3 vorgestellten Agenten-Operationalisierungsansatzes beruhen auf diesem Rahmen.

Jeder Agent trifft gewisse Entscheidungen, welche sowohl von der sozialen als auch von der natürlichen und technischen Umwelt, der direkten Interaktion mit anderen Agenten sowie eigenem früheren Verhalten abhängen. Diese Entscheidungen bestimmen dann zu einem grossen Teil das Verhalten der Agenten. Das Verhalten hat einerseits einen direkten Einfluss auf die Entscheidungen anderer Akteure sowie andererseits auf die natürliche und technische Umwelt. Der Einfluss auf die soziale Struktur ist hingegen mit einer Zeitverzögerung zu erwarten.



**Abb. 17:** Agentenbasierte Modellierung; Entscheidungen, Verhalten und Interaktion der Agenten untereinander und mit der natürlichen, technischen und sozialen Umwelt (Durchgezogene Linien zeigen synchrone, gestrichelte Linien dichotome Einflüsse).

### Modellbeschreibung

Da die Schlüsselakteure der Nachfrage und deren Interaktionen, Entscheidungen und Verhalten bereits in Kapitel 3 besprochen wurden, soll es nun um die Implementierung des Verhaltens in das Modell gehen. Für die Beschreibung des Modells wird sich dabei mehrheitlich an das ODD-Protokoll gehalten, welches den Überblick, die Designprinzipien sowie die Details des Modells spezifiziert [99, 108, 109]. Der Überblick sowie die Hauptprozeduren sind im Folgenden aufgeführt. Für genauere Informationen zu den Designprinzipien und Details wird hier auf die Originalpublikation verwiesen [88].

*Modellziel:* Das Nachfragemodell hat zum Ziel, Entscheidungen und Verhalten von interagierenden Bauakteuren in Bezug auf mineralische Recyclingbaustoffe zu repräsentieren. Dabei steht die Wahl zwischen Recyclingbeton und konventionellem Beton im Vordergrund. Mittels des Modells sollen die Effekte der lokalen Interaktion auf die Nachfrage sowie geeignete Ansatzpunkte für einen Abgleich von Angebot (Bauabfall) und Nachfrage gefunden werden.

*Modelltreiber, Agenten und Umfang:* Der Modelltreiber der Bauaktivität sind die jährlichen Bauinvestitionen wie sie in Kapitel 4 vorgestellt wurden (siehe **Abb. 11**). Diese werden in einzelne Projekte aufgespalten und von den Bauherren ausgeführt. Hierbei haben die verschiedenen Bauherrngruppen unterschiedliche Projektgrößen. Das Angebot von Recyclingaggregaten wird durch das anfallende Bauabfallvolumen bestimmt (siehe **Abb. 13**). Sowohl Bauinvestitionen als auch Bauabfallvolumen werden über externe Parameter gesteuert. Als Agenten wurden private, kommerzielle und öffentliche Bauherren, Architekten, Ingenieure und Unternehmer ausgewählt. Zudem wurden Projekte als passive Entitäten modelliert, um das Verfolgen von Entscheidungen und Materialflüssen zu vereinfachen. Das Modell hat folgenden zeitlichen, räumlichen und massstäblichen Umfang:

Zeit:                Simulationsschritt = 1 Jahr, (2010 - 2050)  
 Raum:             Virtueller Raum => Interaktion auf lokaler Ebene  
 Masstab:         1:100 (100 x weniger Akteure, 100 x grössere Projekte)

Abb. 18 zeigt den Prozessüberblick über den wichtigsten Algorithmus, welcher für jedes Simulationsjahr ausgeführt wird. Zuerst werden die jährlichen Bauinvestitionen berechnet und auf individuelle Projekte aufgeteilt. Nachdem die potentiell verfügbaren Recyclingaggregate aufgrund der Bauabfallmengen berechnet wurden, werden nun die Projekte in einer zufälligen Reihenfolge an die Bauherren (AA) verteilt, welche die erhaltenen Projekte ausführen. Danach werden die globalen Nachfragevariablen sowie die Agenteneigenschaften gemäss den ausgeführten Projekten aktualisiert. Zum Schluss werden sämtliche Projekte, welche ausserhalb der Erinnerungsfunktion der Agenten liegen, gelöscht.

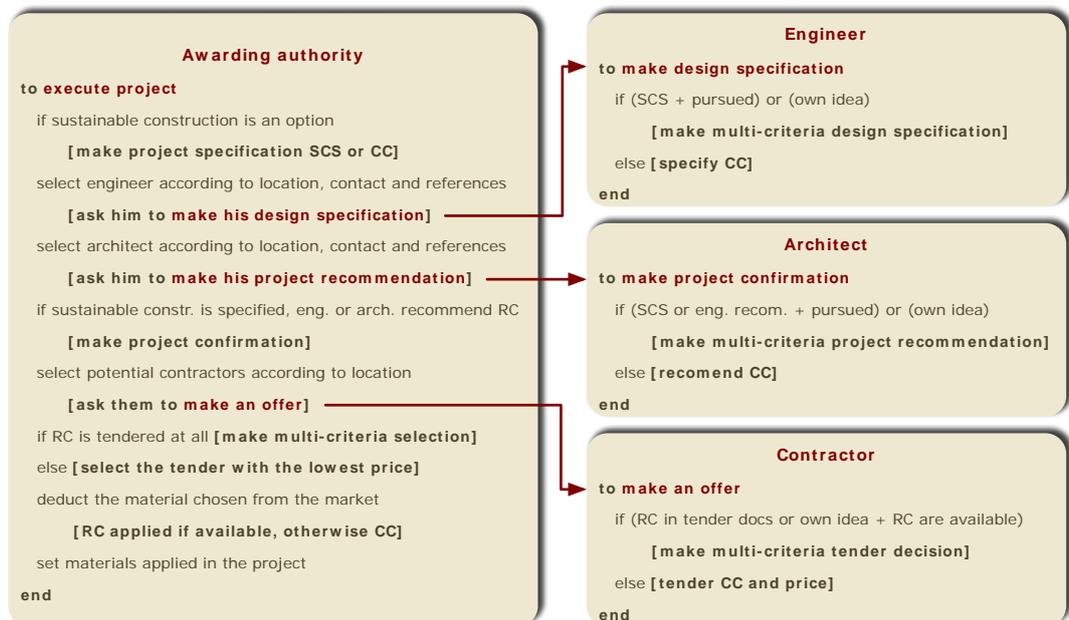
```

for each year (< simulation end year)
  calculate annual investments and create this year's projects
  calculate annual potential supply of recycled aggregates
  distribute projects to AA and execute projects randomly
  update global demand values and agent properties
  delete projects older than agents-experience-time
end
  
```

**Abb. 18:** Hauptprozess des Modells spezifiziert in „Pseudocode“

Die wichtigste Subroutine innerhalb des Hauptprozesses ist eindeutig die Projektausführung, welche in Abb. 19 dargestellt ist. Der Ablauf folgt grösstenteils der Akteursinteraktion wie sie in Kapitel 3 vorgestellt wurde (siehe Abb. 4). Sämtliche Entscheidungen werden im Projekt gespeichert und sind danach für die involvierten Akteure sichtbar. Der

Bauherr führt zunächst die Projektspezifikation durch, jedoch nur, wenn die Nachhaltigkeit des Bauens von Bedeutung ist. Danach wählt er einen Ingenieur gemäss Lage, Beziehungen und Referenzen aus. Dieser erstellt dann die Designspezifikation. Falls der Bauherr nachhaltiges Bauen vorgesehen hat, werden Rückbaustoffe als Option berücksichtigt. Ist dem nicht so, empfiehlt der Ingenieur aufgrund der eigenen Erfahrung konventioneller Beton. Der Bauherr wählt dann den Architekten wieder anhand der Kriterien Lage, Beziehungen und Referenzen aus. Der Architekt gibt daraufhin die Projektempfehlung, bei der wiederum Rückbaustoffe nur dann als Option in Erwägung gezogen werden, falls der Bauherr nachhaltiges Bauen spezifiziert hat oder der Ingenieur RC empfiehlt. Sonst wird CC empfohlen. Mit der Empfehlung des Architekten bestätigt dann der Bauherr das Projekt und wählt innerhalb seines Einzugsgebiets Unternehmer für die Submission aus. Die Unternehmer reichen daraufhin eine Offerte ein. Bei der Entscheidung, welche Materialien sie offerieren, sind Rückbaustoffe nur eine Option, falls diese verfügbar sind und in der Ausschreibung definiert wurden oder sie aufgrund eigener Erfahrung als mögliche Baumaterialien eingeschätzt werden. Falls der Bauherr Offerten mit RC erhält, trifft er eine Multi-Kriterien-Entscheidung, ansonsten erhält der Unternehmer mit dem tiefsten Preis den Zuschlag. Zuletzt werden die Materialien auf dem Markt nachgefragt (falls verfügbar) und im Projekt angewandt.



**Abb. 19:** Überblick über die wichtigste Subroutine „Projektausführung“ in „Pseudocode“

### Modellentwicklung

Die genannte Modellbeschreibung stellt die finale Version des implementierten Modells dar. In der Entwicklung mussten jedoch verschiedene Versionen getestet werden. Dabei wurde mit sehr simplen Modellen gestartet und sukzessive die Komplexität so erhöht bis einerseits das konzeptionelle Modell der Entscheidungen und Interaktionen realistisch wiedergegeben werden konnte (konzeptionelle Validierung) und andererseits das Verhalten auf Systemebenen plausible Resultate zeigte (operationale Validierung).

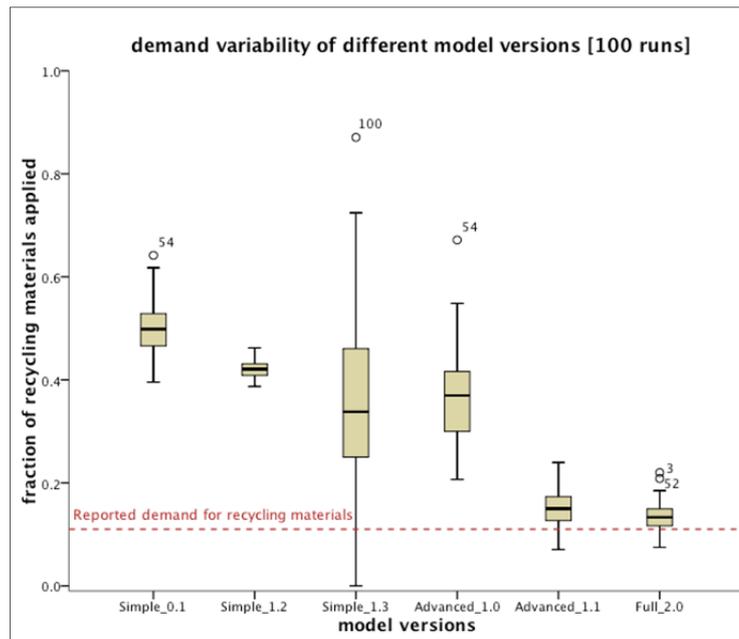
Abb. 20 erläutert die Variabilität der RC-Fraktion in verschiedenen Entwicklungsphasen im Vergleich zur beobachteten Nachfrage. Version Simple\_0.1 beruht auf der Interaktion der Akteure aber Zufallsentscheidungen und ergibt daher eine 50% Nachfrage sowie erste Auskunft über die Verteilungsbreite. In Version Simple\_1.2 wurden empirische Entscheidungsparameter, jedoch unscharfe Entscheidungen, wobei die gesamte Reihenfolge der Optionen und nicht nur die beste Alternative kommuniziert werden, implementiert. Daraus resultiert, dass sämtliche Projektentscheidungen zur Mitte tendieren und die Streuung kleiner wird. Sobald realistischere, diskrete Entscheidungen eingeführt werden

(Simple\_1.3), steigt die Streuung sehr stark an. Wie das erste Modell der zweiten Phase (Advanced\_1.0) zeigt, ist dies vor allem ein Effekt der Anzahl der Agenten im Modell. Die bisherigen Modelle waren alle noch deutlich von den beobachteten 11% RC-Fraktion entfernt. Erst die Limitierung der Entscheidungsoptionen (Advanced\_1.1) bringt den Output in den aktuellen Bereich. Die finale Version (Full\_2.0) schmälert die Verteilung weiter, erhöht aber vor allem die konzeptionelle Validität des Modells.

Tab. 7 zeigt, wie die verschiedenen Konzepte schrittweise zu den Modellversionen hinzugefügt wurden. Generell wurden drei Entwicklungsphasen unterschieden. In der ersten Phase (simple) wurden mit kleinen Agentenzahlen die Grundkonzepte wie beispielsweise diskrete oder unscharfe Entscheidungen oder Materialverfügbarkeit getestet. In der zweiten Phase (advanced) sind die Agentenzahlen erhöht, die Entscheidungsoptionen limitiert und Selektionskriterien eingeführt worden. In der letzten Phase (full) wurden explizite Materialflüsse und Bauinvestitionen als Treiber eingeführt.

**Tab. 7:** Konzepte und Eigenschaften, welche in den verschiedenen Phasen der Modellentwicklung sukzessive hinzugefügt wurden

Konzepte	Phase Version	simple						advanced						full		
		0.1	1.1	1.2	1.3	2.0	2.1	1.0	1.1	1.2	2.0	2.1	2.2	1.0	1.1	2.0
Anzahl klein (120)		✓	✓	✓	✓	✓	✓									
Agenten gross (5877)								✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Entscheidungen zufällig		✓														
	empirisch basiert		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
unscharf		✓	✓	✓		✓										
diskret					✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
limitierte Optionen								✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Multi-Kriterien										✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reaktion und Aktion																✓
empirische Interaktionskriterien				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Offerten basierte Unternehmerwahl										✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Referenz & Kontakt Auswahl													✓	✓	✓	✓
Update der Erfahrungsparameter												✓	✓	✓	✓	✓
preissensitive ökon. Kriterien															✓	✓
Image & Trend sensitive															✓	✓
Material unlimitiert		✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Verfügbarkeit limitiert						✓	✓	✓	✓						✓	✓
Bauwahrscheinlichkeit als Treiber		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
Bauinvestitionen als Treiber														✓	✓	✓
Model Projektentscheidungen		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
Output Explizite Materialflüsse															✓	✓



**Abb. 20:** Variabilität der Nachfrage nach RC (fraction of recycling materials applied) in verschiedenen Entwicklungsphasen (je 100 Simulationdurchgänge) im Vergleich zur beobachteten Nachfrage (rot gestrichelte Linie).

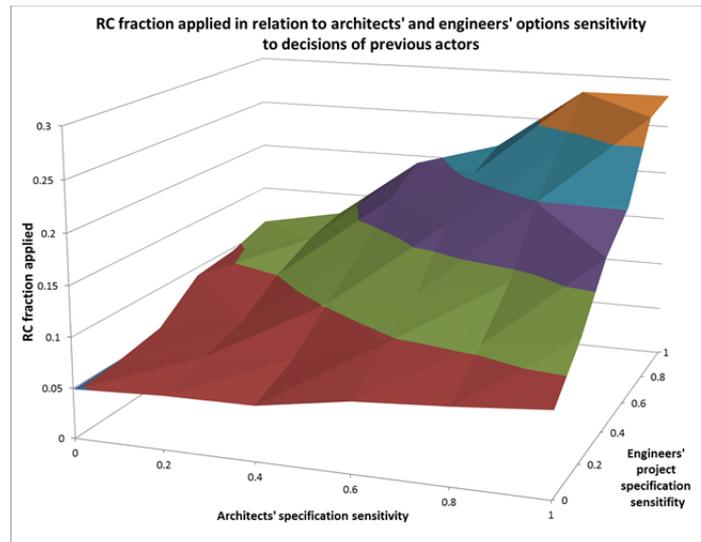
## 5.3 Resultate: Nachfragesensitivität und Szenarienanalyse

### Sensitivitätsanalyse

Nachdem in der Modellentwicklung die erste Detailfrage nach der besten Implementation der Akteursinteraktion behandelt wurde, soll es sich nun um die Sensitivität des Modeloutputs handeln. Da die Fragestellung darauf abzielt, wie die Nachfrage nach Recyclingbeton zu erhöhen ist, wird in der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse primär die RC-Fraktion als Output-Parameter betrachtet.

