Wertstoff-Börse GmbH
Alter Zürichweg 21
8952 Schlieren
Tel. 044 371 40 90
Fax. 044 371 30 04
Natel 079 541 38 89
info@wertstoff-boerse.ch
www.wertstoff-boerse.ch

Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich

Schlussbericht

ausgearbeitet durch
Martin Schneider und Stefan Rubli
Wertstoff-Börse GmbH, Schlieren
info@wertstoff-boerse.ch

Auftraggeber:
Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Tiefbauamt der Stadt Zürich

November 2007

Impressum

Titel	Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich
Auftraggeber	Amt für Hochbauten der Stadt Zürich Fachstelle Nachhaltiges Bauen Dr. H. Gugerli Lindenhofstrasse 21 8021 Zürich
	Tiefbauamt der Stadt Zürich Werterhaltung M. Bürgi Werdmühleplatz 3 8023 Zürich
Autoren	Martin Schneider, Dr. Stefan Rubli Wertstoff-Börse GmbH Alter Zürichweg 21 8952 Schlieren
	Tel 044 371 40 90 Fax 044 371 40 04 schneider@wertstoff-boerse.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **iv**

1 Einleitung **1**
1.1 Nutzung urbaner Lagerstätten als Rohstoffquelle 1
1.2 Warum ein Ressourcenmodell 1
1.3 Vorgehen 2
1.4 Zielsetzung: Ein dynamisches Ressourcenhaushaltsmodell 3

2 Methoden **5**
2.1 Systembeschreibung 6
2.2 Untersuchte Materialien 7
2.3 Materialisierung der Gebäude 8
2.4 Validieren der Gebäudematerialisierung 16
2.5 Exkurs: Input-Output-Modell (I-O-Tabelle) 20
2.6 Materialisierung der Infrastruktur 23
2.7 Unsicherheit 27

3 Resultate **28**
3.1 Analyse des Gebäudebestandes 28
3.2 Analyse der Infrastruktur 32
3.3 Das Lager der mineralischen Baustoffe in der Stadt Zürich 34
3.4 Die Materialflüsse in der Stadt Zürich im Jahr 2005 37
3.5 Kennzahlen 47

4 Diskussion **49**
4.1 Vergleiche mit anderen Studien 49
4.2 Einsatz von RC-Beton in der Stadt Zürich 56
4.3 Potenzial im Ressourcenmanagement von Hochbau und Tiefbau 56
4.4 Fazit 58

Literaturverzeichnis **62**

Abbildungsverzeichnis **63**

Tabellenverzeichnis **64**

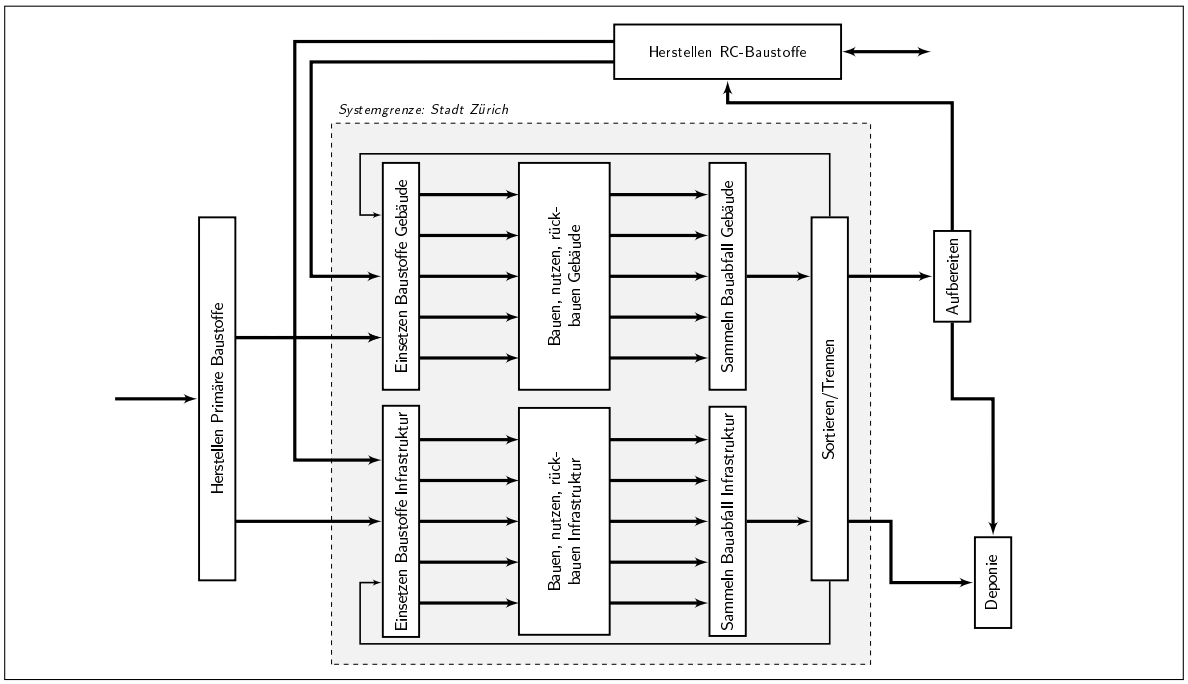
Glossar **65**

Anhang **67**

Zusammenfassung

Mit dem Bau der grossen urbanen Gebiete in der Schweiz im vergangenen Jahrhundert wurde ein Bauwerk mit riesigem Materiallager erstellt. Auch wenn in der Schweiz mineralische Rohstoffe für die Bauwirtschaft in genügenden Mengen abgebaut werden können, ist es wichtig, sich Gedanken darüber zu machen, wie mit dem gebauten System umgegangen wird. Denn das Materiallager in den Gebäuden, den Strassen und den Infrastrukturnetzen kann auch als Ressourcenstätte für zukünftiges Bauen betrachtet werden. Damit eine systematischere Nutzung von Recycling-Baustoffen überhaupt in Betracht gezogen werden kann, müssen die Datengrundlagen und das Systemverständnis deutlich verbessert werden.

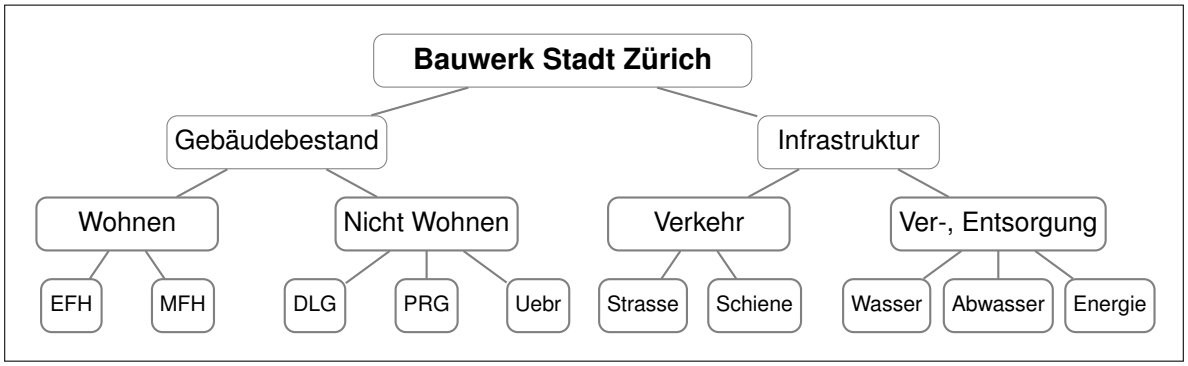
In dieser Arbeit konnte dazu erstmals für eine Schweizer Stadt in integraler Sichtweise eine detaillierte Inventur über die in den Gebäuden, Strassen und Infrastrukturnetzen gelagerten mineralischen Baumaterialien durchgeführt werden. Gleichzeitig konnten auch die jährlichen Materialflüsse abgeschätzt werden, welche durch Neubau, Sanierung und Unterhalt des «Bauwerkes Stadt Zürich» über die Stadtgrenze hinein- und hinausfliessen. Als Referenzjahr wurde dafür das Jahr 2005 gewählt.



Figur Z-1: Das System für die mineralischen Baustoffe in der Stadt Zürich.

Die Systemgrenze wurde entlang der Gemeindegrenze um die Stadt Zürich gezogen (Figur Z-1). Das bedeutet, dass innerhalb des Systems gebaut, genutzt und rückgebaut wird. Alle Produktionsbetriebe der Baustoffe sowie alle Aufbereitungsfirmen und Deponien sind jedoch ausserhalb der Stadt angesiedelt. Die untersuchten mineralischen Baustoffe und Rückbaumaterialien wurden in die Kategorien Beton, Mauerwerk, Kies/Sand, Belag und mineralische Restfraktion (Gips, Keramik, Glas) eingeteilt.

Für die Analyse wurde das «Bauwerk Stadt Zürich» über mehrere Stufen nach verschiedenen Nutzungen differenziert, wie dies in der Figur Z-2 dargestellt ist. Die Grenze zwischen Gebäude und Infrastruktur verläuft auf der Parzellengrenze, die Erschliessung der Bauten wird damit zu den Gebäuden gezählt.



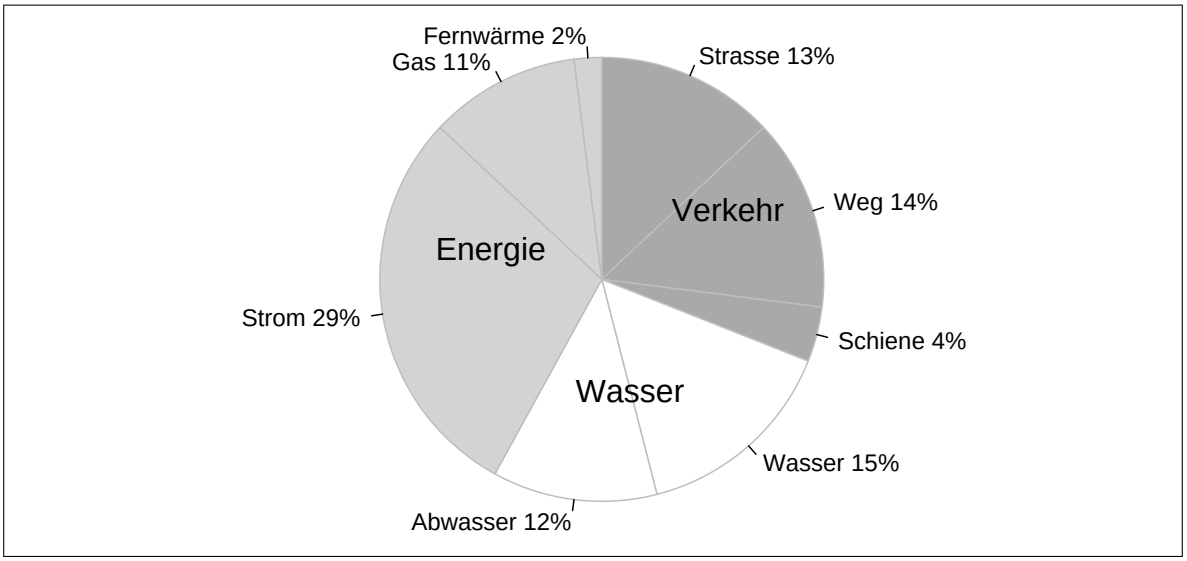
Figur Z-2: Die Differenzierung des «Bauwerks Stadt Zürich» in Gebäude und Infrastruktur und ihre Unterkategorien. EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, DLG: Dienstleistungsgebäude, PRG: Produktionsgebäude, Uebr: Übrige Gebäude

Gebäude Daten zu den Bauten konnten von *Statistik Stadt Zürich* für den vollständigen Gebäudebestand auf der Stufe Einzelobjekt bezogen werden. Die Daten enthalten u. a. Angaben zu Baujahr, Nutzung und Gebäudevolumen. Für das Modell wurde für jede Gebäude-Nutzungskategorie eine «typische» Bauweise und damit eine «typische» Zusammensetzung und Menge der Baumaterialien in Abhängigkeit des Alters angenommen. Basis dieser Annahme ist die Studie [Kt. Aargau, 1995]. So konnten die Materiallager in den Gebäuden berechnet werden. Für die Abschätzung der Materialflüsse wurden die durchschnittlichen Bestandesveränderungen der Jahre 2002–2005 von Neubau, Sanierung und Abbruch betrachtet und daraus die Materialflüsse modelliert.

Der Gebäudebestand in der Stadt Zürich umfasste Ende 2005 rund 55'400 Gebäude mit einem Gesamtvolumen von 165 Mio. Kubikmetern. Die Bauten wurden bezüglich dem Volumen zur Hälfte als Wohnhäuser genutzt (4 % EFH, 45 % MFH), über ein Drittel sind Dienstleistungsgebäude (DLG, 38 %) und nur 5 % der Bauten sind Produktionsgebäude (PRG). Die übrigen Gebäude (Uebr) machen nochmals 7 % aus.

Infrastruktur Aus detaillierten Angaben der Netzbetreiber zu den Strassenflächen, Kunstbauten und Netzlängen sowie den durchschnittlichen Erneuerungsraten konnten mit einem jeweils typischen Aufbau bzw. Querschnitt das totale Volumen der eingesetzten Materialien quantifiziert werden. Für die Modellierung der jährlichen Flüsse wurde angenommen, dass die Netzlängen konstant bleiben und der gesamte Materialbedarf für die Erneuerung eingesetzt wird. Die Infrastruktur ist folgendermassen gegliedert: Die Strassen sind rund 1'000 km lang. Die Ver- und Entsorgung der Gebäude mit Wasser und Energie verläuft zum grossen Teil unterhalb der Strassen. Die Länge dieser Netzte ist daher von der Grössenordnung der Strassenlänge: Wege, Wasser, Abwasser und Gas weichen nur wenig von den 1'000 km Länge ab. Das Stromnetz ist hingegen rund doppelt so lang. Einerseits ist die Versorgung feiner aufgeschlüsselt und häufig in Ringen ausgeführt, andererseits bestehen drei parallele Netze mit verschiedenen Spannungen. Die Fernwärmeleitungen machen nur 2 % der gesamten Infrastrukturnetze aus (Figur Z-3).

Materiallager und jährliche Materialflüsse Die Materiallager in der Stadt Zürich im Jahr 2005 sind in der Figur Z-4 dargestellt. Über 70 % der mineralischen Baustoffe sind in den Gebäuden gelagert. Diese bestehen zum grössten Teil aus Beton, Mauerwerk und der mineralischen Restfraktion (Gips, Keramik und Glas). Die Lager in den MFH und DLG sind



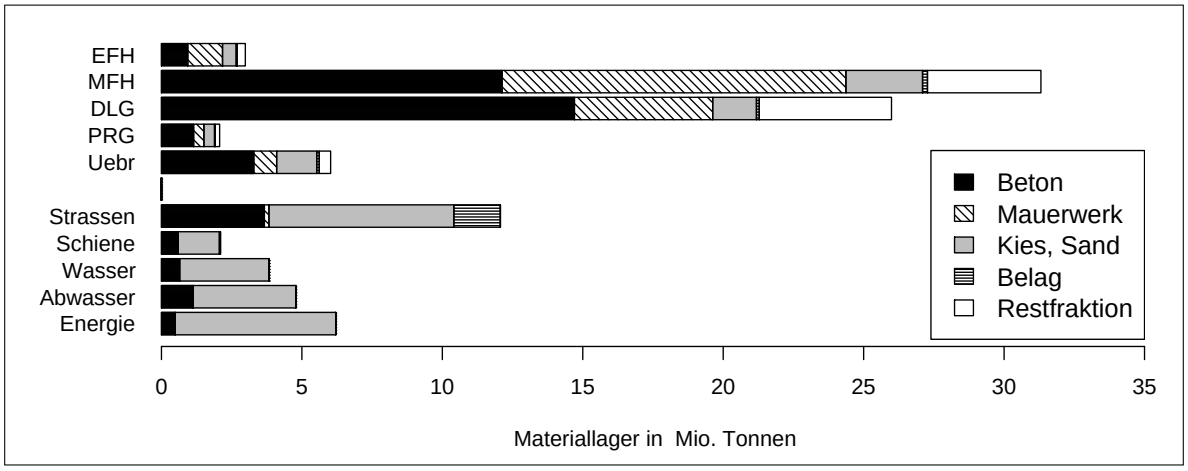
Figur Z-3: Der Bestand der Infrastruktur-Netze, relativ zu ihrer Länge dargestellt. Die totale Länge beträgt rund 7'500 km.

erwartungsgemäss am grössten. In der Infrastruktur sind rund 30 Mio. Tonnen Material gelagert welche vorwiegend aus Kies/Sand, Belag und Beton bestehen.

Die Resultate der Materialflüsse sind in der Figur Z-5 gezeigt. Die Inputflüsse in die MFH und DLG sowie die Uebr machen zusammen fast 96 % des Inputs in die Gebäude aus. Dieser Input entspricht 1.7 % des Lagers. Bei den Outputflüssen fällt der grosse Beitrag der PRG auf, da viele PRG in der Stadt Zürich abgebrochen werden. Dabei resultieren grosse Mengen von Rückbaumaterialien. Die hohe Umbau- und Sanierungsrate der vielen DLG lassen deren Anteil bei den Outputflüssen auf über 50 % steigen.