Obwohl Bauherren im Hochbau oft nachhaltiges Bauen spezifizieren, werden in den Materialentscheidungen der Fachleute meistens konventionelle Baustoffe empfohlen. Deshalb wurde zuerst untersucht, wie gross der Einfluss der Vorgabe auf das Vorhandensein von RC als Handlungsoption bei Architekten und Ingenieuren ist. Dafür wurde ihre Sensitivität auf eine solche Vorgabe von unabhängig (0) bis (wenn nachhaltige Bauen, dann ist RC immer eine Option (1) variiert. Die Entscheidungskriterien und Gewichte wurden stabil gehalten.

Abb. 21 zeigt, dass sobald Architekten und Ingenieure nachhaltiges Bauen mit Rückbaustoffen assoziieren und diese dann auch als Option betrachten, die Nachfrage nach RC deutlich erhöht wird. Würden sie dies konsequent tun so könnte die RC-Fraktion auf 27% gesteigert werden.



**Abb. 21:** Veränderung der Nachfrage nach RC (RC fraction applied) in Abhängigkeit davon wie stark Architekten und Ingenieure eine Vorgabe des Bauherrn nach nachhaltigem Bauen mit RC assoziieren (specification sensitivity) und danach als Option in ihre Entscheidungen mitberücksichtigen.

Abb. 22 zeigt, dass das Bewusstsein der Architekten und Ingenieure einen kleineren Einfluss hat als die Reaktion auf eine Vorgabe für nachhaltiges Bauen. Dies scheint auf den ersten Blick widersprüchlich, da ja in beiden Fällen nur die Verfügbarkeit der Option verändert wird. Der Grund für den deutlich stärkeren Effekt der Reaktion ist, dass bei einer Vorgabe für nachhaltiges Bauen der Bauherr auch eher bereit ist RC einzusetzen. Falls er nicht nachhaltiges Bauen vorgegeben hat, ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass er auf den Vorschlag von Architekten oder Ingenieuren eingeht, RC einzusetzen.

Als einer der häufigsten Hinderungsgründe für eine stärkere Verbreitung von RC wurde die Preisdifferenz genannt. Ökonomische Kriterien wurden demnach auch in fast jeder Entscheidung mitberücksichtigt, auch wenn sie nicht immer als wichtigstes Kriterium galten. Deshalb wurde als nächstes untersucht, wie sensitiv die Nachfrage auf Veränderungen der Preisdifferenz zwischen RC und CC reagiert. **Abb. 23** zeigt die Preiselastizität der RC-Fraktion. Bei gleichen Preisen werden die heutigen rund 11% RC nachgefragt. Wird die Preisdifferenz negativ und RC einhergehend billiger, steigt die Nachfrage zuerst stark an, scheint dann aber bei knapp über 20% zu stagnieren. Ebenso senkt ein Preiszuschlag für RC die Nachfrage zuerst drastisch, stagniert danach aber bei ca. 5%. Das bedeutet, dass die RC-Nachfrage sensitiv auf Preisdifferenzen vor allem im Bereich  $\pm 20\%$  reagiert. Grob lässt sich daraus ableiten, dass sich pro 1% Preisdifferenz die RC-Fraktion um rund 0.6% verschiebt.

RC fraction applied in relation to architects and engineers RC option awareness and their specification sensitivity

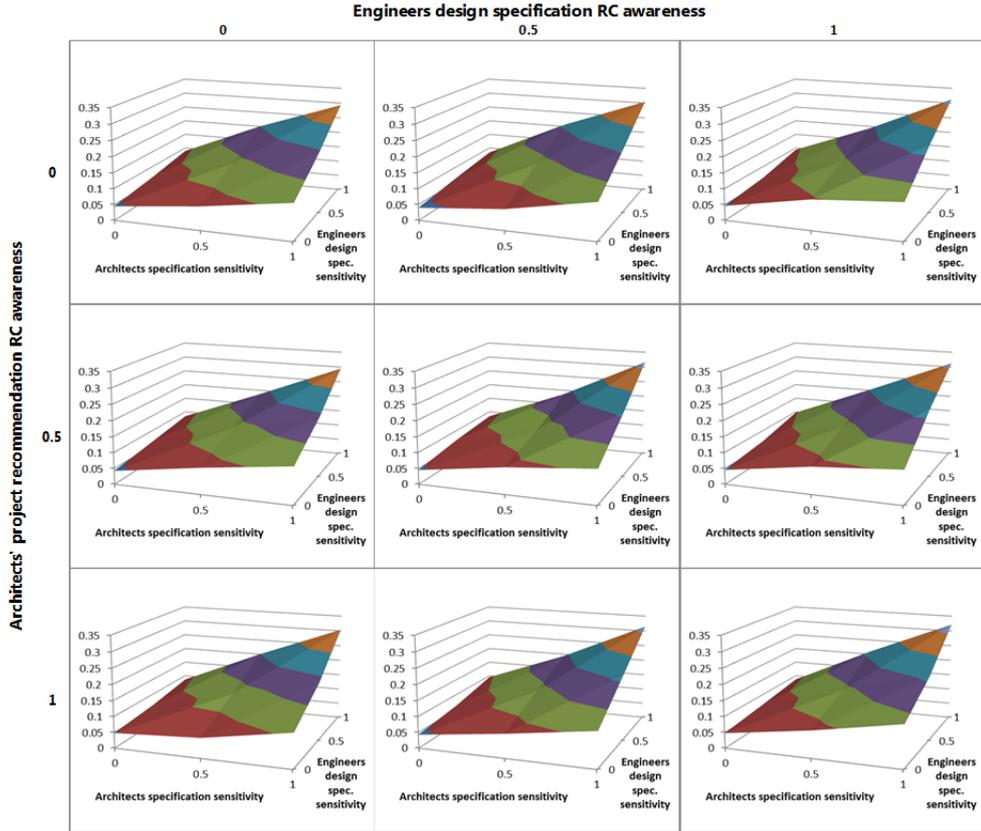


Abb. 22: Einfluss der Assoziation einer Vorgabe nach nachhaltigem Bauen mit RC (specification sensitivity) vs. Bewusstsein der RC-Option von Architekten (project recommendation RC awareness) und Ingenieuren (design specification RC awareness), gemessen an der prozentuellen Nachfrage nach RC (RC fraction applied).

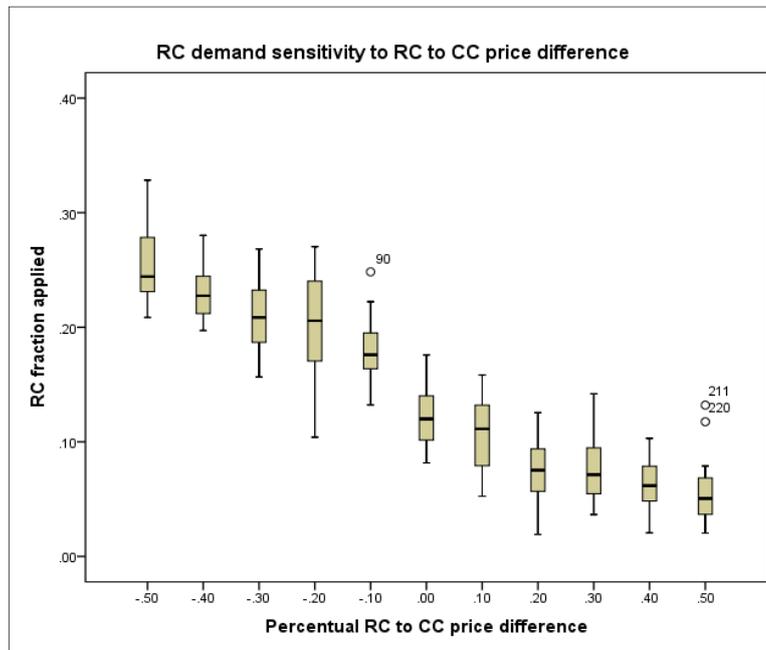


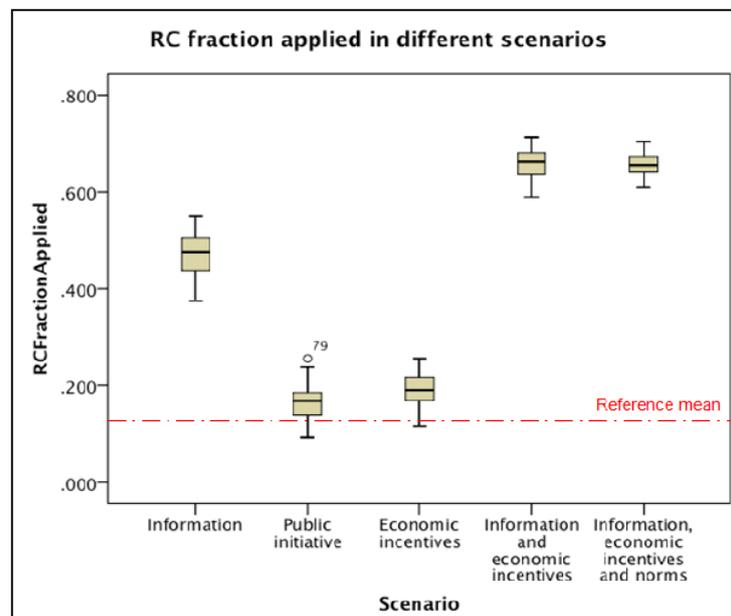
Abb. 23: Preiselastizität der Nachfrage (RC fraction applied) im Verhältnis zur prozentuellen Preisdifferenz zwischen RC und CC (negative Werte bedeuten tiefere Preise für RC).

## Szenarienanalyse

Nachfragesensitivitäten geben einen ersten Einblick, welche Parameterkombinationen zu einer Erhöhung der Nachfrage führen würden. Da nicht alle Parameter für Massnahmen zugänglich sind, wurden folgende Szenarien entwickelt:

1. Information: Erhöhung der Bekanntheit nachhaltigen Bauens bei allen Bauherren (75% diskutieren über nachhaltiges Bauen), Assoziation von Recyclingbeton und nachhaltigem Bauen bei Architekten und Ingenieuren (100% sobald nachhaltiges Bauen spezifiziert wird, ist RC eine Option)
2. Öffentliche Hand: Bei allen öffentlichen Projekten wird über nachhaltiges Bauen diskutiert (100%), die RC-Normen werden weiter ausgebaut und stärker verbreitet (bisher werden Normen immer noch zuungunsten von RC wahrgenommen 0.45=>0.75)
3. Ökonomische Anreize: 10% Preisvorteil von Recyclingbeton als Rohmaterial, Verbesserung der Kriterienwerte für ökonomischen Aspekte (e.g. erwarteter Preis) um dieselben 10%.
4. Information und Preisvorteile: Siehe 1. aber kombiniert mit 5% Preisvorteil
5. Kombiniert: Information wie in 1., 5% Preisvorteil wie in 4. und Verbreitung der RC-Normen (45%=>55%)

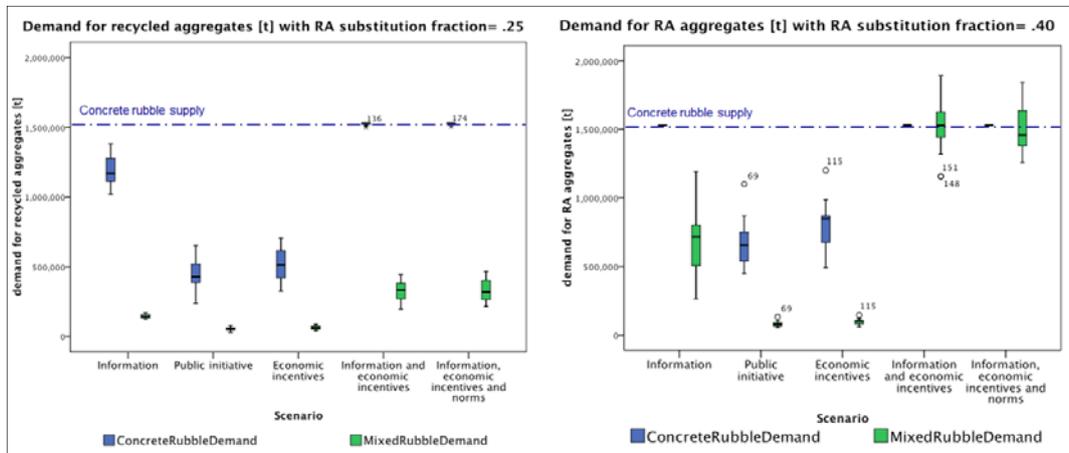
Abb. 24 zeigt den RC Anteil in den verschiedenen Szenarien. Es wird deutlich, dass Informationen der Bauakteure den grössten Einfluss haben. So könnte der Anteil an RC in einem reinen Informationsszenario auf fast 50% gesteigert werden. Sowohl ökonomische Anreize als auch öffentliche Initiativen alleine greifen zu kurz und können die RC-Nachfrage kaum erhöhen. Erneut zeigt sich, dass ein Massnahmenkatalog am effektivsten ist. Würde demnach das schon effiziente Informationsszenario mit leichten Preisvorteilen kombiniert werden, würden nochmals fast 20% mehr an RC nachgefragt werden.



**Abb. 24:** Nachfrage nach RC (RC fraction applied) in verschiedenen Szenarien im Vergleich zum Durchschnitt des Referenzszenarios (rot gestrichelte Linie).

Die RC-Fraktion an sich zeigt zwar bereits die Effektivität verschiedener Szenarien, sagt aber noch wenig über eine Optimierung von Angebot und Nachfrage aus. Deshalb betrachten wir im Folgenden die Massenflüsse an nachgefragten Recyclingaggregaten im Vergleich mit dem potentiellen Angebot in verschiedenen Szenarien (**Abb. 25**). Dabei werden die beiden Aggregatsubstitutionsraten von 25% und 40% betrachtet. Bei 25% Recyclingaggregat würde Betonabbruchgranulat im Informationsszenario beinahe und in den kombinierten Szenarien komplett ausgeschöpft werden. Mischabbruchgranulat würde trotz der relativ hohen RC-Fraktion aufgrund der Priorisierung von RC-C durch die

Bauakteure kaum nachgefragt werden. Dies würde sich bei einer Substitutionsrate von 40% ändern, da nun Betonabbruchgranulat früher ausgeschöpft würde und vermehrt Mischabbruchgranulat nachgefragt würde. In den kombinierten Szenarien wird etwa ähnlich viel Misch- und Betonabbruchgranulat nachgefragt.



**Abb. 25:** Ausschöpfung des potentiellen Angebots an Recyclingaggregaten (concrete rubble supply) unter verschiedenen Szenarien. Das Angebot an Mischabbruchaggregaten liegt bei ca. 3.000.000 t, also deutlich ausserhalb der dargestellten Skala. Die Y-Achse zeigt die Menge in Tonnen an nachgefragten Recyclingaggregaten von RC-C (concrete rubble demand) und RC-M (mixed rubble demand). Die linke Graphik zeigt die Situation mit einer Substitution von 25% der natürlichen Aggregate, während in der rechten Graphik 40% substituiert wurden.

## 5.4 Diskussion und Zusammenfassung

*Konzeptionelle und operationale Validierung:* Eine realistische Repräsentation der Nachfrage lässt sich mittels diskreten Entscheidungen aufgrund der Umfragedaten und durch eine Einschränkung der Optionen bei Architekten und Ingenieuren erreichen. Das Einbeziehen der präzisen Materialflüsse sowie der Bauinvestitionen als Modelltreiber erhöhte primär die konzeptionelle Validität des Modells.

*Schlüsselfaktoren der Nachfrage:* Weniger die Entscheidungskriterien oder deren Gewichtung, sondern vielmehr die Bekanntheit von Recyclingbeton und dessen Nachhaltigkeit ist für die Nachfrage zentral. Insbesondere eine Assoziation von nachhaltigem Bauen mit Rückbaustoffen bei Architekten und Ingenieuren ist entscheidend. Die Nachfrage ist in einem Bereich von etwa +/- 20% stark preiselastisch (ca. 0,6) in Bezug auf RC und CC. Bei grösseren Preisdifferenzen scheint die Nachfrage preisunelastisch zu sein.

*Optimierung von Angebot und Nachfrage:* Mit einer Kombination von Informationen und leichten Preisvorteilen für RC-Beton lässt sich die Nachfrage soweit (67%) anheben, dass 100% des Betonabbruchs und rund 50% des Mischabbruchs wiederverwendet werden.

## 6 Umweltbeurteilung

Die folgenden Ausführungen basieren auf einer Publikation im International Journal of Life Cycle Assessment [110] (Anhang I.4).

### 6.1 Einleitung und Forschungsfragen

Die Hauptfrage, die in diesem Kapitel behandelt werden soll, ist folgende:

Ist es aus ökologischer Sicht sinnvoll, mineralische Baustoffe zu recyceln?