Da die Infrastrukturnetze nach der Modellannahme nicht wachsen sind die Input- und Outputflüsse dort gleich hoch. Dabei wird für die Erneuerung der Strassen der grösste Teil der Materialien umgesetzt (41 %). Der Beton im Bereich der Strassen wird für die Kunstbauten (Brücken, Tunnels) eingesetzt. Da das Energienetz relativ lange ist, sind auch dessen Materialflüsse relativ hoch, obwohl die Trassen nicht tief unter der Strasse bzw. dem Trottoir geführt werden.

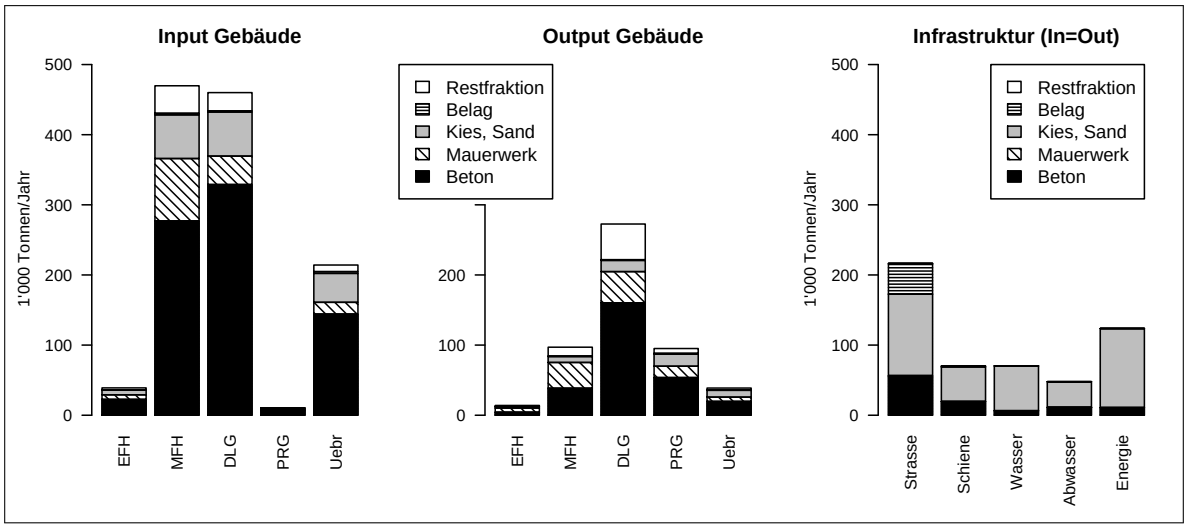
Der Vergleich der Resultate mit Arbeiten, welche für die Schweiz gemacht wurden, zeigt, dass die erhaltenen Resultate für die **Materiallager** gut übereinstimmen. So folgt z. B. aus [BUWAL, 2001] für das Materiallager in Gebäuden und Infrastruktur der Wert von 280 Tonnen pro Einwohner (t/cap), für die Stadt Zürich lautet das Resultat 275 t/cap. Bei den **Flüssen** hingegen sieht es anders aus. Die Inputflüsse von Beton in die Stadt Zürich sind im Vergleich zu Werten für den Kanton Zürich um die Hälfte kleiner, nämlich 2.5 t/(cap·Jahr) in die Stadt, 5.1 t/(cap·Jahr) im Kanton (eigene Abschätzung aus kantonalen Daten von CemSuisse). Hingegen sind die Outputflüsse von Bauabfällen aus der Stadt Zürich doppelt so gross, wie die entsprechenden Werte für die Schweiz [BUWAL, 2001]. Eine plausible Erklärung liefern die Zahlen zum Wachstum der Stadt Zürich im Vergleich zur Schweiz und dem Kanton Zürich: Die Stadt Zürich wächst in den letzten Jahren langsamer als ihr Umland, daher ist ihr Materialbedarf kleiner. Umgekehrt werden die Gebäude in der Stadt häufiger saniert oder sogar abgebrochen, was zu höheren Ouputflüssen führt. Die reine «Wachstumsphase» der Stadt Zürich schwächt sich offenbar ab und es findet ein Wechsel zu einer «Umbau- und Umnutzungsphase» statt.



Figur Z-4: Das Materiallager in der Stadt Zürich im Jahr 2005 in Mio. Tonnen. Total sind in der Stadt fast 100 Mio. Tonnen mineralische Baustoffe gelagert, davon rund 70 % in den Gebäuden.

Für den Materialeinsatz der Stadt Zürich kann aus den Resultaten gefolgert werden, dass das Potenzial für Recycling-Baustoffe erst langsam erkannt wird: Nur 20 % des Betons und 25 % der Kiese/Sande welche in die Stadt fliessen sind RC-Produkte. Hier ist eine deutliche Steigerung möglich. Der Anteil der deponierten Materialien liegt immer noch bei 20 % der Bauabfälle; dieser Anteil könnte weiter verringert werden.

Die vorliegende Studie bildet die Grundlage für die zweite Phase des Projektes, in der die Lager und Flüsse der mineralischen Materialien dynamisch modelliert werden. Mittels Szenarien sollen die Auswirkungen von Massnahmen auf die Materialflüsse untersucht werden und mögliche Tendenzen vorweggenommen werden.



Figur Z-5: Materialflüsse in die Stadt Zürich und aus der Stadt im Jahr 2005. Der Input wird dominiert durch den Bedarf der MFH und DLG, der Output durch die Rückbaumaterialien aus den DLG und PRG. Bei der Infrastruktur sind die Inputflüsse nach den Modellannahmen gleich gross wie die Outputflüsse.

1 Einleitung

1.1 Nutzung urbaner Lagerstätten als Rohstoffquelle

Die Schweiz ist ein ressourcenarmes Land! Diese Aussage trifft aus verschiedenen Gründen nur bedingt zu. So verfügt die Schweiz beispielsweise über bedeutende mineralische Rohstoffvorkommen, welche vor allem von der Industrie der Steine und Erden zur Versorgung des inländischen Bausektors genutzt werden. Die jährlichen Abbaumengen von Rohstoffen wie Kies, Sand, Kalk, Mergel, Tonmineralien und Gips, welche zur Herstellung wichtiger Baustoffe wie Beton, Mörtel, Backsteinen, Dachziegel und Kalksandsteinen dienen, bewegen sich seit Mitte der 90er Jahre im Bereich von ca. 40 Mio. Tonnen [BFS, 2005]. Dies ist knapp die Hälfte des totalen Materialverbrauches der Schweiz [BFS, 2007]. Diese «einheimischen» Rohstoffe sind demnach nicht nur mengenmässig relevant sondern auch aus marktwirtschaftlicher Sicht von erheblicher Bedeutung.

Weitere Rohstoffquellen, die in Zukunft eine immer wichtigere Rolle einnehmen werden, sind die urbanen Lagerstätten. Mit der Entwicklung urbaner Systeme im vergangenen Jahrhundert wurde ein Bauwerk erstellt, in dem enorme Materiallager aufgebaut wurden. Der Begriff «Bauwerk» umfasst die Summe aller physischen Einrichtungen des Menschen, um ein urbanes System zu betreiben [Lichtensteiger, 2006]. Im Bauwerk enthalten sind sämtliche Hoch- und Tiefbauten sowie Infrastruktureinrichtungen. Die Materiallager in urbanen Systemen von wohlhabenden Nationen liegen mittlerweile für einige Materialien im Bereich der heute noch verfügbaren geogenen Ressourcenlager (auf Pro-Kopf-Basis). Als Beispiel sei hier das Kupfer erwähnt. Studien zum regionalen Kupferhaushalt zeigen, dass das Kupferlager im Bauwerk Schweiz ca. 200 kg/Einwohner beträgt [Wittmer, 2006]. Im Vergleich dazu, betragen die aus heutiger Sicht abbauwürdigen geogenen Kupfervorkommen noch ca. 300 kg/Einwohner [Lichtensteiger, 2006]. Die abgebauten Mengen liegen damit in der Grössenordnung der noch vorhandenen Lager. Zudem weisen die kupferhaltigen Materialien im Bauwerk sehr hohe Reinheit auf, währen der Kupfergehalt der abgebauten Erze laufend abnimmt und heute nur noch knapp über dem erforderlichen Mindestgehalt von 0.5 % liegt [Wittmer, 2006].

Die Gewinnung und Verarbeitung der Sekundärressourcen zu neuen Produkten ist zudem in den meisten Fällen weniger energieintensiv und umweltbelastend als die Produktion von Gütern aus Primärressourcen. Mit den knapper werdenden Verfügbarkeiten von Primärressourcen und Energieträgern sowie aus klimapolitischen Überlegungen wird in Zukunft die Nutzung der Sekundärressourcen für den Ausbau und Unterhalt urbaner Systeme eine immer wichtigere Rolle einnehmen.

1.2 Warum ein Ressourcenmodell

Bei der Exploration von primären Ressourcenlagerstätten muss für einen Investitionsentscheid das Potential einer auszubeutenden Lagerstätte abgeschätzt werden. Dazu werden verschiedene geologische Methoden (Kartierung, Bohrungen, künstliche Erdstösse usw.) eingesetzt und Modellierungen durchgeführt. Aufgrund der gewonnen Informationen, kann dann beurteilt werden, ob sich die Ausbeutung der potentiellen Lagerstätte aus ökonomischer Sicht lohnt. Wie sieht es nun bei der Ausbeutung urbaner Lagerstätten aus? Wir verfügen heute über relativ wenige Kenntnisse zur optimalen Nutzung der Sekundärressourcen. Uns fehlen die Datengrundlagen um ein Systemverständnis zu entwickeln. Der Ressourcenbedarf eines Systems wird heute hauptsächlich durch die ökonomischen Rahmenbedingungen

gesteuert. Die Ressourceneffizienz spielt dabei heute erst eine untergeordnete Rolle. Es sind kaum Informationen über die Materialflüsse und Lagermengen bekannt. Damit können wir nicht beurteilen, ob wir unsere mineralischen Ressourcen effizient nutzen. Wir wissen nicht einmal, an welcher Stelle wir ansetzen müssten, um die Materialeffizienz allenfalls zu erhöhen. Für ein umfassendes Systemverständnis müssen die Materialflüsse und Lager eines betrachteten Systems relativ detailliert erfasst bzw. abgeschätzt werden. Nur so wird es möglich sein, die teilweise sehr komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen in einem System zu verstehen. Sollen, wie im vorliegenden Fall, die mineralischen Baustoffe des «Bauwerks Stadt Zürich» analysiert werden, sind die lange Verweildauer der zu untersuchenden Materialien im besagten Bauwerk sowie die internen (Recycling-)Flüsse weitere Faktoren, die berücksichtigt werden müssen.

Ein Ressourcenmodell für mineralische Baustoffe, wie es die Stadt Zürich in Rahmen dieser Studie entwickeln möchte, muss aber auch die langfristigen Entwicklungen der verschiedenen mineralischen Baustoffflüsse und Lager abbilden können. Diese Entwicklungen sind von verschiedenen Rahmenbedingungen abhängig, welche teilweise aktiv beeinflusst werden können. Die hohe Komplexität sowie die langen Verweilzeiten der Materialien erfordert ein dynamisches Ressourcenhaushaltsmodell für das «Bauwerk Stadt Zürich». Mit einem solchen Modell lassen sich langfristige Tendenzen und Entwicklungen der anfallenden Mengen besser abschätzen, so dass relativ frühzeitig auf allfällige Fehlentwicklungen reagiert werden kann. Zudem lassen sich die Auswirkungen von schon heute eingeleiteten Massnahmen mit Hilfe der dynamischen Modellierung besser überprüfen. Die Vorgehensweise bei der Untersuchung von urbanen Lagerstätten unterscheidet sich zwar in gewissen Punkten von der Exploration von primären Ressourcenlagerstätten, es bestehen aber auf der konzeptionellen Ebene durchaus Analogien. So muss die urbane Lagerstätte ebenfalls zunächst analysiert werden. Anschliessend erfolgt dann eine Modellierung, um abzuschätzen, durch welche Massnahmen eine aus ressourcenwirtschaftlicher Sicht optimale Nutzung der mineralischen Primär- und Sekundärressourcen zu erzielen ist.

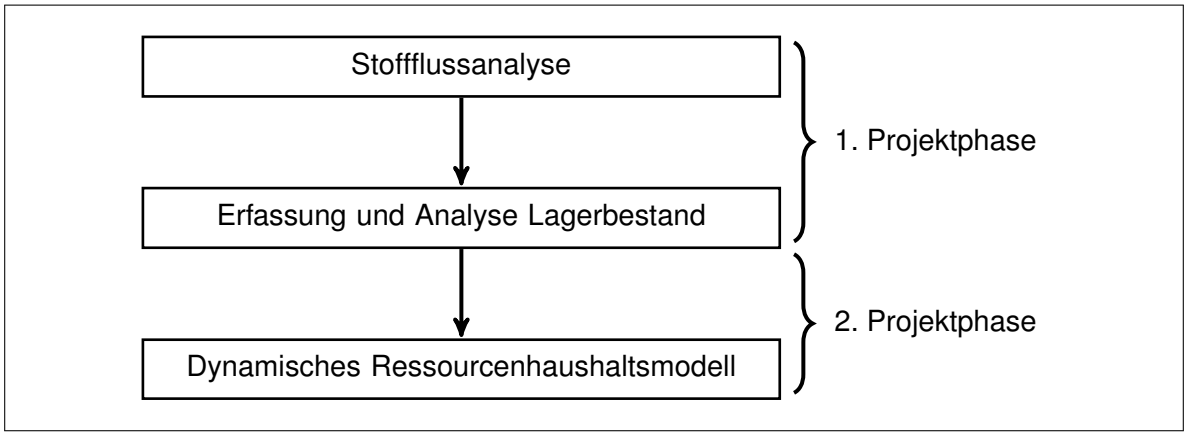
Ein weiterer Aspekt für den Einsatz eines Ressourcenmodelles sind Lebenszyklusbetrachtungen von Baustoffen. Für viele Fragenstellungen wird es immer wichtiger, über Materialien genauer Bescheid zu wissen. Lebenzyklusanalysen (LCA) und Lebenskostenanalyse (LCC) werden daher häufig als Instrumente eingesetzt, um Materialien und Produkte nach verschiedenen ökonomischen oder ökologischen Indikatoren zu bewerten. Basis solcher Modelle sind immer Stoffflussanalysen (SFA), wie sie in dieser Arbeit durchgeführt werden. Es ist somit möglich, die Resultate dieser Arbeit in LCA und LCC zu integrieren, um die verschiedenen Baustoffe und Rückbaumaterialien unter ausgewählten Gesichtspunkten zu bewerten.

Damit wird es auch möglich, heutige Baustoffe auf ihre Umwelteinwirkung zu untersuchen: Welche Auswirkungen hat das Bauen von heute auf die Rückbauprozesse in 50–100 Jahren? Wie können die heutigen Bauten bezüglich diesen Aspekten besser geplant werden?

1.3 Vorgehen

Das Projekt ist in zwei Phasen unterteilt. In der nachfolgenden Figur 1-1 ist das Vorgehen schematisch dargestellt.

In der ersten Phase des Projektes werden die mineralischen Lagerbestände, die Lagerentwicklung und die Materialflüsse in der Stadt Zürich und für die Objekte der «Bauherrin Stadt Zürich» im Tief- und Hochbau sowie für die Infrastruktureinrichtungen abgeschätzt. Die Datenbasis soll Informationen über die heutigen Input- und Outputflüsse der mineralischen



Figur 1-1: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Entwicklung eines dynamischen Ressourcenmodells für die Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich.

Baustoffe liefern. Die Lagerbestände werden ebenfalls erhoben und analysiert. Die Kenntnisse der Lagerbestände bilden die Voraussetzung für die zweite Projektphase, in der eine dynamische Modellierung des Systems durchgeführt wird. Die Daten für die Erhebung der Lagerbestände werden vom Statistischen Amt der Stadt Zürich (*Statistik Stadt Zürich*) zur Verfügung gestellt. Da es sich um grosse Datenvolumina handelt, erfolgt die Datenverwaltung mittels einer Datenbank. In der zweiten Phase wird ein Ressourcenhaushaltmodell erstellt, anhand dessen die zukünftige Entwicklung der mineralischen Baustofflager und -flüsse abgebildet werden kann. Dazu werden Szenarien entwickelt und gerechnet. Das Modell und die Szenarien werden so gewählt, dass die langfristigen Auswirkungen von verschiedenen Materialbewirtschaftungsoptionen erkennbar werden.

1.4 Zielsetzung: Ein dynamisches Ressourcenhaushaltsmodell

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines dynamischen Ressourcenhaushaltsmodells für die mineralischen Baustoffe auf der Ebene der Stadt Zürich. Das Modell soll in der Lage sein, Veränderung der mineralischen Materialflüsse und Lagermengen in der Stadt Zürich in Abhängigkeit unterschiedlicher Entwicklungsszenarien für das Bauwerk aufzuzeigen. Das Modell trägt damit massgeblich zu einem besseren Systemverständnis bei. Das Amt für Hochbauten (AHB) als einer der grössten Bauherren in der Stadt Zürich und das Tiefbauamt der Stadt Zürich (TAZ) wollen künftig gemeinsam eine langfristig orientierte Ressourcenbewirtschaftung des Bauwerkes Stadt Zürich verfolgen. Das zu entwickelnde Ressourcenhaushaltsmodell ist ein nützliches Instrument der Früherkennung und bietet damit wichtige Grundlagen zur Umsetzung dieser Strategie.