Recycling wird oft a priori als ökologisch vorteilhaft betrachtet. Das muss aber nicht immer richtig sein, und trifft, gemäss einiger Studien [2, 38] für RC-Beton auch nicht immer zu. Aus ökologischer Sicht macht recyceln immer dann Sinn, wenn die Umweltbelastung inklusive aller zum Recyceln benötigter Prozesse (Sammeln und Aufbereiten der Wertstoffe sowie Herstellung, Anwendung und Entsorgung des Rezyklats) zusammen weniger Umweltbelastung verursachen als das Entsorgen der Wertstoffe und das Herstellen, Anwenden und Entsorgen eines neuen Materials oder Produktes, das dieselbe Funktion erfüllt wie das Rezyklat. Ob das Recycling eines Produktes folglich wirklich ökologisch sinnvoll ist (z.B. die Mauer eines Hauses oder eines Strassenkoffers), hängt zum einen vom Produkt selbst und zum anderen vom gewählten Recyclingprozess sowie der Funktion des Rezyklats ab.

Da es sehr viele unterschiedliche Anwendungen von mineralischen Materialien im Baubereich gibt, die theoretisch alle eine Wiederverwertung in einer oder mehreren von vielen Formen erlauben würden, könnte man bezüglich der Umweltbelastung, die sie verursachen, zig Systeme miteinander vergleichen. Das wäre aber weder machbar noch sinnvoll, da viele Fälle von geringer praktischer Relevanz sind. So ist zum Beispiel die Herstellung von Beton aus Mischabbruchgranulat für allerhöchste Anforderungen an statischen Eigenschaften keine Option, obwohl es technisch vielleicht möglich wäre. Ebenso ist die Wiederverwendung von losem Koffermaterial bei Strassensanierungen offensichtlich sinnvoller als der Abtransport dieses Materials zu einer Deponie und die Verwendung von neuem Material. Entsprechend muss zuerst eine Auswahl an Materialien und Recyclingpfaden getroffen werden, deren Untersuchung lohnenswerte Ergebnisse erzielt. Es stellen sich daher folgende drei Fragen:

1. Für welche Anwendungen mineralischer Baustoffe ist die Frage der ökologischen Sinnhaftigkeit eines Recyclings relevant und die Antwort darauf nicht offensichtlich?
2. Welche Prozesse werden benötigt, um die Materialien, die in den unter Punkt 1 ausgewählten Anwendungen benutzt werden, zu recyceln?
3. Zu welchen Produkten werden diese Materialien recycelt und wie würden die Produkte hergestellt werden, wenn keine mineralischen Baustoffe recycelt würden?

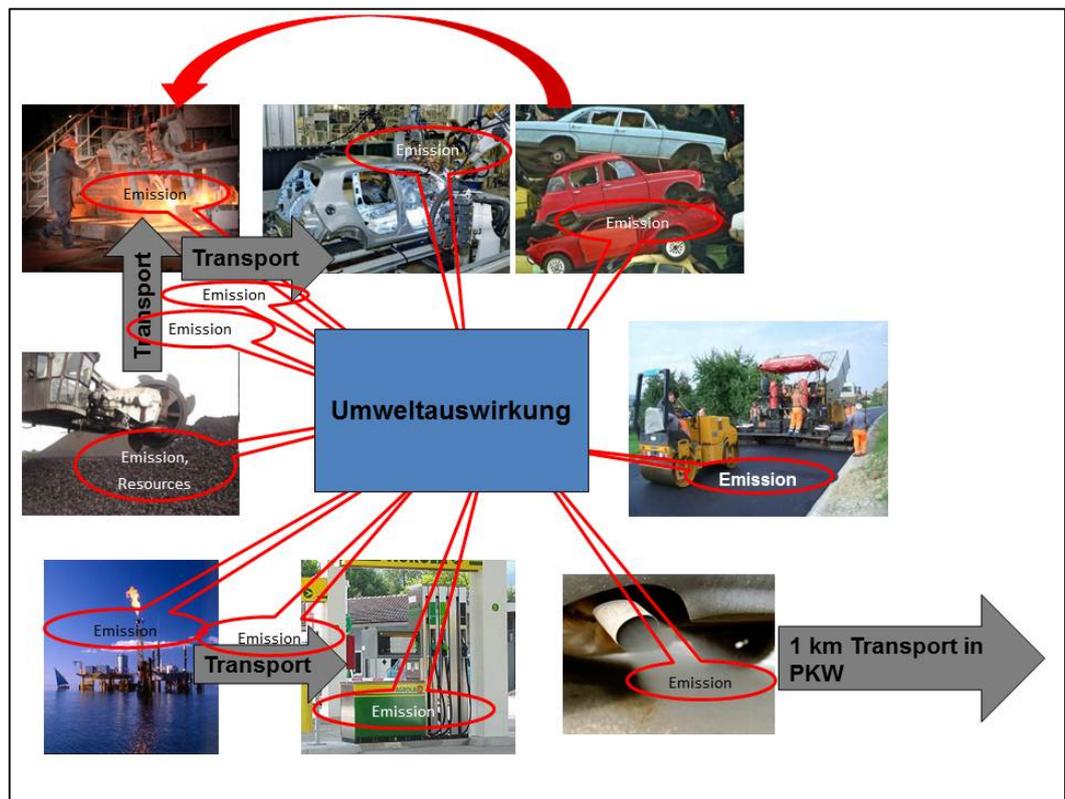
Zunächst sollte geklärt werden, was "ökologisch gut" konkret bedeuten soll, da praktisch jede menschliche Handlung irgendwelche Umweltbelastungen verursacht. Das Bauen einer Strasse beispielsweise verursacht einen Konsum an natürlichen Ressourcen (Land, Wasser und Kies für die Strasse sowie fossile Energieträger für den Betrieb der Maschinen), der eine Umweltbelastung darstellt. Der Bau verursacht ausserdem CO<sub>2</sub>-Emissionen, die zum Treibhauseffekt beitragen, Partikel- und VOC-Emissionen, die die menschliche Gesundheit belasten, oder Stickoxyd-Emissionen, die zum Sommersmog beitragen. Die Antwort auf die Frage nach der ökologischen Sinnhaftigkeit einer Option kann für die verschiedenen Umweltwirkungen folglich unterschiedlich ausfallen. So ist es wichtig, klar zu definieren, welche Indikatoren zum Vergleich von Umweltwirkungen herangezogen werden sollen und warum. Unter Umständen ist für eine Gesamtwertung eine Gewichtung verschiedener Umweltwirkungen nötig, um zu klaren Auswertungen zu gelangen. Es darf dabei jedoch nicht ausser Acht gelassen werden, dass man mit solchen Aussagen den Bereich der wissenschaftlich, objektiven Beurteilung verlässt und subjektive Wertvorstellungen einbringt. Somit stellt sich eine vierte Grundfrage:

4. Welche Umweltwirkungen sollen mit welchen Indikatoren gemessen und beurteilt werden (und warum)?

Erst wenn diese vier Grundfragen geklärt sind, können wir uns der eingangs formulierten Hauptfrage mittels der Methode der Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz oder Englisch

„Life Cycle Assessment“ (LCA) genannt, widmen. LCA ist eine ISO standardisierte Methode [111, 112] zur Bestimmung von Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen, bezogen auf deren quantifizierten Nutzen für die Verwendung aus einer ganzheitlichen Perspektive. LCA bezieht sich also immer auf einen quantifizierbaren Nutzen eines Produktes oder einer Dienstleistung und betrachtet immer sämtliche Prozesse, die zur Bereitstellung dieses Produktes oder dieser Dienstleistung nötig waren.

Abb. 26 zeigt dies am Beispiel eines Personentransports. Der quantifizierte Nutzen wäre zum Beispiel ein Kilometer Transport von 2 Personen in einem PKW der Golfklasse. Das verursacht direkt den Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen für den Betrieb und die entsprechenden Abgase. Aber auch die Bereitstellung des benötigten Benzins, des Fahrzeuges und der Strasseninfrastruktur verursachen ebenfalls Emissionen und Ressourcenverbräuche, die letztendlich dem Transport zuzuschreiben sind.



**Abb. 26:** Ganzheitliche Perspektive der LCA am Beispiel eines Personentransports

Ökobilanzen werden gemäss ISO in 4 Phasen erarbeitet:

- i. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens;
- ii. Sachbilanz;
- iii. Wirkungsabschätzung und
- iv. Auswertung.

In der *ersten Phase*, der Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens, werden unter anderem die vier eingangs des Kapitels gestellten Fragen angegangen. Weiter wird in der Phase genau definiert, welche Systeme mit welchen Funktionen und Eigenschaften untersucht werden und womit sie verglichen werden sollen. Dabei wird bestimmt welche Prozesse berücksichtigt bzw. ausgeschlossen werden, wie mit Prozessen umgegangen wird, die mehr als eine Funktion erbringen, welche Anforderungen an Daten gestellt werden und welche Einschränkungen für die Studie gelten.

Auf dieser Basis werden in der *zweiten Phase* Sachbilanzen für alle zu berücksichtigenden Prozesse erstellt, in denen die physikalischen In- und Outputs, die der Prozess benötigt, zusammengestellt und quantifiziert werden. Die so erstellten Inventare für alle relevanten Prozessmodule<sup>1</sup> bilden ein zusammenhängendes System, in dem Prozessmodul

<sup>1</sup> Definition in ISO 14'040 (2006): „kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den Input- und

A je eine bestimmte Menge von den Prozessmodulen B und C nachfragt und B wiederum eine bestimmte Menge von C, D und E etc. nachfragen. Dieses System kann rechnerisch aufgelöst werden, sodass als sogenanntes „Sachbilanzergebnis“ eine Liste von In- und Output-Flüssen bleibt, die die Systemgrenzen überschreiten. Das sind einerseits Elementarflüsse<sup>1</sup> (also Ressourcenentnahmen aus der Natur und Emissionen in die Natur) und andererseits die Funktion(en), die das System erbringt (Bsp. Personentransport von 1km Länge in einem Golfklasse-PKW).

Aufgrund dieses Sachbilanzergebnisses werden in der *dritten Phase* die Wirkungsendpunkte<sup>2</sup> berechnet, die Auskunft über die Wirkung bezüglich eines bestimmten Umweltproblems (z.B. Beitrag zum Treibhauseffekt) geben, wobei Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit explizit eingeschlossen sind. In der *vierten Phase* werden schliesslich die Ergebnisse der Wirkungsbilanz ausgewertet und interpretiert.

## 6.2 Methodik: Ökobilanzierung (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens)

In der Schweiz werden im Tiefbau ca. 95% der mineralischen Bauabfälle recycelt [12, 113]. Die in diesen Fällen notwendigen Recyclingprozesse sind verhältnismässig einfach und erfordern wenig Aufwand, sodass im Vornherein klar ist, dass nur schon ein Abtransport des Materials auf eine Deponie und ein Transport von neuem Material zur Baustelle höhere Umweltbelastung verursachen würde als die Wiederverwertung. Daher sind die ökologischen Vorteile von Recyclingbaustoffen im Tiefbau auch wenig umstritten [32-34]. Die Ausnahme ist die Problematik von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) für Recycling von teerhaltigen Belägen [35, 36]. Die VSS Richtlinie SN 670 141 untersagt daher die Wiederverwertung von stark teerhaltigen Belägen [26].

Mineralische Bauabfälle aus dem Hochbau hingegen werden mehrheitlich in anspruchswenigen Anwendungen wiederverwendet oder deponiert [12, 40, 50], obwohl technisch eine Verwendung als Aggregat für hochwertige Betone durchaus möglich wäre, was auch in diversen Forschungs- und Demonstrationsprojekten gezeigt wurde [22, 46, 114-116]. Ausserdem sind die normativen Voraussetzungen für solche Anwendungen gegeben [15, 24, 30]. Recyclingbeton (RC) für hochwertige Anwendungen wie Innen- oder Aussenwände im Hochbau kann aber etwas mehr Zement benötigen als ein entsprechender Beton aus neuem Aggregat. Das hat vor allem mit der im Vergleich zu Rundkies grösseren Oberfläche der Recyclingaggregate zu tun [22, 117-119]. Da aber die Umweltauswirkung der Herstellung von Beton von den Umweltauswirkungen der Zementproduktion dominiert wird, kann ein Mehrbedarf an Zement dazu führen, dass geringere Umweltbelastung aus der Produktion von Recyclingaggregat im Vergleich zu Rundkies überkompensiert werden und der Recyclingbeton schlechter abschneidet als der konventionelle Beton [11].

In den bestehenden Studien wurde von unterschiedlichen Anteilen an recycelten Aggregaten (25-100%) ausgegangen, was wiederum den Mehrzementbedarf beeinflusst hatte. Studien haben des Weiteren gezeigt, dass Transportdistanzen [39] und die Entsorgung von Bauabfällen [120] einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Es reicht also nicht, nur die Produktion von Beton aus neuem beziehungsweise recyceltem Aggregat zu betrachten, da Recycling nicht nur mineralisches Material sondern auch Eisenschrott (von der Armierung) bereitstellt und zudem auch einen Entsorgungsprozess überflüssig macht. Diese Aspekte wurden in den bisherigen LCA Studien [11, 38, 39] nicht berücksichtigt, was in diesen oft zu einem zu schlechten Abschneiden der Recyclingoption führte.

Somit ist nach wie vor unklar, ob bzw. unter welchen Bedingungen das Recyceln von mineralischen Bauabfällen zu Betonanwendungen aus einer ganzheitlichen Perspektive ökologisch sinnvoll ist. Dahingegen ist eine Wiederverwertung von mineralischen Abfällen aus dem Hochbau in anspruchsweniger Anwendung offensichtlich und unbestrittenermassen ökologisch sinnvoller als die Entsorgung alter und die Verwendung neuer Materialien.

---

Output-Daten quantifiziert werden“

<sup>1</sup> Definition in ISO 14'040 (2006): „Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde, oder Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird.“

<sup>2</sup> Definition in ISO 14'040 (2006): „Eigenschaft oder Aspekt der natürlichen Umwelt, der menschlichen Gesundheit oder der Ressourcen, die oder der ein Umweltthema identifiziert, das Grund zur Besorgnis darstellt.“

Da aber die Mengen an mineralischen Bauabfällen für eine Verwendung in anspruchslosen Anwendungen viel zu gross sind, bekommt der ökologische Vergleich zwischen RC und konventionellem Beton eine praktische Relevanz.

### **Betrachtete Anwendungen und Szenarien**

Entsprechend betrachten wir die Produktion von jeweils einem Kubikmeter Beton für folgende Anwendungen:

- Innenbauteil (IC) der Festigkeitsklasse C25/30 nach NPK A/B
- Aussenbauteil (OC) der Festigkeitsklasse C30/35 nach NPK C
- Magerbeton (LC)

Für alle Anwendungen vergleichen wir konventionellen Beton (CC) mit Recyclingbeton (RC), der jeweils unterschiedliche Zementmengen enthält. Für die Anwendungen in Innen- und Aussenbauteilen betrachten wir zudem verschiedene Mengen von RC-Aggregaten aus Betonabbruch (C) und aus Mischabbruch (M). Als Referenzszenario (ref) wird jeweils ein RC-Aggregatanteil von 40% verwendet, was der Menge entspricht, die für einen Bonus im Minergie-Eco-Standard erreicht werden muss. Im „Minimal-Szenario (min)“ beträgt der RC-Anteil 25% unter welchem ein Beton nicht mehr als RC-Beton bezeichnet wird. Die Szenarien mit ihren wichtigsten Eckpunkten und den im Weiteren verwendeten Bezeichnungen sind in Tab. 8 zusammengestellt. Jedes dieser 30 Szenarien wird jeweils mit zwei verschiedenen Zementtypen (Portlandzement CEM I 42.5 und Portlandkalkzement CEM II) berechnet.