Ziele der ersten Projektphase In der ersten Phase werden die Grundlagen für die Entwicklung des Ressourcenhaushaltsystems geschaffen. Es wird eine Stoffflussanalyse mit den wichtigsten Prozessen und Güterflüssen erstellt. Die Flüsse und Lager werden analysiert und interpretiert. Die Stoffflussanalyse leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Systemverständnis. Dieses ist wiederum die Voraussetzung für die dynamische Modellierung in der zweiten Phase. Die Ergebnisse aus der ersten Phase sind in diesem Bericht zusammengefasst.

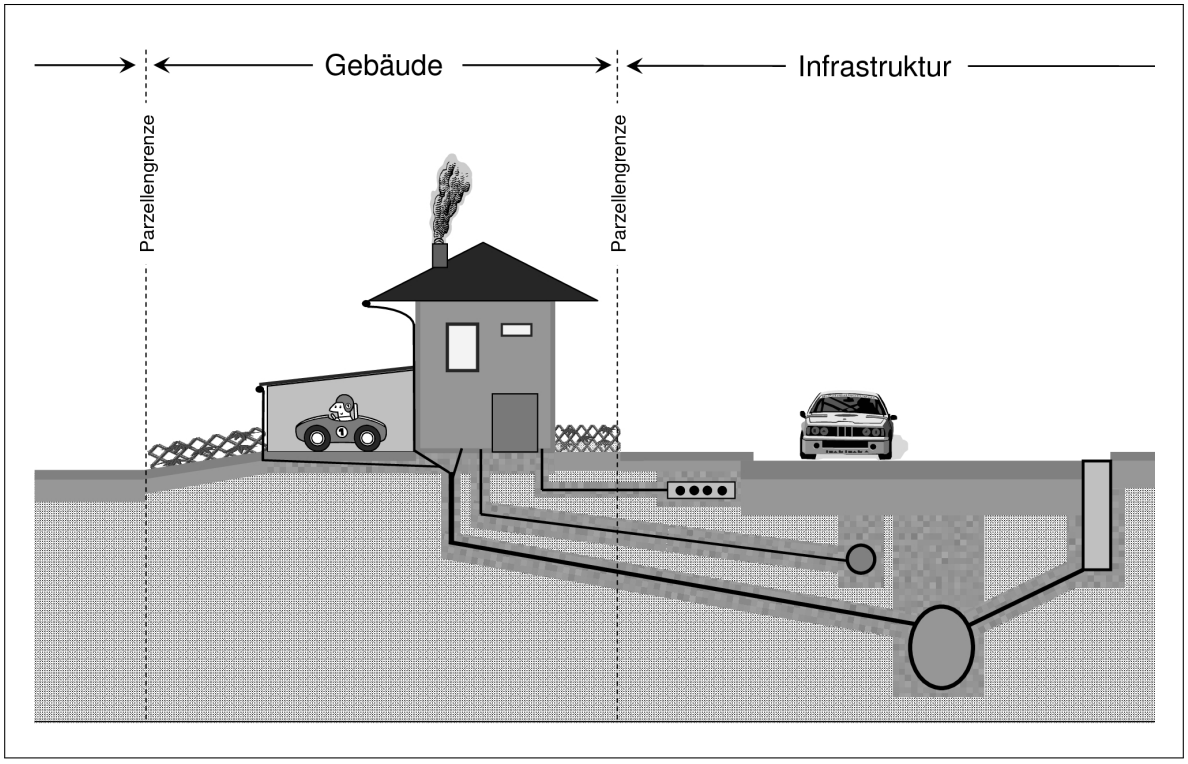
Ziele der zweiten Projektphase Das Ziel der zweiten Phase ist die Entwicklung eins dynamischen Ressourcenhaushaltssystems für die mineralischen Baustoffe auf der Ebene der Stadt Zürich. Dabei wird die Entwicklung der Materialflüsse und Lager auf Grundlage vorgegebener Szenarien dynamisch modelliert. Durch die Wahl geeigneter Szenarien können die Auswirkungen von Massnahmen oder veränderten Rahmenbedingungen auf das System untersucht werden. Dies trägt zu einem stark verbesserten Systemverständnis bei, was wiederum von grosser Bedeutung für die Umsetzung einer nachhaltig orientierten Ressourcenbewirtschaftung des Bauwerkes Stadt Zürich durch die involvierten Behörden ist.

2 Methoden

Die Grösse der Stadt Zürich mit ihren über 55'000 Gebäuden, rund 1'000 km Strassen und unter den Strassen mehr als 4'000 km Netz-Leitungen kann einen zu Beginn der Arbeit etwas stocken lassen: Wie sollen dazu verlässliche Zahlen erhoben werden können?

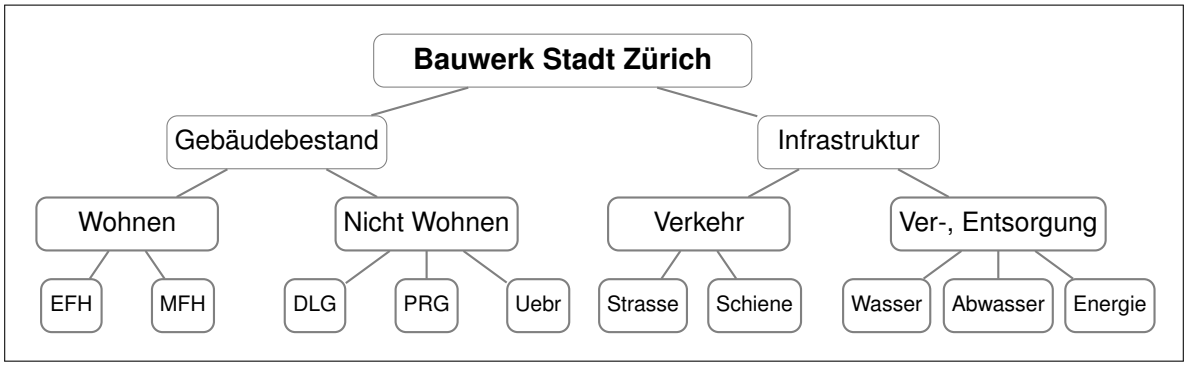
Es ist wohl nicht möglich, jedes einzelne Haus auf dessen Zusammensetzung hin zu untersuchen. Es wird auch nicht möglich sein, jeden Meter Abwasserkanal genau ausmessen zu können. Es müssen also Abschätzungen und Vereinfachungen gemacht werden, um zumindest eine Grössenordnung der Materiallager und -flüsse bestimmen zu können.

Der Bestand der gebauten Stadt Zürich wird für die Untersuchung in die zwei Bereiche **Gebäude und Infrastruktur** geteilt; die Grenze liegt dabei an der Parzellengrenze wie das in der Figur 2-1 schematisch dargestellt ist. Das heisst, dass die ganze Erschliessung eines Gebäudes mit Zufahrtsstrasse, Wasser und Abwasserleitungen etc. innerhalb der Parzelle ebenfalls zum Gebäude gezählt wird.



Figur 2-1: Darstellung der Trennung von Gebäuden und Infrastruktur. Die Grenze verläuft entlang der Parzelle eines Gebäudes. Die Erschliessung des Gebäudes (Strasse, Wasser, Abwasser, Energie) innerhalb der Parzelle zählt somit zum Gebäude.

Das «Bauwerk Stadt Zürich» wird für die Untersuchung in weitere Kategorien unterteilt, wie sie in der Figur 2-2 zu sehen sind. Die Gebäude unterteilen sich in Einfamiliengebäude (EFH) und Mehrfamiliengebäude (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG), Produktionsgebäude (PRG) und Übrige (Uebr) wie Kirchen, Parkhäuser, Landwirtschaftsbetriebe etc. Die Infrastruktur umfasst die Verkehrswege wie Strasse und Schiene sowie die Ver- und Entsorgungsnetze für Wasser, Energie und Kommunikation auf öffentlichem Grund.



Figur 2-2: Die Differenzierung des «Bauwerks Stadt Zürich» in Gebäude und Infrastruktur und ihre Unterkategorien. EFH: Einfamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, DLG: Dienstleistungsgebäude, PRG: Produktionsgebäude, Uebr: Übrige Gebäude

2.1 Systembeschreibung

Für die Untersuchung muss das System und insbesondere die Systemgrenze definiert werden. In der Figur 2-3 ist dieses System dargestellt. Die verschiedenen Prozesse (Kästchen) werden nachfolgend beschrieben. Die Flüsse (Pfeile) stehen für die Materialflüsse der mineralischen Baustoffe innerhalb der entsprechenden Zeitperiode; i. A. werden die Flüsse und Lagerveränderungen für ein Jahr angegeben.