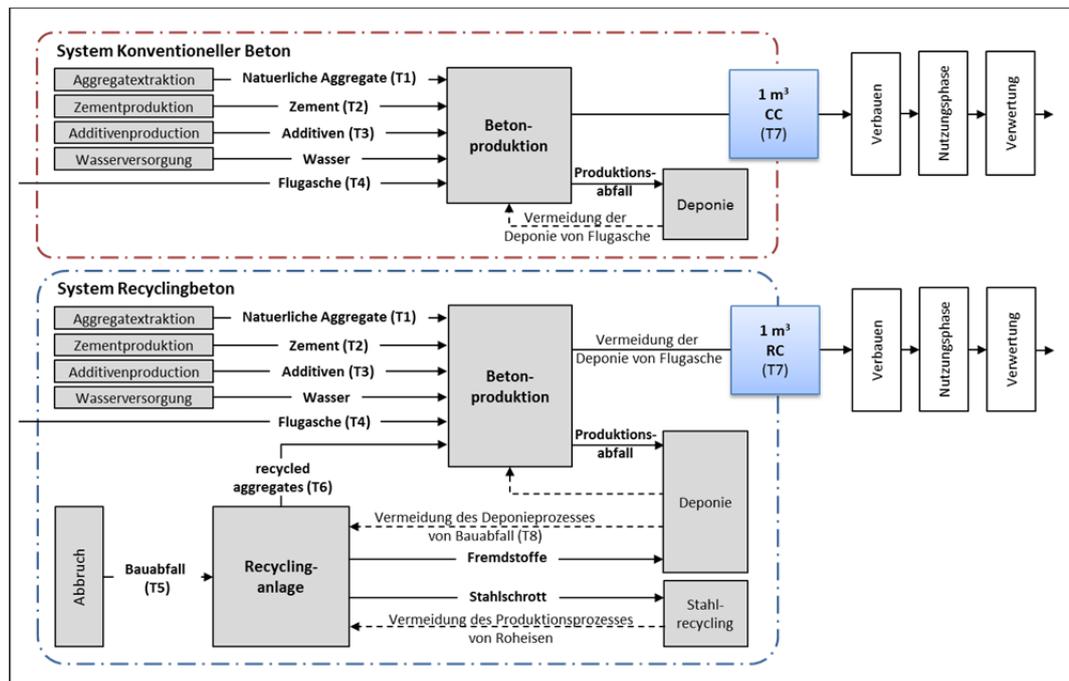
### **Untersuchungsrahmen (Systemdefinition)**

Abb. 27 zeigt wie die Systeme für konventionellen Beton und Recyclingbeton modelliert sind. Die Produktion von CC ist relativ einfach: Beton wird aus Aggregat, Zement, Additiven, Wasser und Flugasche hergestellt. Ausser Beton wird nur etwas Produktionsabfall erzeugt, der deponiert wird. Da Flugasche ein Nebenprodukt ist, das deponiert werden müsste, wenn es nicht in der Betonproduktion verwendet werden könnte, wird die Vermeidung dieses Deponieprozesses der Betonproduktion gutgeschrieben. Das heisst die Umweltbelastung, die durch das Deponieren der Flugasche verursacht würde von der Umweltbelastung der Betonproduktion subtrahiert wird. Dasselbe wird auch bei Recyclingbeton gemacht. In diesem Fall ist aber die Deponierung von Flugasche nicht der einzige Prozess, der durch die Betonproduktion vermieden wird. Ebenfalls vermieden wird die Deponierung der mineralischen Bauabfälle, die recycelt wurden. Entsprechend wird auch dafür eine Gutschrift erteilt.

Eine weitere Gutschrift erhält die RC-Produktion davon, dass im Recyclingprozess das Armierungseisen, welches im Abbruchmaterial vorhanden ist, abgetrennt und einem Stahlrecycling zugeführt wird. Pro kg Stahlschrott, der so ins Stahlrecycling gelangt, wurde eine Gutschrift von einem kg Roheisen erteilt, das anstelle des Schrotts zur Stahlproduktion verwendet werden müsste, wenn kein Schrott vorhanden wäre. Damit wird davon ausgegangen, dass Armierungsstahl nur recycelt wird, wenn auch die mineralische Fraktion von Betonabbruch recycelt wird. Diese Annahme kann damit begründet werden, dass man einen Brechvorgang bräuchte, um den Stahlschrott aus dem Abbruchmaterial zu lösen, der gleichzeitig Betonabbruchaggregat produziert, das dann auch verwendet werden kann. Da diese Annahme aber nicht schlüssig zu beweisen ist, wurden in einer Sensitivitätsanalyse berechnet, wie wichtig der gewonnene Stahlanteil für die Ergebnisse ist. Weiter wurde untersucht ob es ökologisch vielleicht sogar vorteilhafter wäre nur den Stahl zu recyceln und die mineralischen Abbruchmaterialien zu deponieren statt letztere auch zu recyceln.

**Tab. 8:** Zusammenstellung der betrachteten Szenarien mit Anwendung, Betontyp, RC-Aggregat- und Zementanteil. Jedes Szenario wird mit zwei verschiedenen Zementtypen betrachtet: Portland Zement (CEM I 42.5) und Portlandkalkzement (CEM II). Die Anteile an Beton- bzw. Mischabbruchaggregate, die tatsächlich zugegeben werden müssen, um einen bestimmten Anteil dieser Aggregate im Beton zu erreichen, liegen etwas höher. Dies, da in der Auszählung der Körner von Recyclingaggregat 10-20% natürlicher Kies gefunden wurde.

Anwendung	Betontyp	Aggregate						Zement (CEM) [kg / m <sup>3</sup> Beton]	Bezeichnung	
		Aggregatanteil Szenario		[kg / m <sup>3</sup> Beton]	Rundkies [M.-%]	Betonabbruch [M.-%]	Mischabbruch [M.-%]			
		Herkunft RC-Aggregat	(% RC-Aggregat)							
Aussenbauteil (OC)	Konventioneller Beton (CC)			1890	100			300	OC CC	
	Recyclingbeton (RC)	Betonabbruch (C)	min (25%)	1784	72	28		300	AB RC-Cmin CEM300	
			ref (40%)	1624	55	45		310	AB RC-Cmin CEM310	
								320	AB RC-Cmin CEM320	
		Mischabbruch (M)	min (25%)	1526	70		30	300	OC RC-Mmin CEM300	
			ref (40%)	1374	50		50	320	OC RC-Mmin CEM320	
								340	OC RC-Mmin CEM340	
	Innenbauteil (IC)	Konventioneller Beton (CC)			1890	100			280	IC CC
		Recyclingbeton (RC)	Betonabbruch (C)	min (25%)	1784	72	28		280	IC RC-Cmin CEM280
				ref (40%)	1624	55	45		290	IC RC-Cmin CEM290
									300	IC RC-Cmin CEM300
			Mischabbruch (M)	min (25%)	1526	70		30	280	IC RC-Cref CEM280
ref (40%)				1374	50		50	290	IC RC-Cref CEM290	
								300	IC RC-Cref CEM300	
Magerbeton (LC)		Konventioneller Beton (CC)			1890	100			150	LC CC CEM150
									200	LC CC CEM200
		Recyclingbeton (RC)	Mischabbruch (M)	(100%)	1221			100	150	LC RC CEM150
									200	LC RC CEM200



**Abb. 27:** Betrachtete Systeme für Konventionellen Beton und für Recyclingbeton. Systeme wurden erweitert und Co-Produkte substituiert, um Allokation zu vermeiden und trotzdem dieselbe Funktionalität der zu vergleichenden Systeme zu erreichen. Das System wird nur bis zum fertig gemischten Beton auf der Baustelle betrachtet, da die nachfolgenden Lebensphasen des Betons (Verbauen, Nutzungsphase, Abbruch und Verwertung oder Entsorgung) für RB und für KB identisch sind.

Die Sachbilanzen werden auf Basis von Herstellerangaben und Hintergrunddaten aus ecoinvent v2.2. erstellt. Details dazu sind in der Journalpublikation [110], sowie in der dazugehörigen „supporting information“ zu finden. In den Bilanzen wird berücksichtigt, dass RC etwas mehr Additive und Wasser benötigt als CC. Der Zementanteil von RC ist mindestens genauso gross wie der des entsprechenden CCs und wird in Szenarien erhöht. Die Aggregatmasse ist für RC jedoch etwas tiefer, da die Dichte des Recyclinggranulats geringer ist als die von Rundkies. Der Anteil an Flugasche wird für RC und CC gleichgesetzt.

Da die Menge an Armierungsstahl, die im Recyclingprozess von mineralischen Bauabfällen anfällt, einen Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse hat, müssen entsprechende Annahmen für Beton- und Mischabbruch getroffen werden. Basierend auf [12] wird davon ausgegangen, dass Betonabfälle zu 70% aus armierten und zu 30% aus nicht armierten Anwendungen stammen und dass die durchschnittliche Armierung 3% (Gewicht) Stahl im Beton enthält. Bei Mischabbruch wird - basierend auf Herstellerangaben [121], gesetzlichen Vorgaben [15] und petrographischen Untersuchungen [122] - davon ausgegangen, dass dieser zu 70% aus Betonabfällen und zu 30% aus Ziegelabfällen besteht, während Betonabbruch zu 95% aus Betonabfall und zu weniger als 5% aus Ziegelabfällen besteht. Somit kann bei der Herstellung von RC-C insgesamt 2% und bei der Herstellung von RC-M immerhin noch 1,5% der Aggregatmasse als Stahlschrott zurückgewonnen werden.

Da frühere Arbeiten die Relevanz von Transportdistanzen gezeigt haben, wurden diese für den Transport von Aggregaten, Zement, Additiven und Flugaschen auf Basis eines Telefoninterviews mit Herrn Gschösser von der ETH abgeschätzt [123]. Die resultierenden Distanzen passen gut zu den Werten, die für die Zementproduktion in der ecoinvent Datenbank ermittelt wurden. Sie wurden, ausser für Recyclingaggregate, für alle Materialien konstant gehalten. Für Recyclingaggregate wurden die Distanzen in einer Sensitivitätsbetrachtung variiert.

Die Bewertung der Umweltrelevanz erfolgt aufgrund zwei Indikatoren, die für die betrachteten Systeme besonders wichtig sind, nämlich Treibhauseffekt und Verbrauch von abiotischen Ressourcen, sowie aufgrund von zwei Indikatoren, die versuchen sämtliche relevanten Umweltwirkungen in einer Zahl auszudrücken. Für diesem Bericht wurde die

„Ecoindicator 99“ Methode<sup>1</sup> sowie die Schweizer Methode der Ökologischen Knappheit (Version 2006), die auch „UBP-Methode“ genannt wird, weil die Resultate in „Umweltbelastungspunkten“ (UBP) angegeben werden. Diese Methoden bewerten unterschiedlichste potentielle Umweltprobleme relativ zueinander und addieren diese gewichtet.

### 6.3 Resultate: Gesamtumweltauswirkungen, Beiträge, Zement und Transportsensitivität

Wie in Abb. 28 zu sehen ist, schneiden in den Bewertungen mit der Methode der ökologischen Knappheit, mit der Ecoindicator 99 Methode sowie bezüglich des Ressourcenabbaupotenzials alle RC-Varianten besser ab als die entsprechenden konventionellen Betone. Die Reduktionen liegen dabei zwischen 15% und 50%. Die Reduktionen haben in den beiden Methoden ähnliche Gründe: Bei der Ecoindicator-Methode stammen die Unterschiede vor allem von einer insgesamt stark reduzierten Schädigung des respiratorischen Systems durch anorganische Emissionen (v.a. Partikel, NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>) in die Luft. Diese Unterschiede stammen von einem insgesamt leicht tieferen Bedarf an fossilen Ressourcen. Bei der UBP-Methode liegt der Unterschied vor allem darin, dass durch das Recyclen natürliche Ressourcen geschont werden sowie dass Luftemissionen<sup>2</sup> reduziert werden. Der Beitrag zum Treibhauseffekt zeigt ein weniger eindeutiges Bild. Hier können jeweils die RC-Varianten mit Mischabbruch, die viel mehr Zement benötigen als die entsprechenden konventionellen Betone, schlechter abschneiden, während die RC-Varianten mit gleich viel Zement wie CC besser abschneiden. Die RC-Varianten mit Betonabbruch liegen im schlechtesten Fall etwa gleich hoch wie die entsprechende CC-Variante.

Für die Ergebnisse mit allen Methoden gilt, dass die Varianten mit höherem Rezyklatanteil besser abschneiden als die entsprechende Variante mit tieferem Rezyklatanteil. Ebenso gilt, dass RC-Beton mit Mischabbruch zu etwas höherer Umweltbelastung führt als ein entsprechender RC-Beton mit Betonabbruch.

**Abb. 28:** (nächste Seite) LCA-Resultate (Ecoindicator 99-Punkte, Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit, Ressourcenabbaupotenzial (ADP) und Treibhausgasemissionen (GWP)) für strukturelle Anwendungen. Die obere Hälfte jedes der 4 Bilder zeigt die Ergebnisse der Varianten mit Portlandkalkzement, die untere Hälfte mit Portlandzement 42.5. Die Bezeichnungen der Varianten sind in Tab. 8 erklärt.

<sup>1</sup> Hierarchist perspektive mit durchschnittlicher Bewertung

<sup>2</sup> Detailliertere Information zu den Beiträgen verschiedener Effekte zu den Ecoindicator- und UBPErgebnissen sind in Knoeri et.al (2012) oder im Anhang I.3 zu finden)

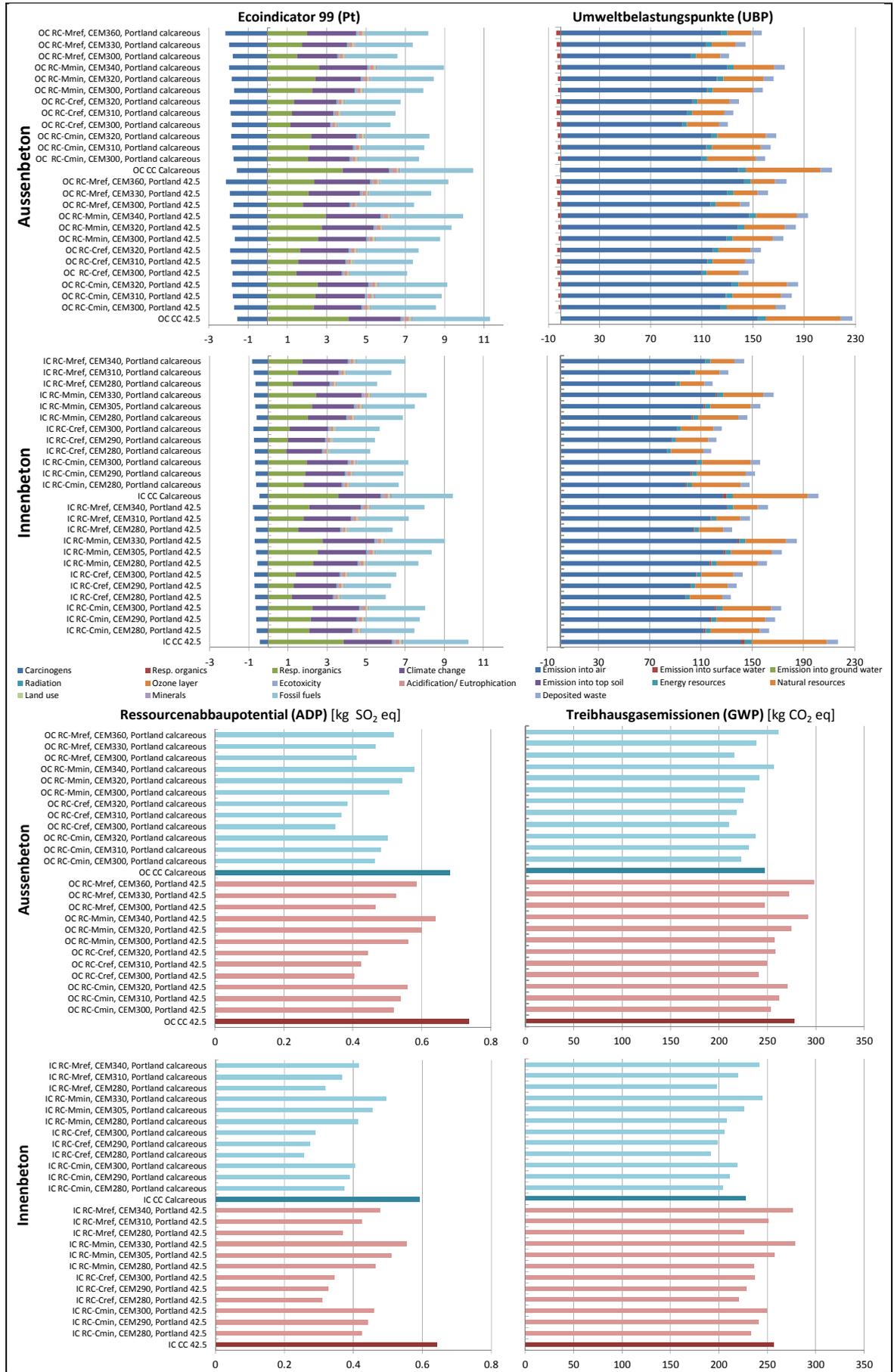
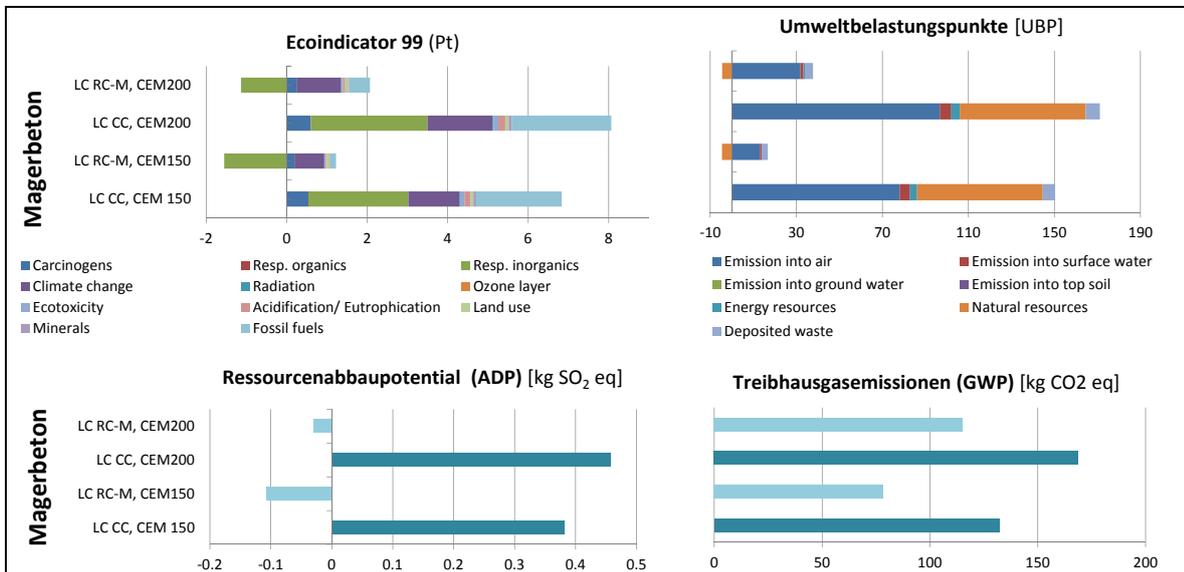
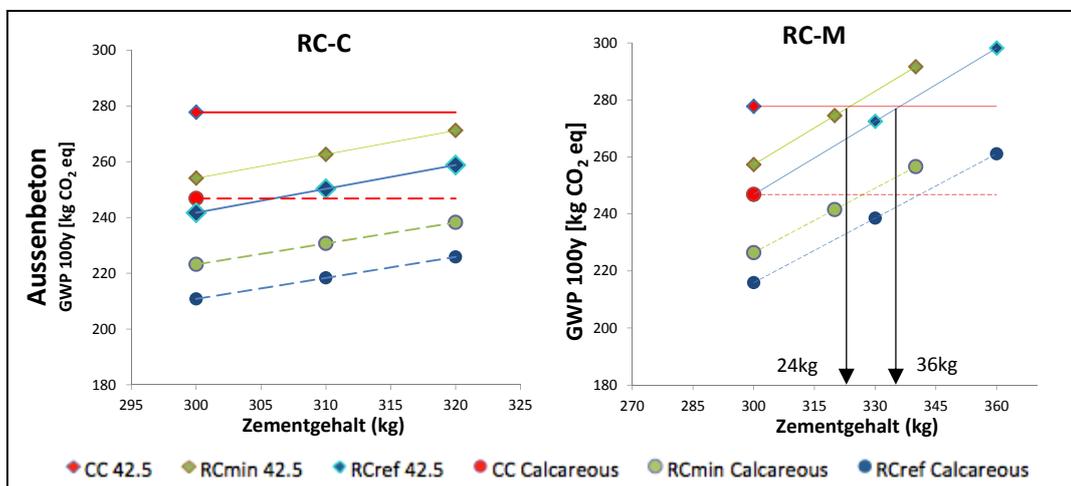


Abb. 29 zeigt, dass die Ergebnisse für Magerbeton ganz deutlich zugunsten der Recyclingvarianten ausfallen. Hier werden einige Gesamtergebnisse der Umweltauswirkungen gar negativ, d.h. die Produktion von RC-Magerbeton mit 150 kg Zement pro m<sup>3</sup> führt gemäss Ecoindicator 99 zu einer Verbesserung der Umwelt. Grund dafür ist die Produktion, welche andere Prozesse (Entsorgung des Bauabfalls und Produktion von Roheisen) überflüssig macht und so deren Umweltbelastung eingespart werden kann.



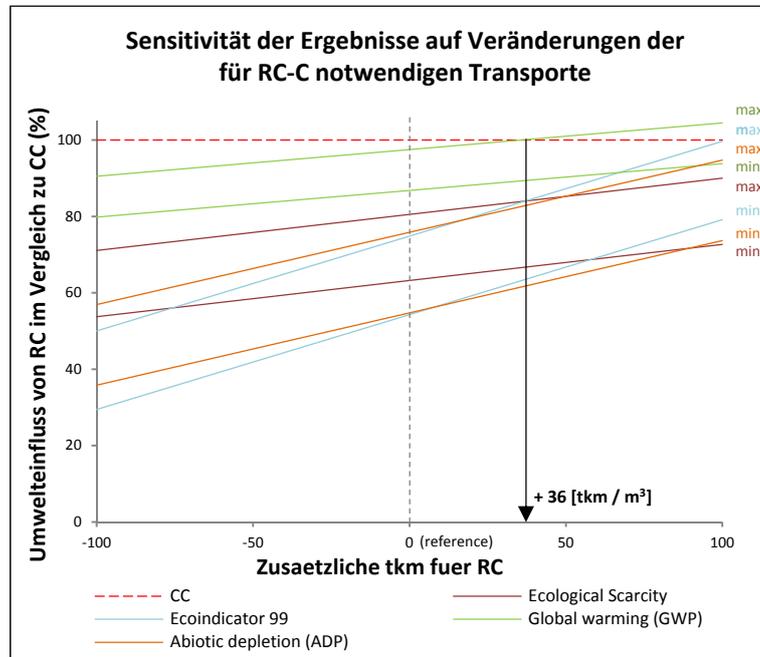
**Abb. 29:** LCA-Resultate (Ecoindicator 99-Punkte, Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit, Ressourcenabbaupotenzial (ADP) und Treibhausgasemissionen (GWP)) für Magerbeton. Die Bezeichnungen der Varianten sind in Tab. 8 erklärt.



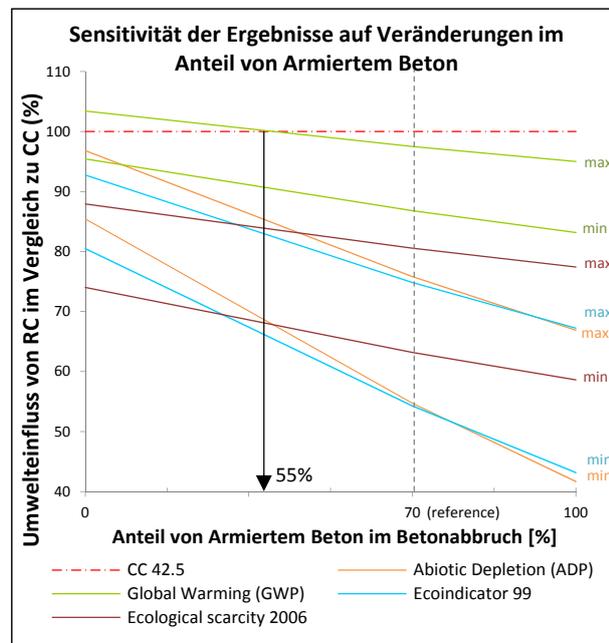
**Abb. 30:** Sensitivität der Ergebnisse (Treibhauseffekt) auf Veränderungen des Zementtyps und Zementgehalts.

Da die Zementmenge den grössten Einfluss auf den Treibhauseffekt hat, wurde für diese Umweltwirkung eine Sensitivätsbetrachtung bezüglich Zementtyp und Menge gemacht. Abb. 30 zeigt, dass Beton mit Portlandkalkzement jeweils einen tieferen Beitrag leistet als Beton mit PC 42.5. Wir sehen auch, dass die RC-Varianten mit Betonabbruchaggregat bei allen betrachteten Rezyklatanteilen und Zementmengen besser abschneiden als die CC-Variante mit demselben Zementtyp. Durch Extrapolation kann man berechnen, dass ab 28 kg (im Falle von 25% Rezyklatanteil) bzw. 42 kg im Fall von 40% Rezyklatanteil Mehrzement die RC-Variante schlechter würde als die CC-Variante. RC-Varianten mit Mischabbruch können bezüglich Treibhauseffekt schon bei einer Zusatzzementmasse von 24 kg oder 36 kg schlechter abschneiden als die entsprechende CC-Variante.

Des Weiteren haben wir den Einfluss von Transportdistanzen auf die Ergebnisse analysiert (siehe Abb. 31) und festgestellt, dass RC-C-Beton so lange ökologisch besser ist, wenn er nicht mehr als etwa 15 km (36 tkm/m<sup>3</sup>) weiter transportiert wird als konventioneller Beton. Achtet man nicht nur auf den Treibhauseffekt, sondern auch auf einen ganzheitlichen Umweltindikator (ecoindicator 99), so dürfte der RC-C sogar etwa 40 km weiter transportiert werden bis er einen mit CC vergleichbaren Schaden anrichten würde.



**Abb. 31:** Sensitivität der Ergebnisse auf Veränderungen der für RC-C notwendigen Transporte. Solange RC-C weniger als ca. 15 km (36 tkm/m<sup>3</sup>) weiter transportiert wird als CC schneidet er bezüglich allen Umweltwirkungen besser ab.



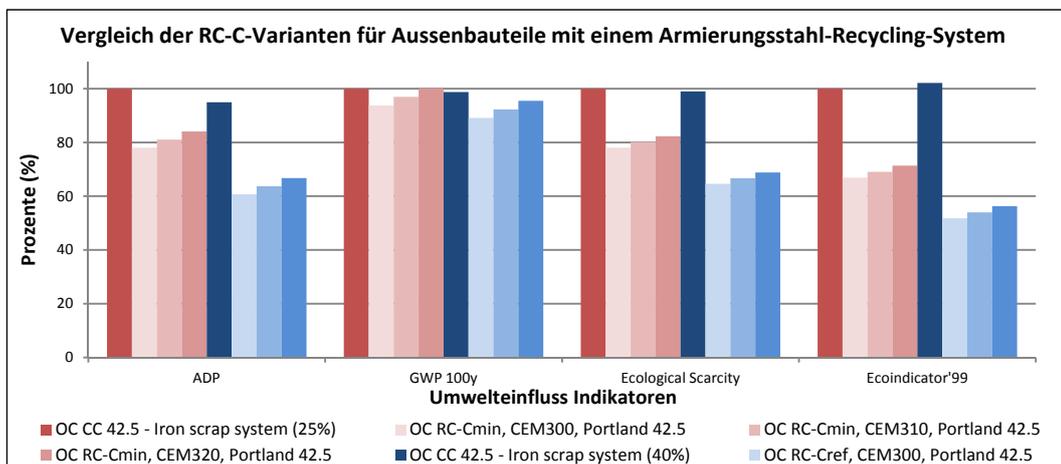
**Abb. 32:** Sensitivität der Ergebnisse auf Veränderungen im Anteil von armiertem Beton zur Herstellung von Betonabbruchgranulat. Solange RC-C aus Granulat hergestellt wird, das zu mindestens 55% aus armiertem Beton stammt, ist die Umweltbelastung der Produktion von RC-C geringer als die der CC-Produktion.

Da neben Zementgehalt und Transportdistanzen auch die Zurückgewinnung von Stahl aus den Bauabfällen einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse hat, wurde auch diesbezüglich eine Sensitivitätsbetrachtung angestellt. Es wurden zwei Fragen gestellt: a) Wie verändern sich die Ergebnisse, wenn der Stahlanteil in den Bauabfällen kleiner ist als angenommen? b) Wäre es ökologisch sinnvoller, den Armierungsstahl aus Bauabfällen zu extrahieren und einem Recycling zuzuführen, jedoch die mineralische Fraktion danach nicht zu recyceln sondern zu deponieren?

Abb. 32 beantwortet die erste Frage. Solange der Anteil an armierten Betonabfällen für die Bereitstellung des Betonabbruchgranulats über 55% liegt (gemäss Herstellerangaben liegt der Wert bei 70%), ist die Umweltbelastung für alle Indikatoren von RC-C geringer als die von CC. Mit Ausnahme von den CO<sub>2</sub> Emissionen (GWP) liegen alle Indikatoren, selbst wenn ausschliesslich nicht armierter Beton recycelt wird, für RC-C tiefer als für CC.

Um die zweite Frage zu beantworten modellieren wurde ein System, das ähnlich dem System für RC in Abb. 27 die Aufwendungen für das Abtrennen des Armierungsstahls vom Beton und die Substitution von Roheisen berücksichtigt. Im Gegensatz zum RC-Modell wird aber keine Gutschrift für das Vermeiden der Entsorgung von mineralischen Abfällen erteilt. Die Produktion von neuem Kies wird bilanziert.

Abb. 33 zeigt, dass für alle Varianten das System, das auch die mineralischen Abfälle recycelt, ökologische Vorteile zeigt.



**Abb. 33:** Vergleich der RC-C-Varianten für Aussenbauteile mit einem System, in dem bei der Entsorgung der Bauabfälle der Armierungsstahl recycelt wird, nicht aber die mineralische Fraktion.

## 6.4 Diskussion und Zusammenfassung

Die erläuterten Ergebnisse bestätigen, was auch schon in anderen Studien [11, 38, 39] gezeigt wurde: Zement und Transporte sind die Hauptverursacher von Umweltbelastungen der Betonherstellung. Die Resultate bestätigen ebenfalls die klaren ökologischen Vorteilen von RC-Beton aus Mischabbruchgranulaten für Magerbetonanwendungen im Vergleich zu konventionellem Beton.

Im Gegensatz zu den älteren Studien liess sich aber wesentliche ökologische Vorteile für RC in strukturellen Betonanwendungen zeigen. Dieser Widerspruch könnte mit unterschiedlichen Transportarten und Distanzen in den verschiedenen Ländern zu tun haben. Am bedeutendsten jedoch ist, dass die bisherigen Studien den Umweltnutzen durch die Vermeidung von Entsorgungsprozessen und durch die Rückgewinnung von Armierungsstahl, der durch die Produktion von RC verursacht wird, vernachlässigen. Diese Studie hingegen hat dies berücksichtigt und gezeigt, dass die Hauptunterschiede zwischen RC und CC von diesen vermiedenen Prozessen stammen. Ausserdem wurde gezeigt, dass ein Recyceln des Armierungsstahls aus Bauabfällen, ohne dabei auch die mineralischen Teile zu verwerten, aus ökologischer Sicht schlechter wäre als die Variante mit Verwertung der Steine.

Zudem konnte festgestellt werden, dass der Mehrzementbedarf von RC bezüglich CC auf etwa 10% limitiert werden muss, damit RC bezüglich keinem Umweltaspekt schlechter abschneidet als ein entsprechender CC. Ebenso dürfen die Transportdistanzen für RC-Beton nicht wesentlich länger sein als für CC. In dicht besiedelten Agglomerationen stellt dies sicher kein Problem dar, da dort Transporte für RC eher kürzer sind als für CC. In Randregionen hingegen könnten die Distanzen einen Einsatz von RC aus ökologischer Sicht unattraktiv gestalten.

Der bezüglich des Abschneidens von RC im Vergleich zu CC kritischste Umwelteffekt ist der Beitrag zur globalen Erwärmung. Allerdings berücksichtigt die vorliegende Studie, wie auch keine den Autoren bekannte andere Studie, die neuesten Erkenntnisse zur Carbonatisierung von RC nicht. Nygaard und Leemann [124] haben berechnet, dass 12 bis 32% der totalen CO<sub>2</sub>-Emission der Zementherstellung beim Recyclingprozess vom Beton wieder absorbiert werden. Natürlich würde auch eine Absorption von CO<sub>2</sub> stattfinden, wenn Beton nicht recycelt sondern deponiert würde. Diese wäre aber aufgrund der größeren Struktur und der damit kleineren spezifischen Oberfläche der Betonabfälle deutlich geringer. Die Nicht-Berücksichtigung dieses Effektes führt somit dazu, dass die Ergebnisse von RC bezüglich des Treibhauseffektes aber auch bezüglich ecoindicator 99 und UBP (die beide einen Beitrag vom Treibhauseffekt zum Endresultat berücksichtigen) die Realität eher überschätzen als die entsprechenden Ergebnisse von CC. In der Realität müsste RC also ökologisch noch besser sein als es die präsentierten Ergebnisse dargelegt haben.