Systemgrenze Die Systemgrenze wird um die Stadt Zürich entlang der Gemeindegrenze gezogen. Das hat Konsequenzen für den Rücklauf der Recyclingprodukte: da diese ausserhalb des Systems hergestellt werden, besteht bezüglich dem Recycling *kein geschlossenes System*. Alles was ausserhalb der Systemgrenze liegt wird mit *Umland* bezeichnet.

Für die Untersuchung gilt das Jahr 2005 als Referenzjahr.

Herstellen der Primären Baustoffe Die Herstellung von Baustoffen aus primären Rohstoffen erfolgt im Umland. Sie erhält ihren Input ebenfalls aus dem Umland. Die Stadt Zürich hat (von wenigen Ausnahmen abgesehen[1]) keine eigenen natürlichen Ressourcen.

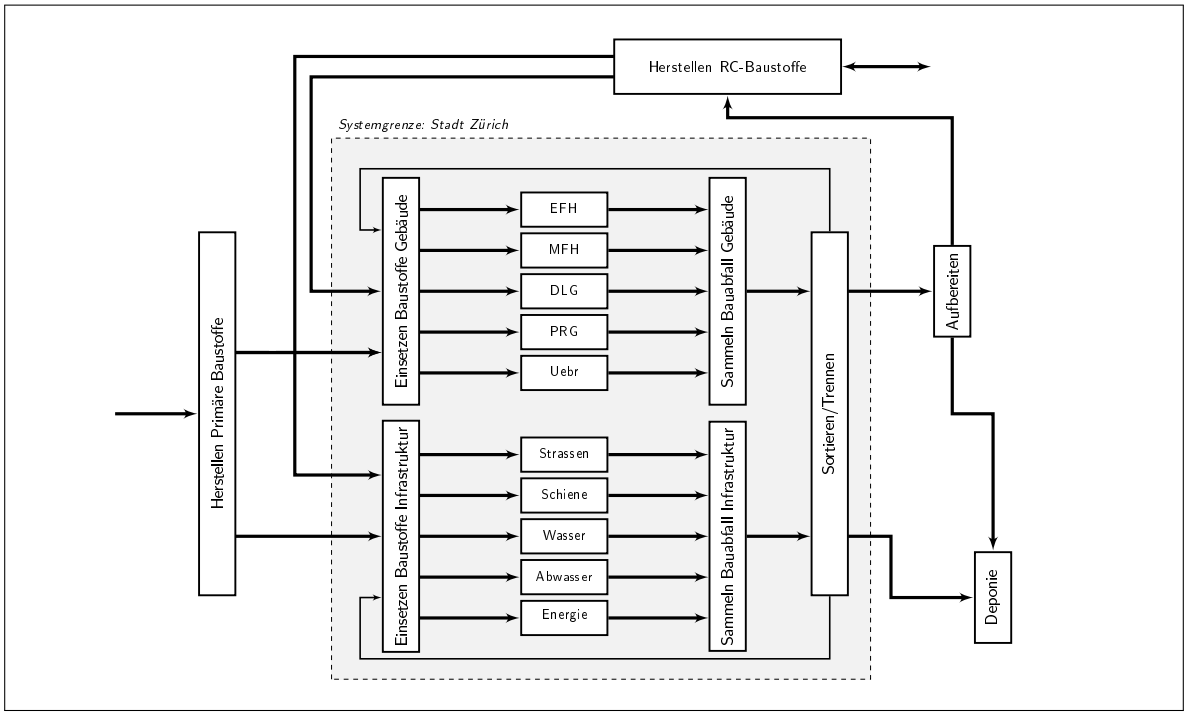
Bereitstellen der Baustoffe Die beiden Prozesse «Bereitstellen Baustoffe» für Gebäude und Infrastuktur dienen der Sammlung aller Baustoffe, die in die Stadt Zürich gelangen. Hier sind die eingesetzten Recyclingbaustoffe mit eingeschlossen.

Gebäude: EFH, MFH, DLG, PRG, Uebr Die Gebäude werden unterteilt, wie dies in der Figur 2-2 gezeigt ist. Die Prozesse umfassen das Erstellen, Benutzen und Rückbauen der Gebäude.

Infrastruktur: Strasse, Schiene, Wasser, Abwasser, Energie Auch die Infrastruktur ist analog der Figur 2-2 aufgeteilt.

Sammeln Bauabfall In den Prozessen «Sammeln Bauabfall» werden die gesamten Bauabfälle aus den Gebäuden und der Infrastruktur gesammelt. Für die Untersuchung relevant sind die mineralischen Bauabfälle. Da sie zum grossen Teil wieder verwendet werden können, werden sie im folgenden *Rückbaumaterial* genannt.

[1] Für den Bau des neuen Letziggrund-Stadions konnte ein grosser Teil des Betons direkt auf der Baustelle aus kiesigem Aushubmaterial hergestellt werden.



Figur 2-3: Das System «Stadt Zürich» wie es für die Untersuchung gewählt wurde. Das Jahr 2005 gilt als Referenzjahr.

Sortieren/Trennen Hier werden die Rückbaumaterialien getrennt: ein Teil gelangt in die Aufbereitung, der Rest wird deponiert.

Deponie In der Stadt Zürich befindet sich keine Deponie für Bauabfälle. Die Deponien, welche Zürcher Bauabfälle annehmen, befinden sich somit alle im Umland und werden pauschal zu einem Prozess zusammengefasst.

Aufbereiten Auch die Aufbereitung der Bauabfälle wird im Umland erbracht. Die Abfälle aus der Aufbereitung werden deponiert, die aufbereiteten Materialien werden zu RC-Produkten verarbeitet.

Herstellen RC-Baustoffe Aus den aufbereiteten Bauabfällen können Recycling-(RC)-Baustoffe hergestellt werden. Dieser Prozess handelt mit dem restlichen Umland, was mit dem Doppelpfeil symbolisiert ist. Über diesen Doppelpfeil wird im Modell die Bilanz der RC-Materialien für die Stadt Zürich ausgeglichen.

2.2 Untersuchte Materialien

Im Sinne des Auftrages beschränkt sich die Untersuchung auf die *mineralischen* Baustoffe. Bei der üblichen Bauweise von Gebäuden hierzulande wird zu einem grossen Teil mit «Stein» gebaut: Beton und Ziegelsteine für die Konstruktion und für Zwischenmauern, Gips und mineralische Putze für die Oberflächen, Kies, Sand und Asphaltbelag für Strassen und Infrastrukturnetze. Diese Materialien machen bis zu 80 % der gesamten Gebäudemasse aus, in den Strassen sind es annähernd 100 % [Lichtensteiger, 2006]. In der Tabelle 2-1 sind die in der Folge beschriebenen Materialien aufgeführt.

Beton Beton ist heutzutage der häufigste und wichtigste Baustoff für die Erstellung von Gebäuden. Beton ist ein Gemisch aus Zement (je nach Anwendung 6–13 %), dem Zuschlagstoff (Kies/Sand aus Primärer- oder Recyclingproduktion), Wasser und allenfalls chemischen Zusatzstoffen, die das Abbindeverhalten beeinflussen. Für Konstruktionsbeton wird zudem eine Armierung aus Stahl eingebracht. Wird Beton sauber abgebrochen, entsteht *Betonabbruch*, der zu Recycling-Beton-Granulat aufbereitet werden kann. Daraus kann *RC-B* (Beton aus Recyclingbetongranulat) hergestellt werden. Der im Beton enthaltene Stahl kann separiert und dem Eisen-Recycling zugeführt werden.

Zu beachten ist der Umstand, dass in den Rückbaufraktionen Mischabbruch und Strassenaufbruch auch Beton enthalten sein kann.

Mauerwerk Unter Mauerwerk werden alle Mauern aus Formsteinen (Ziegelstein, Backstein, Kalk-Sandsteine) oder aus Natursteinen zusammengefasst. Der Mörtel ist dabei ebenfalls eingeschlossen. Bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts wurden viele Gebäude aus Mauerstein errichtet. Daher fallen heute beim Rückbau von Gebäuden grosse Mengen von Mauerwerk an. Diese werden als *Mischabbruch* – der auch Beton enthalten kann – zu *RC-M* (Recycling-Mischabbruch-Granulat) aufbereitet.

Kies, Sand Kies und Sand werden in loser Form im Strassenbau und für die Infrastruktur-Netze eingesetzt. Dort dienen sie als Koffermaterial und zum Auffüllen der Gräben. Kies und Sand fällt beim Rückbau als *Strassenaufbruch* an und kann nach entsprechender Aufbereitung als *RC-Kiessand* in den drei Qualitäten P (rein), A (Asphalt) und B (Beton) wieder eingesetzt werden [BAFU, 2006 b].