## 7 Synthese

Das Ziel dieses Projektes war die Optimierung von Angebot und Nachfrage von mineralischen Baustoffen. Dabei wurden Angebot und Nachfrage nach mineralischen Recyclingbaustoffen sowohl analysiert als auch modelliert sowie Szenarien und Strategien für ein ökologisches Baustoffmanagement erarbeitet und bewertet.

Es wurden vier Teilperspektiven untersucht: (i) Entscheidungen der Bauakteure; (ii) Materialflussanalyse; (iii) Nachfragemodellierung und (iii) Umweltbeurteilung. Im Folgenden wird das Fazit aus diesen Teilperspektiven zusammengefasst und die Erkenntnisse in einer Synthese kombiniert.

### Entscheidungen der Bauakteure

Mit Ausnahme der öffentlichen Bauherren liegt die Nachfrage nach Rückbaustoffen im Tiefbau mit über 30% weitaus höher als im Hochbau (10%). Zudem zeigt die klare Differenzierung zwischen unterschiedlichen Anwendungen der Rückbaustoffe im Tiefbau, dass es in diesem Bereich ein weit verbreitetes Knowhow gibt, während im Hochbau kaum zwischen den Anwendungen unterschieden wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der schwerpunktmässig auf den Hochbau zutrifft, ist, dass nachhaltiges Bauen eher mit Energieeffizienz als mit Recyclingmaterialien assoziiert wird.

Betrachten man die Interaktion zwischen Akteuren, so zeigt sich, dass die Vorgabe der Bauherren für nachhaltiges Bauen wenig Einfluss auf die nachkommenden Materialentscheidungen hat. Diese werden durch eine Interaktionskette geprägt, an deren Ursprung die Ingenieure stehen. Die Ingenieure verlassen sich bei ihrer Entscheidung primär auf Erfahrungen und Normen. Bei den nachfolgenden Entscheidungen ist das Interaktionskriterium in Form von Empfehlungen oder Spezifikationen immer zentral.

### Materialflussanalyse

Um die ansteigenden Bauabfallvolumen auffangen zu können, muss neben der allgemeinen Nachfrage nach Recyclingbeton vor allem der Anteil an Recyclingbeton aus Mischabbruch erheblich gesteigert werden. Dies ist notwendig, da die heutigen Verwertungsmöglichkeiten der Wiederverwertung (Magerbeton) und der Entsorgung (Innertstoffdeponien) limitiert sind. Würde Recyclingbeton zum Standard werden und wären davon 70% RC-Beton aus Mischabbruch, könnten sämtliche mineralische Bauabfälle aus dem Hochbau wiederum im Hochbau verwendet werden, und dies bei relativ geringen Anteilen an RC-Aggregat im Beton und dem heutigem Stand der Technik und Normen. Das heute stattfindende „Downcycling“ könnte so erheblich reduziert werden.

### Nachfragemodellierung

Die Modellierung der interagierenden Bauakteure hat gezeigt, dass das Erhöhen der Bekanntheit von Recyclingbeton bei Bauherren, Architekten und Ingenieuren, kombiniert mit leichten Preisvorteilen, der effektivste Hebel ist, um die Nachfrage nach Recyclingbeton anzukurbeln. Die Bekanntheit kann durch erhöhte Information erreicht werden. Hierbei ist zu beachten, dass eine Assoziation von nachhaltigem Bauen mit Rückbaustoffen erfolgt, wie dies bereits beim MinergieEco Label und beim kürzlich lancierten Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) angestrebt wird.

### Umweltauswirkungen

Recyclingbetonmischungen nach aktuellen Schweizer Standards reduzieren die Umweltauswirkungen mit Ausnahme des Treibhauseffektes (GWP) gegenüber konventionellem Beton deutlich. Die Vorteile für RC-Betone bezüglich GWP sind zwar nur gering, bestehen aber solange, wie der Anteil an Zusatzzement für Recyclingbeton 10% nicht übersteigt und Recyclingbeton nicht mehr als 15km weiter transportiert werden muss.

### Synthese

Durch konsequentes Informieren der Bauakteure liesse sich im Hochbau längerfristig die Nachfrage nach RC-Beton von momentan 11% auf rund 50% (bis zu 70% in Kombination mit Preisvorteilen) steigern. Dadurch könnten im Hochbau sämtlicher Betonabbruch sowie rund 50% des Mischabbruchs wiederverwertet werden. Ausserdem würden jährlich in der Schweiz rund 3 Mio t Kiesressourcen eingespart und rund 1.6 Mio m<sup>3</sup> Deponievolumen geschont werden. Letztlich könnte die gesamte durch die Betonproduktion verursachte Umweltbelastung um rund 15% gesenkt werden.

## 8 Empfehlungen

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Optimierung von Angebot und Nachfrage mineralischer Rückbaustoffe unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit eine vielschichtige Herausforderung darstellt. So werden sowohl Angebot als auch Nachfrage direkt von der Bautätigkeit geprägt. Dabei wird das Angebot primär durch die Abbruchtätigkeit und die Nachfrage mehrheitlich durch die Neubautätigkeit und deren Anteil an Rückbaustoffen beeinflusst. Zudem können maximal die tatsächlich frei werdenden Mengen an Sekundärbaustoffen nachgefragt werden. Eine einseitige Betrachtung würde daher zu kurz greifen. Dementsprechend wird im Folgenden zwar die Empfehlungen für die Gewährleistung der Nachfrage entlang der Wertschöpfungskette und der darin involvierten Akteure dargestellt, jedoch unter der Prämisse der bereits genannten systemischen Betrachtung. Die Empfehlungen lassen sich in drei Bereiche strukturieren: (i) Rahmenbedingungen; (ii) Ausbildung und (ii) Information.

### Rahmenbedingungen

Die Massnahmen im Bereich der Rahmenbedingungen liefern die Grundvoraussetzung für die Gewährleistung der Nachfrage.

#### a) Normen und Gesetze zur Verwendung von RC mit Mischabbruchgranulat

Damit die mineralischen Bauabfallflüsse aus dem Hochbau komplett wieder im Hochbau aufgefangen werden könnten, müsste der Anteil RC-M am Recyclingbeton (RC) deutlich erhöht werden. Normen und Gesetze zur Verwendung von RC mit Mischabbruchgranulat im Hochbau sind daher Teil einer zentralen Rahmenbedingung für eine erhöhte Nutzung der künftig anfallenden Bauabfälle in den kommenden Jahren. Diese Rahmenbedingung wurde zwar mit der neuen SIA Norm zu RC zum Teil schon erfüllt und durch zusätzliche Test ergänzt, wird aber momentan noch zu wenig wahrgenommen.

#### b) Einbezug der ökologischen Nachhaltigkeit von RC

Da die ökologische Nachhaltigkeit von RC bisher in Frage gestellt wurde, stellt deren Einbezug in die Normen, durch die gleichzeitig Empfehlungen zur Nutzung von RC impliziert werden, eine weitere Rahmenbedingung dar. Insbesondere sollte dabei auf die Umstände hingewiesen werden, unter denen RC nachhaltiger als herkömmlicher Beton verwendet werden kann:

- Solange der RC nicht mehr als 10% zusätzlichen Zement benötigt als der herkömmliche Beton und
- die zusätzliche Transportdistanz des RC nicht höher als 15km gegenüber dem herkömmlichen Beton ist, sollte RC verwendet werden.

#### c) Datenbank von Bauakteuren mit Erfahrung in nachhaltigen Bauen

Ausserdem könnte zur Förderung der Verwendung von RC eine Datenbank erstellt werden, die die Vernetzung der Akteure mit Erfahrung in nachhaltigem Bauen und in der Anwendung von RC fördert. Wie in unserem Modell dargestellt, spielt Erfahrung eine entscheidende Rolle für das Bauen mit RC. Würde den Bauherren folglich eine Liste von Architekten, Ingenieuren und Bauunternehmern zur Verfügung gestellt werden, die bereits Erfahrung im „nachhaltigen“ Bauen haben, so könnten die Bauherren ihre ursprüngliche Idee, bei ihrem Bau Nachhaltigkeitsaspekte einzubeziehen, besser realisieren.

### Ausbildung

Die Massnahmen im Bereich der Aus- und Weiterbildung stellen einen zweiten wichtigen Aspekt dar. Hierbei soll der Schwerpunkt auf die Integration der untenstehenden Bereiche in den Ausbildungen der Architekten, Bauingenieure und Bauunternehmer auf der Ebene der Universitäten, Fachhochschulen und Berufsschulen gelegt werden. Zusätzliche Weiterbildungsseminare, die von Fachverbänden organisiert sein könnten und Teile dieser Inhalte abdecken, runden das Ausbildungsprogramm ab.

a) Statische Eigenschaften von Recyclingbeton

Hier soll der Schwerpunkt auf die Bekanntmachung der bestehenden Normen und Gesetze gelegt werden. Wichtig sind dabei die unterschiedlichen Eigenschaften von RC aus Mischabbruch oder Betonabbruch, besonders im Vergleich mit konventionellem Beton.

b) Anwendungsbereiche Recyclingbeton aus Mischabbruch

Anhand von Referenzobjekten sollen die unterschiedlichen Anwendungsbereiche für verschiedene RC-Mischungen (Mischabbruch, Betonabbruch) dargestellt werden. Dabei sollte besonders auf die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von RC-M im Hochbau hingewiesen werden.

c) Grundlagen der ökologischen Bewertung von Recyclingbeton

Hier sollen die Grundlagen der ökologischen Bewertung von RC-Beton vermittelt werden. Insbesondere geht es darum, ein Grundverständnis für die ökologische Bewertung sowie die Kerngrößen, die die Abwägung eines Einsatzes von RC vs. herkömmlichen Beton erleichtern, zu ermitteln. Die Akteure sollten wissen und verstehen, unter welchen Bedingungen (Distanz, Zumischen von Zement) RC-Beton aus ökologischer Sicht nachhaltiger ist als herkömmlicher Beton und umgekehrt.

d) Künftig anfallende Mengen an Beton- und Mischabbruch

Ein weiterer Weiterbildungsaspekt, der zur Sensibilisierung führt, ist die Ausbildung bezüglich der künftig anfallenden Mengen an Beton- und Mischabbruch bei unterschiedlichen Szenarien. Dieses Wissen fördert das systemische Denken und erlaubt den Akteuren, ein ganzheitliches Bild für die Problematik zu gewinnen und ihre eigene Rolle sowie den jeweiligen Spielraum besser wahrzunehmen.

e) Einsatz von RC im Tiefbau

Ein letzter Bereich, der in diesen Ausbildungsprogrammen enthalten sein sollte, ist der Einsatz des RC im Tiefbau bzw. die Sammlung von Kriterien, um den Einsatz im Tief- vs. Hochbau abwägen zu können. Dies ermöglicht auch einen Zusammenschluss der Erkenntnisse aus den Hochbauerfahrungen mit RC und den Tiefbauerfahrungen mit dem Einsatz von Recyclingaggregaten.

### **Information und Sensibilisierung**

Während die vorherig genannten Ausbildungsmassnahmen vor allem die Architekten, Bauingenieure und Bauunternehmer betrafen, stehen bei den Informations- und Sensibilisierungsmassnahmen die Bauherren und die breite Bevölkerung im Vordergrund.

a) Bauherreninformation

Für die Bauherren (private, kommerzielle und öffentliche) sollten Informationsmaterialien bereitgestellt werden, die in leicht verständlich und gut aufbereiteter Form die folgenden Inhalte vermitteln:

- Normen und Statik (Was ist gemäss den Normen erlaubt oder möglich?)
- Umweltbewertung (Unter welchen Umständen ist RC umweltfreundlicher?)
- Demoprojekte und Anwendungsmöglichkeiten (Wofür kann RC eingesetzt werden?)
- Labels (Welche Labels beinhalten den Einsatz von RC?)
- Kontaktpersonen für „nachhaltiges“ Bauen (siehe oben, z.B. Datenbank)

Die Informationen sollten sich an den bereits bestehenden Informationen (z.B. zu Minerale) orientieren. Sie sollten die Bauherren ermutigen, trotz möglicher Empfehlungen der Architekten und Bauingenieure gegen den Einsatz von RC-Beton, diesen gemäss den bestehenden Normen zu fordern.

b) Allgemein Öffentlichkeitsarbeit

Weiterhin sollten über Kanäle wie Fernsehen, Presse etc. positive Erfahrungen und Leuchtturmprojekte im Bereich Bauen mit RC publik gemacht werden. Zusätzlich sollte die Bevölkerung auf die positiven Effekte einer Wiederverwendung von Mischabbruch,

wie die Schonung von Kiesreserven und Deponievolumen, aufmerksam gemacht werden. Letztlich sollten ausgewählte Inhalte in die Schulen hineingetragen werden, um eine frühe Sensibilisierung für geschlossene Stoffkreisläufe erreichen zu können.

## Anhänge

<b>I.</b>	<b>Manuskripte .....</b>	<b>74</b>
I.1	An agent operationalization approach for context specific agent-based modelling .....	74
I.2	Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials .....	75
I.3	Enhancing the recycling of construction materials; an agent-based model with empirically based decision parameters .....	76
I.4	Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications .....	77

# I. Manuskripte

## I.1 An agent operationalization approach for context specific agent-based modelling

### Abstract

The potential of agent-based modelling (ABM) has been demonstrated in various research fields. However, three major concerns limit the full exploitation of ABM; (i) agents are too simple and behave unrealistically without any empirical basis, (ii) 'proof of concept' applications are too theoretical and (iii) too much value placed on operational validity instead of conceptual validity. This paper presents an operationalization approach to determine the key system agents, their interaction, decision-making and behaviour for context specific ABM, thus addressing the above-mentioned shortcomings. The approach is embedded in the framework of Giddens' structuration theory and the structural agent analysis (SAA). The agents' individual decision-making (i.e. reflected decisions) is operationalized by adapting the analytical hierarchy process (AHP). The approach is supported by empirical system knowledge, allowing us to test empirically the presumed decision-making and behavioural assumptions. The output is an array of sample agents with realistic (i.e. empirically quantified) decision-making and behaviour. Results from a Swiss mineral construction material case study illustrate the information which can be derived by applying the proposed approach and demonstrate its practicability for context specific agent-based model development.

Der Artikel wurde publiziert als:

Knoeri, C., C.R. Binder, and H.J. Althaus, *An agent operationalization approach for context specific agent-based modeling*. JASSS The Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2011. **14**(2).

Der Artikel ist online verfügbar unter:

<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/14/2/4.html>

## I.2 Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials

### Abstract

Construction and demolition (C&D) waste, being already the largest waste fraction in industrialized countries, is expected to increase in the future. C&D waste recycling has been considered to be a valuable option not only for minimizing C&D waste streams to landfills but also for mitigating primary mineral resource depletion. Even though the use of recycled mineral construction materials (RMCM) is regulated and successful application examples are available, construction stakeholders do not yet broadly apply them. Although various criteria hindering a transition towards a broader application of RMCM have been identified, it is yet unknown how these criteria differ among decisions, stakeholders and applications. We therefore analyse construction stakeholders' behaviour, and decision-making regarding RMCM for the construction material market in Switzerland. Stakeholders' decision-making was quantified with the analytical hierarchy process (AHP) in a survey in combination with their behaviour. The results demonstrate the importance of stakeholder interaction, i.e. most stakeholders decide which material to apply based on interaction with other stakeholders e.g., recommendations and specifications. However, the initial general specification by awarding authorities that construction should be sustainable has little relevance to the subsequent material decisions. On the contrary the role of the recommendation of engineers, have a high impact on the subsequent decisions by the other stakeholders. Results also confirm that RMCM are broadly accepted in civil engineering (CE), whereas in structural engineering (SE) RMCM are still a niche product. The good alignment of the outcome of decision modelling with observed behaviour shows the usefulness of analysing decision-making with AHP.

Der Artikel wurde publiziert als:

Knoeri, C., C.R. Binder, and H.J. Althaus, *Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials*. Resources, Conservation and Recycling, 2011. **55**(11): p. 1039-1050.

Der Artikel und Zusatzinformationen sind online verfügbar unter:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001017>

### I.3 **Enhancing the recycling of construction materials; an agent-based model with empirically based decision parameters**

#### **Abstract**

Recycling of construction material has been seen as a valuable option for minimizing construction & demolition waste streams to landfills and mitigating primary mineral resource depletion. Material flows in the construction sector are governed by a complex socio-technical system in which awarding authorities decide in interaction with other actors on the use of construction materials. Currently, construction & demolition waste is still mainly deposited in landfills, as construction actors lack the necessary information and training regarding the use of recycled materials, and as a result have low levels of acceptance for them. This paper presents an agent-based model of the Swiss recycled construction material market based on empirical data derived from the agent operationalization approach. It aims to elaborate on how recycling of construction materials can be enhanced by analysing key factors affecting the demand and develop scenarios towards a sustainable construction waste management. Doing so it demonstrates how detailed empirical agent decision data were incrementally included in the model development. Raising construction actors' awareness of recycled materials as a decision option, in combination with small price incentives was most effective for enhancing the use of recycled materials. This could lead to a 50% reduction of construction & demolition waste streams to landfills, and significantly reduce the environmental impacts related to concrete applications. Although the agent operationalization approach provides a large empirical foundation, incremental model development turned out to be particularly important for result's traceability and a realistic system representation.

Der Artikel wird publiziert als:

Knoeri, C., I. Nikolic, H.J. Althaus, and C.R. Binder, *Enhancing the recycling of construction materials; an agent-based model with empirical based decision parameters*. JASSS The Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2013. [forthcoming]

## I.4 Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications

### Abstract

*Purpose:* Construction and demolition (C&D) waste recycling has been considered to be a valuable option not only for minimizing C&D waste streams to landfills but also for mitigating primary mineral resource depletion. However, the potentially higher cement demand due to the larger surface of the coarse recycled aggregates challenges the environmental benefits of recycling concrete. Furthermore, it is unclear how the environmental impacts depend on concrete mixture, cement type, aggregates composition and transport distances.

*Method:* We therefore analysed the life cycle impacts of 12 recycled concrete (RC) mixtures with two different cement types and compared it with corresponding conventional concretes (CC) for three structural applications. The RC mixtures were selected according to laws, standards and construction practice in Switzerland. We compared the environmental impacts of ready-for-use concrete on the construction site, assuming equal lifetimes for recycled and conventional concrete in a full LCA. System expansion and substitution are considered to achieve the same functionality for all systems.

*Results:* The results show clear (~30%) environmental benefits for all RC options at endpoint level (ecoinicator 99 and ecological scarcity). The difference is mainly due to the avoided burdens associated to reinforcing steel recycling and avoided disposal of C&D waste. Regarding global warming potential (GWP), the results are more balanced and primarily depend on the additional amount of cement needed for RC. Above 22 to 40 kg additional cement per m<sup>3</sup> of concrete, RC exhibits a GWP comparable to CC. Additional transport distances above 15 km for the RC options do result in environmental impacts higher than those for CC.

*Conclusions:* In summary, the current market mixtures of recycled concrete in Switzerland show significant environmental benefits compared to conventional concrete and cause similar GWP, if additional cement and transport for RC are limited.

Der Artikel wurde publiziert als:

Knoeri, C., E. Sanyé-Mengual, and H.J. Althaus, *Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications*. International Journal of Life Cycle Assessment, 2013. 18(5). p 909-918.

Der Artikel und Zusatzinformationen sind online verfügbar unter:  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-012-0544-2>

## Abkürzungen

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
ABM	Agenten-basierte Modellierung
AHB	Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
AHP	Analytische Hierarchie Prozess
AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
C	Beton (concrete)
CC	Konventioneller Beton (conventional concrete)
C&D waste	Construction and demolition waste (Bauabfall)
EFH	Einfamilienhaus
M	Mischgranulat
MCDA	Multikriterien Entscheidungsanalyse
MFH	Mehrfamilienhaus
R <sub>b</sub>	Körner aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen, Porenbetonsteinen (nicht schwimmend), gemäss SN EN 933-11
R <sub>c</sub>	Körner aus Beton, Betonprodukten, Mörtel und Mauersteinen aus Beton, gemäss SN EN 933-11
RC	Recyclingbeton (recycled concrete)
RC-C	Recyclingbeton mit Betongranulat; Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R <sub>c</sub>
RC-M	Recyclingbeton mit Mischgranulat; Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R <sub>c</sub> + R <sub>b</sub> und mindestens 5 Massenprozent R <sub>b</sub>
RMCM	Recycled mineral construction materials (mineralische Recyclingbaustoffe)
SIA	Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein
VSS	Verband Schweizerischer Strassenfachleute

## Literaturverzeichnis

- [1] Behrens, A., et al., *The material basis of the global economy Worldwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies*. Ecological Economics, 2007. **64**(2): p. 444-453.
- [2] Schachermayer, E., T. Lahner, and P.H. Brunner, *Assessment of two different separation techniques for building wastes*. Waste Management & Research, 2000. **18**(1): p. 16-24.
- [3] Muller, D.B., *Stock dynamics for forecasting material flows - Case study for housing in The Netherlands*. Ecological Economics, 2006. **59**(1): p. 142-156.
- [4] Hashimoto, S., H. Tanikawa, and Y. Moriguchi, *Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of construction minerals for Japan*. Waste Management, 2007. **27**: p. 1725-1738.
- [5] Bergsdal, H., et al., *Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock*. Building Research and Information, 2007. **35**(5): p. 557-570.
- [6] Duran, X., H. Lenihan, and B. O'Regan, *A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling - the case of Ireland*. Resources Conservation and Recycling, 2006. **46**(3): p. 302-320.
- [7] Fatta, D., et al., *Generation and management of construction and demolition waste in Greece - an existing challenge*. Resources Conservation and Recycling, 2003. **40**(1): p. 81-91.
- [8] Jang, Y.C. and T. Townsend, *Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines*. Advances in Environmental Research, 2001. **5**(3): p. 203-217.
- [9] Lawson, N., et al., *Recycling construction and demolition wastes - a UK perspective*. Environmental Management and Health, 2001. **12**(2): p. 146 - 157
- [10] Blum, A. and S. Stutzriemer, *Recycled construction minerals for urban infrastructure in Germany: non-technical issues*. 2007. Minerals & Energy(3-4): p. 148-58.
- [11] Weil, M., U. Jeske, and L. Schebek, *Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values*. Waste Management & Research, 2006. **24**(3): p. 197-206.
- [12] BAFU, *Bauabfälle Schweiz - Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege. Band 1: Kennwerte*, 2001, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
- [13] BAFU, *Bauabfälle Schweiz - Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege. Band 2: Kantonale Werte*, 2001, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
- [14] BAFU, *Abfallstatistik 2009: Zahlen und Entwicklungen der schweizerischen Abfallwirtschaft im Jahr 2009, 2010*, Bundesamt für Umwelt (BAFU): Bern.
- [15] BAFU, *Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch)*, 2006, Bundesamt für Umelt (BAFU): Bern.
- [16] Zürich, *Gesetz über die Abfallwirtschaft (Abfallgesetz)*, 1994: Kanton Zürich.
- [17] Schneider, M. and S. Rubli, *Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich*, 2007, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Tiefbauamt der Stadt Zürich: Zürich.
- [18] Lichtensteiger, T., *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender, in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme; Ein Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten2006*, Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- [19] Rubli, S. and H. Gugerli, *Bewirtschaftungskonzept*, in *tec21; Die Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt*2006. p. 4-7.
- [20] Moser, K., et al., *Baustoffmanagement 21 an der EMPA, Stand des Wissens und Forschungsbedarf*, 2004, Material Science and Technology (EMPA).
- [21] Hoffmann, C. and O. Huth, *Konstruktionsbeton aus recycelter Gesteinskörnung (Beton- und Mischabbruchgranulat)*, 2006: Dübendorf, Schweiz. p. 89 pp.
- [22] Hoffmann, C. and F. Jacobs, *Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat*, 2007, Material Science and Technology (EMPA), Abteilung Beton/Bauchemie und TFB, Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, Wildegg: Dübendorf.
- [23] Hoffmann, C., *Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch*, 2004, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Material Science and Technology (EMPA): Zürich. p. 37.
- [24] KBOB, *Beton aus recycelter Gesteinskörnung, in Empfehlung für nachhaltiges Bauen 2007*, Koordination der Bau und Liegenschaftsorgane des Bundes (KBOB): Bern. p. 6.
- [25] VSS, *Recycling; Allgemeines*, 1998, Vereinigung-Schweizerischer-Strassenfachleute, (VSS), Schweizer-Norm, (SN).
- [26] VSS, *Recycling; Ausbauasphalt*, 1998, Vereinigung-Schweizerischer-Strassenfachleute (VSS), Schweizer Norm (SN).
- [27] VSS, *Recycling; Mischabbruch*, 1998, Vereinigung-Schweizerischer-Strassenfachleute (VSS), Schweizer Norm (SN).
- [28] VSS, *Recycling; Betonabbruch*, 1998, Vereinigung-Schweizerischer-Strassenfachleute (VSS), Schweizer Norm (SN).
- [29] VSS, *Recycling; Strassenaufbruch*, 1998, Vereinigung-Schweizerischer-Strassenfachleute (VSS), Schweizer Norm (SN).
- [30] SIA, *Recyclingbeton*, 2010, Schweizerischer Ingenieur und Architekten Verein (SIA), Schweizer Norm (SN).
- [31] Minergie. *Minergie-Eco*. 2012 [cited 2012 04. April]; Available from: <http://www.minergie.ch/minergie-eco-557.html>.
- [32] Chiu, C.-T., T.-H. Hsu, and W.-F. Yang, *Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements*. Resources, Conservation and Recycling, 2008. **52**(3): p. 545-556.
- [33] Hugener, M., et al., *Recycling von Strassenbelägen - ein Umweltproblem?* Chimia, 1998. **52**: p. 225-229.
- [34] Carpenter, A.C., et al., *Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction*. Waste Management, 2007. **27**(10): p. 1458-1464.
- [35] Hugener, M., L. Emmenegger, and P. Mattrel, *Zusammenhang zwischen PAK-Gehalt in teerhaltigem Recyclinggranulat und in den emittierten Dämpfen beim Wiedereinbau*, 2006, EMPA Material Research and Testing: Dübendorf.

- [36] Hugener, M., H. Deschwenden, and T. Bähler, *Umweltgerechtes Recycling von teerhaltigen Belägen. Teilprojekt 1: Erfassung des Status-Quo und Abklärung der Bedürfnisse. Forschungsauftrag 26/96 auf Antrag der VSS. UVEK/ASTRA Bericht Nr. 433, August 1999, 102 S. 0, 1999.*
- [37] Kellenberger, D., et al., *Life Cycle Inventories of Building Products*, in *Final report ecoinvent v2.0 No. 72007*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Duebendorf, CH.
- [38] Holcim, *Oekobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton*, 2010, Holcim: Zurich.
- [39] Marinkovic, S., et al., *Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete*. *Waste Management*, 2010. **30**(11): p. 2255-64.
- [40] Spoerri, A., et al., *Expert-based scenarios for strategic waste and resource management planning - C&D waste recycling in the Canton of Zurich, Switzerland*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009. **53**(10): p. 592-600.
- [41] Huang, W.L., et al., *Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process*. *Resources Conservation and Recycling*, 2002. **37**(1): p. 23-37.
- [42] Loughlin, D.H. and M.A. Barlaz, *Policies for Strengthening Markets for Recyclables: A Worldwide Perspective*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2006. **36**(4).
- [43] Eberhard. *Baustoffe 2010*. 2010 [cited 2010 17.03.2010]; Available from: [http://www.eberhard.ch/dnl/104\\_957\\_Eberhard\\_Preisliste\\_2010.pdf](http://www.eberhard.ch/dnl/104_957_Eberhard_Preisliste_2010.pdf).
- [44] HASTAG. *Produkte und Preise 2010*. 2010 [cited 2010 17.03.2010]; Available from: [http://www.hastag.ch/de/\\_pdf/HASTAG\\_ZH\\_PL2010.pdf](http://www.hastag.ch/de/_pdf/HASTAG_ZH_PL2010.pdf).
- [45] Huang, Y., R.N. Bird, and O. Heidrich, *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*. *Resources Conservation and Recycling*, 2007. **52**(1): p. 58-73.
- [46] Rao, A., K.N. Jha, and S. Misra, *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007. **50**(1): p. 71-81.
- [47] Poon, C.S., *Management of construction and demolition waste*. *Waste Management*, 2007. **27**(2): p. 159-160.
- [48] Robin, C.P.Y. and C.S. Poon, *Cultural shift towards sustainability in the construction industry of Hong Kong*. *Journal of Environmental Management*, 2009. **90**(11): p. 3616-3628.
- [49] Knoeri, C., C.R. Binder, and H.J. Althaus, *An agent operationalization approach for context specific agent-based modeling*. *JASSS The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2011. **14**(2).
- [50] Knoeri, C., C.R. Binder, and H.J. Althaus, *Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011. **55**(11): p. 1039-1050.
- [51] Robinson, G.R., W.D. Menzie, and H. Hyun, *Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA*. *Resources Conservation and Recycling*, 2004. **42**(3): p. 275-294.
- [52] Busenitz, L.W. and J.B. Barney, *Differences between entrepreneurs and managers in large organizations: Biases and heuristics in strategic decision-making*. *Journal of Business Venturing*, 1997. **12**(1): p. 9-30.
- [53] Amihud, Y. and B. Lev, *Risk reduction as a managerial motive for conglomerate mergers*. *Bell Journal of Economics*, 1981. **12**(2): p. 605-617.
- [54] Finucane, M.L., et al., *The affect heuristic in judgments of risks and benefits*. *Journal of Behavioral Decision Making*, 2000. **13**(1): p. 1-17.
- [55] Witt, U., *"Lock-in" vs. "critical masses" - industrial change under network externalities*. *International Journal of Industrial Organization*, 1997. **15**(6): p. 753-773.
- [56] Binder, C.R., *From material flow analysis to material flow management Part II: The role of structural agent analysis*. *Journal of Cleaner Production*, 2007. **15**: p. 1605-1617.
- [57] Costanza, R., et al., *Modeling complex ecological economic-systems - towards an evolutionary, dynamic understanding of people and nature*. *Bioscience*, 1993. **43**(8): p. 545-555.
- [58] Cornwall, A. and R. Jewkes, *What is participatory research?* *Social Science & Medicine*, 1995. **41**(12): p. 1667-1676.
- [59] Susskind, L., S. McKernnan, and J. Thomas-Larmer, *The consensus building handbook - a comprehensive guide to reach agreement* 1999, Thousand Oaks, CA: Sage.
- [60] Saaty, T.L., *How to Make a Decision - the Analytic Hierarchy Process*. *European Journal of Operational Research*, 1990. **48**(1): p. 9-26.
- [61] Wasserman, S. and K. Faust, *Social Network Analysis: Methods and Applications* 1994: Cambridge Univ. Press.
- [62] Granovetter, M., *ECONOMIC-ACTION AND SOCIAL-STRUCTURE - THE PROBLEM OF EMBEDDEDNESS*. *American Journal of Sociology*, 1985. **91**(3): p. 481-510.
- [63] Uzzi, B., *Social structure and competition in interfirm networks: The paradox of embeddedness*. *Administrative Science Quarterly*, 1997. **42**(1): p. 35-67.
- [64] Belton, V. and T.S. Stewart, *Multi criteria decision analysis. An integrated approach* 2002, Boston: Kluwer Academic Press.
- [65] Saaty, T.L., *The analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation* 1980, New York: McGraw-Hill.
- [66] Ajzen, I., *The theory of planned behavior*. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1991. **50**(2): p. 179-211.
- [67] Triandis, H.C., *Values, Attitudes and Interpersonal Behaviour, Nebraska Symposium on Motivation* 1980, Lincoln/London: University of Nebraska Press.
- [68] Bundesversammlung, *Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen*, 1994, Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft.
- [69] ASTRA, *Handbuch Beschaffungswesen, Investitionsrechnung ASTRA*, 2008, Bundesamt für Strassen (ASTRA): Ittigen.
- [70] Sutter, E., *Telephonische Auskunft über Zuschlagskriterien*, 2008, Tiefbauamt des Kantons Zürich: Zürich.
- [71] Eberle, S., *Telephonische Auskunft zu üblichen Zuschlagskriterien*, 2008, Fachleitung für öffentliches Beschaffungswesen, Baupolizeiamt, Stadt Winterthur: Winterthur.
- [72] Dietlikon, G., *Leitfaden Submissionen; Politische Gemeinde und Schulgemeinde Dietlikon (GSD)*, P.G.u.S.D. (GSD), Editor 2007, Politische Gemeinde und Schulgemeinde Dietlikon (GSD).
- [73] Bänninger, M., *Telephonische Auskunft vom 31.03.2008 zu üblichen Zuschlagskriterien*, 2008, Kanzlei, Hittnau: Hittnau.
- [74] Fishbein, M. and I. Ajzen, *Belief, attitude, intention, and behavior: An introduction to theory and research*. 1975, Reading, MA: Addison-Wesley.
- [75] Ajzen, I. and T.J. Madden, *Prediction of goal-directed behavior - attitudes, intentions, and perceived behavioral-*