Belag, Asphalt Die Strassenbeläge werden heute mit bitumierten Bindenmittel ausgeführt, früher war es meist Asphalt. Die Beläge können als Ausbauasphalt in die Aufbereitung gelangen und anschliessend als *RC-Asphalt* wieder verwendet werden. Das gilt allerdings nur für Belag, der weniger als 5'000 mg PAK/kg im Bindemittel enthält (Polycyclische aromatische Kohlenstoffe). Falls der PAK-Gehalt zwischen 5'000 und 20'000 mg/kg liegt, darf der Ausbauasphalt nur in dafür geeigneten Anlagen oder als sogenanntes «Kaltrecycling» verarbeitet werden. Wenn der Wert 20'000 mg PAK/kg im Bindemittel überschritten wird, muss das Material auf einer Reaktordeponie entsorgt werden [BUWAL, 2004].

Gips, Keramik, Glas Die Fraktionen Gips, Keramik und Glas werden für die Untersuchung zur «mineralische Restfraktion» (in den Figuren kurz «Restfraktion») zusammengefasst. Dies sind Materialien, die einerseits nicht in grossen Mengen verbaut werden und andererseits beim Rückbau der Gebäude als Inertstoffe deponiert werden.

2.3 Materialisierung der Gebäude

Die Basis der Untersuchung ist der Bestand aller Gebäude in der Stadt Zürich auf der Stufe «Einzelobjekt». Diese Daten konnten von *Statistik Stadt Zürich*[2] bezogen werden und zwar jeweils die vollständigen Datensätze der Gebäudebestände und der Abbrüche für die Jahre 1993–2005. Diese Daten beinhalten zu jedem Gebäude Angaben wie Adresse, Nutzung, Geschossfläche, Grundfläche, Baujahr, Umbaujahr, Anzahl Wohnungen, Eigentümerart (wie

[2]Statistik Stadt Zürich, Napfgasse 6, 8022 Zürich

Tabelle 2-1: Die in dieser Arbeit untersuchten mineralischen Baustoffe und deren Verwertung bzw. Aufbereitungsprodukte. Für das Modell wurde angenommen, dass die Baustoffe Gips, Keramik und Glas vollständig deponiert werden. In der Realität gelangt ein gewisser Teil davon in den Mischabbruch, das wurde hier aber nicht berücksichtigt. Betonabbruch kann zu kleineren Teilen auch im Mischabbruch und im Strassenaufbruch enthalten sein. Diese Verteilung ist in der Tabelle 2-3 aufgeführt.

Baustoff	→	**Rückbaustoffe**	→	**Recycling-Produkt**
Beton	→	Betonabbruch	→	RC-B-Granulat
Mauerwerk	→	Mischabbruch	→	RC-M-Granulat
Kies, Sand	→	Strassenaufbruch	→	RC-Kiessand P, A, B
Belag	→	Ausbauasphalt	→	RC-Asphalt
Gips, Keramik, Glas : Inertstoffe, werden i. A. deponiert				

Stadt, Kanton, privat, . . .) und verschiedene weitere; die vollständige Liste der Attribute ist im Anhang aufgeführt (siehe Tabelle A-1).

Für den «Rauminhalt» (Gebäudevolumen), welcher ebenfalls Teil der Gebäudedaten ist, konnte mit der Gebäudeversicherung des Kantons Zürich (GVZ) einen Nutzungsvertrag für die Dauer des Projektes abgeschlossen werden. Das ist erforderlich, weil die Daten in diesem hohen Detaillierungsgrad unter den Datenschutz fallen. Sie müssen nach Abschluss des Berichtes vernichtet werden.

Die Daten des Gebäudebestandes und der Abbrüche wurden für die Berechnungen in einer Datenbank (Access) abgelegt.

Für die Materialisierung der Gebäude wurde auf eine Arbeit von Wüest & Partner zurückgegriffen, welche 1995 den Bestand der Gebäude im Kanton Aargau detailliert untersucht hatten [Kt. Aargau, 1995]. Dort wurde folgendes Prinzip angewandt: Die Typologisierung der Gebäude wurde einerseits nach deren Nutzung und andererseits nach deren Alter vorgenommen. Jedes Gebäude in dieser Matrix hat demnach eine «typische» Bauweise und Materialisierung. Für jede Altersklasse und jeden Nutzungstyp wurde ein spezifischer «typischer» Aufbau des Gebäudes berechnet. Eine weitere Grösse, die für die Berechnung vorhanden sein muss, ist der Anteil des Konstruktionsvolumens am Gesamtvolumen eines Gebäudes. Auch diese Grösse ist – ebenfalls in Abhängigkeit des Alters und der Nutzung – detailliert erhoben worden. Das heisst, wenn das Volumen und der Jahrgang eines Gebäudes sowie dessen Nutzung bekannt ist, kann daraus sein Aufbau – d. h. seine Zusammensetzung und die Menge der Materialien – berechnet werden. Diese Methode wurde später auf die gesamte Schweiz angewandt [BUWAL, 2001].

Die mit dieser Methode berechnete Materialisierung wird für ein einzelnes konkretes Gebäude nicht korrekt sein. Aber für einen Bestand von der Grösse der Stadt Zürich mit mehr als 55'000 Objekten gleichen sich die Abweichungen aus, so dass das Total der Berechnung in der richtigen Grössenordnung zu liegen kommt; das zeigen Vergleiche mit anderen Studien.

Dieses Prinzip der Gebäudematerialiserung wird hier übernommen, die entsprechenden Kategorien von Altersklassen und Nutzungstypen sind in der Tabelle 2-2 aufgeführt. Die **Altersklassen** wurden direkt aus [Kt. Aargau, 1995] übernommen. Da diese Arbeit aus dem Jahr 1995 stammt war allerdings eine Erweiterung für die Jahre 1995–2005 nötig. Diese erfolgte nach Angaben von Wüest & Partner [Wüest & Partner, 2005]. Die **Nutzungskategorien** wurden aus einer detaillierten Liste von über 100 verschiedenen Kategorien auf sechs Klassen aggregiert. Eine Tabelle über die genaue Zuordnung der einzelnen Nutzungstypen auf die

Tabelle 2-2: Die Typologisierung der Gebäude in der Stadt Zürich 2005. Angegeben ist die jeweilige **Anzahl** der Gebäude pro Nutzungskategorie und Altersklasse.

	vor 1900	1901–1945	1946–1960	1961–1975	1976–1995	1996–2005	Total
EFH	444	1'363	4'361	2'855	376	468	**9'867**
MFH	4'071	3'598	6'067	6'521	3'202	1'800	**25'259**
DLG	1'438	726	702	1'530	1'721	776	**6'893**
PRG	537	247	352	567	477	183	**2'363**
Uebr	690	600	1'203	2'591	3'441	2'432	**10'957**
Total	**7'180**	**6'534**	**12'685**	**14'064**	**9'217**	**5'659**	**55'339**

hier benutzten Klassen ist im Anhang aufgeführt (Tabelle A-2).

Einfamilienhäuser (EFH) Einfamilienhäuser sind Gebäude, die nur eine Wohnung enthalten. Reiheneinfamilienhäuser und zusammengebaute Einfamilienhäuser zählen ebenfalls als EFH.

Mehrfamilienhäuser (MFH) Mehrfamilienhäuser umfassen sowohl reine Wohngebäude mit mehr als einer Wohnung sowie Wohnhäuser mit Geschäftsräumen (Wohnfläche > 50 % der Nutzfläche).

Dienstleistungsgebäude (DLG) Unter Dienstleistungsgebäude fallen alle Verwaltungsgebäude der öffentlichen Hand, aber auch alle privaten Bürohäuser.