- control. Journal of Experimental Social Psychology, 1986. **22**(5): p. 453-474.
- [76] Uebersax, H., *Kies für Generationen: Kommunikation [Gravel for Generations: Communication]*, 2005, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürich; Abt. Abfall: Zürich.
- [77] Eberhard, J. and J. Martin, *Kosten und Nutzen: Wärmeschutz bei Wohnbauten [Costs and Benefits: Insulation in Residential Buildings]*, 2003, Bundesamt für Energie (BFE): Bern.
- [78] Ling, Y.Y., *A conceptual model for selection of architects by project managers in Singapore*. International Journal of Project Management, 2002. **21**(2003): p. 135-144.
- [79] Tanner, I., *Dynamische Modellierung des Potentials von Sekundärrohstoffen aus Strassen*, in *Professur für Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften 2005*, ETH Zürich: Zürich.
- [80] Schneider, M., *Mischabbruch-Recycling: Chancen, Potentiale und Strategien*, in *Departement für Bau, Umwelt und Geomatik 2005*, ETH Zürich: Zürich.
- [81] BfS, *Bau- und Wohnbaustatistik [Building and construction statistics]*, in *annually2008*, Swiss Federal Statistical Office (BfS): Neuchâtel.
- [82] FOEN, *Bauabfaelle Hochbau in der Schweiz; Ergebnisse der Studie 2008*, 2008, Federal Office for the Environment: Bern, Switzerland.
- [83] Lichtensteiger, T., *Ressourcen am Bau: Aspekte einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung im Bauwesen*1998, Zürich: vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich.
- [84] Rubli, S., *Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung des VC Werd*, 2003, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich: Zürich.
- [85] Schneider, M. and S. Rubli, *Ressourcenmodell der mineralischen Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich; Dynamische Modellierung 1995–2050*, 2009, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich: Zürich.
- [86] Mauch, U. and A. Scheidegger, *Nachhaltigkeit des Bauens in der Schweiz*1996, Bern: ENET.
- [87] Amt für Abfall, W., Energie und Luft (AWEL), *Deponiestatistik 2006*, Baudirektion des Kanton Zürich: Zürich.
- [88] Knoeri, C., et al., *Enhancing recycling of construction materials; the role of empirically based decision parameters* JASSS The Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2013.
- [89] Janssen, M.A. and E. Ostrom, *Governing social-ecological systems*, in *Handbook of computational economics II: agent-based computational economics*, L. Tesfatsion and K.L. Judd, Editors. 2005, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- [90] Grimm, V., et al., *Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: Lessons from ecology*. Science, 2005. **310**(5750): p. 987-991.
- [91] Bergman, N., et al., *Modelling socio-technical transition patterns and pathways*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2008. **11**(3): p. 1460-7425.
- [92] Chappin, E.J.L. and G.P.J. Dijkema, *Agent-based modelling of energy infrastructure transitions*. International Journal of Critical Infrastructures, 2010. **6**(2): p. 106-130.
- [93] Haxeltine, A., et al., *A Conceptual Framework for transition modelling*. International Journal for Innovation and Sustainable Development, 2008. **3**(1/2).
- [94] Schwarz, N. and A. Ernst, *Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations - An empirical approach*. Technological Forecasting and Social Change, 2009. **76**(4): p. 497-511.
- [95] Garcia, R., *Uses of agent-based modeling in innovation/new product development research*. Journal of Product Innovation Management, 2005. **22**(5): p. 380-398.
- [96] Rahmandad, H. and J. Sterman, *Heterogeneity and network structure in the dynamics of diffusion: Comparing agent-based and differential equation models*. Management Science, 2008. **54**(5): p. 998-1014.
- [97] Axtell, R.L., C.J. Andrews, and M.J. Small, *Agent-Based Modeling and Industrial Ecology*. Journal of Industrial Ecology, 2001. **5**(4): p. 10-13.
- [98] Ramanath, A.M. and N. Gilbert, *The design of participatory agent-based social simulations*. Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2004. **7**(4).
- [99] Polhill, J.G., et al., *Using the ODD Protocol for Describing Three Agent-Based Social Simulation Models of Land-Use Change*. Jasss-the Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2008. **11**(2).
- [100] Sopha, B.M., C.A. Klockner, and E.G. Hertwich, *Exploring policy options for a transition to sustainable heating system diffusion using an agent-based simulation*. Energy Policy, 2011. **39**(5): p. 2722-2729.
- [101] Davis, C., I. Nikolic, and G.P.J. Dijkema, *Infrastructure modelling 2.0*. International Journal of Critical Infrastructures, 2010. **6**(2): p. 168-186.
- [102] Andrews, C.J., et al., *Designing Buildings for Real Occupants: An Agent-Based Approach*. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part a-Systems and Humans, 2011. **41**(6): p. 1077-1091.
- [103] Bollinger, L.A., et al., *Modeling Metal Flow Systems*. Journal of Industrial Ecology, 2011.
- [104] Tesfatsion, L. and K.L. Judd, *Handbook of computational economics: agent-based computational economics*. Handbooks in economics. Vol. 2. 2006, Amsterdam: Elsevier.
- [105] Axelrod, R., *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*1997, Princeton: Princeton University Press.
- [106] Gilbert, N. and K.G. Troitzsch, *Simulation for the social scientist*. 2 ed2005, Berkshire, England: Open University Press, McGraw-Hill.
- [107] Giddens, A., *The constitution of the society*1984, Berkeley, CA: University of California Press.
- [108] Grimm, V., et al., *A standard protocol for describing individual-based and agent-based models*. Ecological Modelling, 2006. **198**(1-2): p. 115-126.
- [109] Grimm, V., et al., *The ODD protocol: a review and first update*. Ecological Modelling, 2010. **221**(23): p. 2760-2768.
- [110] Knoeri, C., E. Sanyé-Mengual, and H.J. Althaus, *Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications*. International Journal of Life Cycle Assessment, 2013.
- [111] ISO, *ISO 14044; Environmental management - Life cycle assessment - Principals and framework*, 2006, ISO.
- [112] ISO, *ISO 14044; Environmental management - Life cycle Assessment - Requirements and guidelines*, 2006, ISO.
- [113] Hügi, M., et al., *Abfallwirtschaftsbericht 2008. Zahlen und Entwicklungen der schweizerischen Abfallwirtschaft 2005-2007.*, in *Umwelt-Zustand*2008, Bundesamt für Umwelt: Bern. p. 119.
- [114] Li, X., *Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 2008. **53**(1-2): p. 36-44.
- [115] Poon, C.S., et al., *Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates*. Waste Management, 2009. **29**(8): p. 2369-2377.

- [116] Hofmann, W. and B. Patt, *Konstruktionen aus Mischabbruch*. tec21; Die Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt, 2006. **10**: p. 8-10.
- [117] Fonseca, N., J. de Brito, and L. Evangelista, *The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste*. Cement & Concrete composites, 2011. **33**: p. 637 – 643.
- [118] Cabral, A., et al., *Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2010. **24**: p. 421–430.
- [119] Limbachiya, M.C., E. Marrocchino, and A. Koulouris, *Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate*. Waste Management, 2007. **27**(2): p. 201-208.
- [120] Mercante, I., et al., *Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study*. International Journal of Life Cycle Assessment, 2011. **17**(2): p. 232-241.
- [121] Eberhard, H., *Phone interview to concrete composition and recycling concrete mixtures*, 2011, Eberhard Recycling AG: Zürich.
- [122] Rubli, S., *Phone interview to concrete and mixed rubble compositions.*, 2011, Energie- und Ressourcen-Management GMBH: Zürich.
- [123] Gschösser, F., *Phone interview to mean transport distances*, 2011, ETH Zurich: Zurich, Switzerland.
- [124] Nygaard, P.V. and A. Leemann, *For the cemsuisse project 201106: Carbon dioxide uptake of reinforced concrete structures due to carbonation*, 2012, Empa, Materials Reserach and Technology: Dubendorf, Switzerland.

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 17.07.2013

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2005/004  
Projekttitel: Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement  
Enddatum: 2008

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

i) Nachfrageentscheidungen und Verhalten der Bauakteure:

Rückbaustoffe sind im Tiefbau bereits gut etabliert, während Recyclingbeton im Hochbau immer noch ein Nischenprodukt ist. Eine Forderung nach nachhaltigem Bauen zu Beginn des Bauprozesses scheint kaum Auswirkungen auf die Materialentscheidungen zu haben. Diese werden primär durch die Interaktionen mit anderen Bauakteuren, insbesondere den Ingenieuren, geprägt, deren Entscheidungen primär durch Normen und Erfahrung bestimmt werden.

ii) Materialflussanalyse (potentielles Angebot):

Der Vergleich des potentiellen Angebots an Sekundärbaustoffen mit der Nachfrage in verschiedenen Szenarien zeigt, dass bei herkömmlicher Nachfrage sowohl vom potentiellen Beton- als auch vom Mischabbruch nur ein Bruchteil nachgefragt wird. Bei maximaler Nachfrage, 40% substituierten Aggregaten und einem Anteil von ~70% RC-M könnten die anfallenden mineralischen Beton- und Mischabbruchströme vollständig im Hochbau untergebracht werden.

iii) Agentenbasierte Angebots-Nachfrage Modellierung:

Die Modellierung der interagierenden Bauakteure zeigt, dass weniger die Entscheidungskriterien oder deren Gewichtung, sondern vielmehr die Bekanntheit von Recyclingbeton für die Nachfrage zentral ist. Die Nachfrage nach Recyclingbeton kann dementsprechend vor allem durch Information der Bauherren, Architekten und Ingenieuren gesteigert werden könnte, dies könnte durch einen leichter Preisvorteil noch verstärkt werden.

iv) Umweltbeurteilung:

Die Studie hat gezeigt, dass Recyclingbeton vor allem darum ökologische Vorteile gegenüber herkömmlichem Beton zeigt, weil durch die Verwertung des Beton- und Mischabbruch einerseits Deponieraum eingespart wird und andererseits auch mehr Armierungsstahl einem Recycling zugeführt wird als im Referenzfall. Bei Berücksichtigung dieser Effekte schneiden alle Recyclingbetonvarianten (RC) bezüglich den Umweltauswirkungen - mit Ausnahme der Treibhausgasemissionen - deutlich (15-50%) besser ab als der konventionelle Beton (CC). Dabei sollte der Mehrzementbedarf von RC auf etwa 10% limitiert werden und die



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

Das Projektziel war die Optimierung von Angebot und Nachfrage nach mineralischen Recyclingbaustoffen. Dies wurde erreicht durch die Analyse und Modellierung von Angebot und Nachfrage nach mineralischen Recyclingbaustoffen und der Entwicklung und Beurteilung von Szenarien und Strategien für ein ökologisches Baustoffmanagement.

Im Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass Rückbaustoffe im Strassenbau gut akzeptiert und deren ökologische Vorteile wenig umstritten sind, daher wurde im zweiten Teil des Projekts der Fokus auf den Hochbau gelegt.

Das methodische Vorgehen, wieweils leicht von den im Projektbeschrieb skizzierten Ideen ab, was für ein Forschungsprojekt von dieser Komplexität aber durchaus charakteristisch ist. Die hohe Komplexität hat leider auch dazu geführt, dass das Erreichen der Projektziele deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen hat als ursprünglich geplant, was eine Verzögerung des Projektes zur Folge hatte.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Optimierung von Angebot und Nachfrage mineralischer Rückbaustoffe unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit eine vielschichtige Herausforderung darstellt. Die Massnahmen sollten daher die gesetzlichen Rahmenbedingungen verbessern, Rückbaustoffe in die Ausbildung von Bauakteuren einbinden und mit Informationsmassnahmen Bauherren und die breite Bevölkerung sensibilisieren.

Durch konsequentes Informieren der Bauakteure liesse sich im Hochbau längerfristig die Nachfrage nach RC-Beton von momentan 11% auf rund 50% (und bis zu 70% in Kombination mit Preisvorteilen) steigern. Dadurch könnte im Hochbau sämtlicher Betonabbruch sowie rund 50% des Mischabbruchs wiederverwertet werden. Ausserdem würden jährlich in der Schweiz rund 3 Mio t Kiesressourcen eingespart und rund 1.6 Mio m<sup>3</sup> Deponievolumen geschont werden. Letztlich könnte die gesamte durch die Betonproduktion verursachte Umweltbelastung um rund 15% gesenkt werden.

#### Publikationen:

Knoeri, C., C.R. Binder, and H.J. Althaus, An agent operationalization approach for context specific agent-based modeling. JASSS, 2011.

Knoeri, C., C.R. Binder, and H.J. Althaus, Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials. RC&R, 2011.

Knoeri, C., E. Sanyé-Mengual, and H.J. Althaus, Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. IJLCA, 2013.

Knoeri, C., et al., Enhancing recycling of construction materials; the role of empirically based decision parameters JASSS, 2013.

Tanner, I. Diplomarbeit ETH Zürich, 2005.

Knoeri, C. Diplomarbeit ETH Zürich, 2007.

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Althaus

Vorname: Hans-Jörg

Amt, Firma, Institut: Empa, Technologie & Gesellschaft

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Diese Forschungsarbeit stellt einen wichtigen Beitrag zum nachhaltigen Baustoffmanagement dar. Neu ist insbesondere, dass die Untersuchung nicht nur die technische, sondern erstmals auch eine sozio-ökonomische Sicht beinhaltet. Dank der Kombination der Ergebnisse der vier Teilperspektiven ist eine Gesamtperspektive des Nachhaltigen Baustoffmanagements für mineralische Baustoffe in der Schweiz entstanden. Die Untersuchung bestätigt frühere Prognosen, dass der Anfall von Mischabbruch zukünftig weiter ansteigen wird und vermehrt auch im Hochbau eingesetzt werden sollte. Die für die Entscheidungen massgebenden Akteure sowie die wichtigsten Hebel für den verstärkten Einsatz von Rückbaustoffen wurden identifiziert. Die ermittelten Umweltwirkungen von RC-Beton zeigen, dass die RC-Baustoffe im Vergleich zu Primärkies deutlich besser abschneiden, als in früheren Studien. Das grosse vorhandene Potenzial für RC-Baustoffe wurde durch die Studie bestätigt.

##### Umsetzung:

Die Grundlagen und Rahmenbedingungen für das Nachhaltige Baustoffmanagement liegen weitgehend vor. Die empfohlenen Massnahmen für die Auszeichnung von Akteuren, die Ausbildung sowie Information und Sensibilisierung stellen eine gute Basis dar für die Umsetzung durch bestehende Organisationen, wie der Verein eco-bau (Eco-Fachpartner, Minergie-Eco, Kies für Generationen (AWEL Kanton Zürich), Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz (NNBS)). Nach dem Abschluss der Studie soll der Autor die Erkenntnisse in Fachpublikationen für betroffene Kreise (Planer, Bauherren, Unternehmer) veröffentlichen (z.B. Tech21).

##### weltergehender Forschungsbedarf:

Für die „Ökobilanzdaten im Baubereich“ (KBOB/eco-bau/IPB Empfehlung 2009/1) sollten Datensätzen für recycelte Gesteinskörnung aus Betongranulat aus aufbereitetem Betonabbruch resp. Mischgranulat aus aufbereitetem Mischabbruch sowie entsprechende RC-Betone aufbereitet werden.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Die Normen für den Einsatz von RC-Beton bestehen bereits (z.B. SIA 2030). Die Ergebnisse der Studie werden bei der nächsten Revision der KBOB/eco-bau/IPB-Empfehlung 2007/2 "Beton aus recycelter Gesteinskörnung" einfließen.

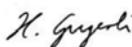
#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Gugerli

Vorname: Heinrich

Amt, Firma, Institut: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

# Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.06.2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundamentalschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeits-hilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigen-schaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infra-struktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesell-schaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausphal mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfris-tige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güter-verkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Ein-satz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zwei-rad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Lang-samverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Gü-terverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulators Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Ganglinienorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Viellissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassen-griffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologietransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Trep-penwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Auto-bahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkierungsanlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwen-	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		der des SIS"	
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernomen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbausphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Trag-sicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009