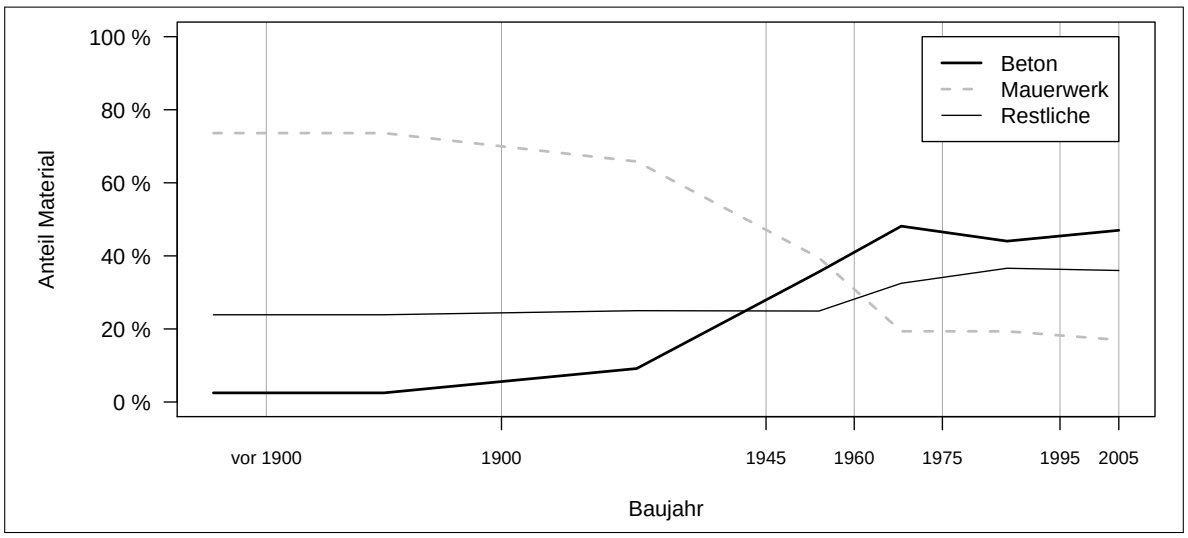
Produktionsgebäude (PRG) Als Produktionsgebäude werden die Industriebauten und Werkstätten zusammengefasst.

Übrige (Uebr) Zu den übrigen Gebäuden zählen etwa Einstellhallen, Parkhäuser, Kirchen, Landwirtschaftsgebäude, Gemeinschaftszentren und Mehrzweckhallen.

Material-Zusammensetzung der Gebäude Aus [Kt. Aargau, 1995] wurden die «typischen» Zusammensetzungen innerhalb der entsprechenden Altersklasse berechnet. Dazu wurde angenommen, dass diese Zusammensetzung *in der Mitte* dieses Intervalls gültig ist. Zwischen den Mitten der Intervalle wurden diese Werte linear interpoliert. Die Figur 2-4 zeigt die Zusammensetzung der Baumaterialien in Prozent am Beispiel der Mehrfamilienhäuser.

Die Zusammensetzungs-Faktoren (ZF) wurden in Excel für jede der fünf Nutzungstypen und für jedes Jahr von 1100–2005 berechnet und anschliessend in einer Tabelle «ZF» in der Datenbank abgelegt. Die Tabelle «ZF» bildet damit eine Grundlage für die weitere Berechnung. Das Jahr 1100 wurde gewählt, weil dies gemäss den Angaben der Statistik das Baujahr des ältesten Gebäudes in der Stadt Zürich ist. Seine Zusammensetzung entspricht der Kategorie «vor 1900».

Als weitere wichtige Grösse muss das Konstruktionsvolumen bekannt sein. In der Studie [Kt. Aargau, 1995] und den darauf aufbauenenden Arbeiten ist dieser das Konstruktionsvolumen als Anteil des gesamten Volumens angegeben. Es liegt zwischen 20–30 % des gesamten Gebäudevolumens. Das heisst, rund ein Viertel des Gebäudevolumens entfällt auf die Konstruktion bzw. das dafür benötigte Material.



Figur 2-4: Materialisierung am Beispiel der Mehrfamilienhäuser in der Stadt Zürich. Zwischen den Mitten der Intervalle (Jahreszahl) wurde linear interpoliert. Die grauen vertikalen Linien zeigen die Intervallgrenzen der Altersklasse. Unter «Restliche» sind hier die mineralische Restfraktion sowie Holz, Metall, Kunststoffe etc. zusammengefasst. *Quelle: [Kt. Aargau, 1995], [Wüest & Partner, 2005]*

Berechnung der Materiallager in den Gebäuden

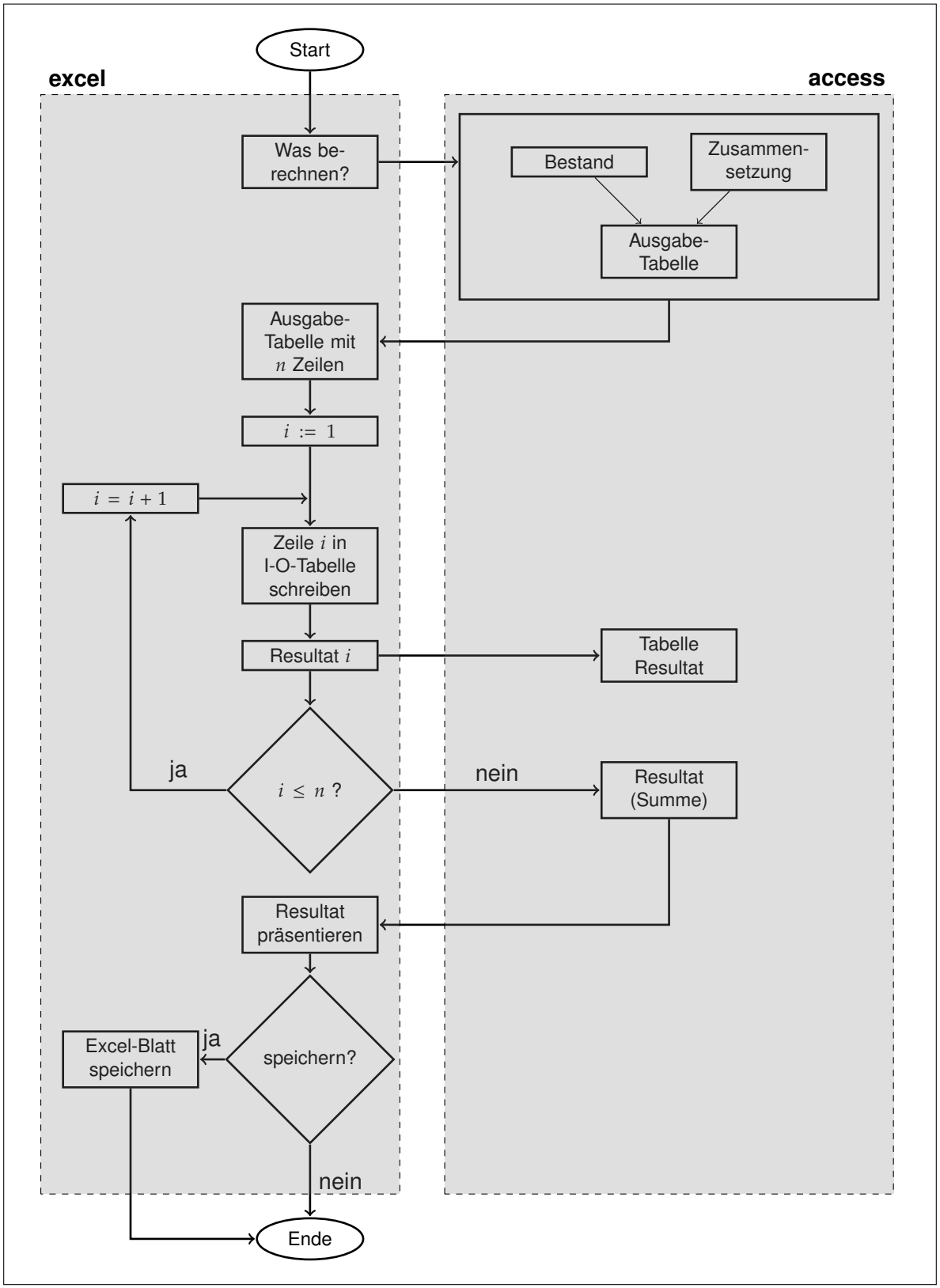
Für die Berechnung der Materialisierung eines einzelnen Gebäudes wird aus der Datenbank sein Jahrgang, sein Nutzungstyp und sein Rauminhalt gelesen. Aufgrund des Nutzungstyps und des Jahrganges wird die entsprechende Zusammensetzung und der Konstruktionsvolumenanteil aus der Tabelle «ZF» gelesen. Alle diese Angaben werden in Form einer Antwort-Tabelle an Excel zurückgegeben. Diese Tabelle wird nun zeilenweise (d. h. objektweise) in Excel abgearbeitet: Mittels einer Input-Output-Tabelle (siehe Abschnitt 2.5) wird die Materialisierung für jedes Gebäude berechnet und das Resultat dieser Berechnung in einer weiteren Tabelle «Resultat» in Access gespeichert. Nachdem das letzte Objekt berechnet wurde, wird die Summe der Resultate in Access abgefragt und in Excel dargestellt. Dieser Ablauf ist in der Figur 2-5 dargestellt.

Aus den Resultaten für die Volumina der Materialien können anschliessend die Massen berechnet werden. Eine Tabelle mit den dazu verwendeten Faktoren ist im Anhang aufgeführt (Tabelle A-16).

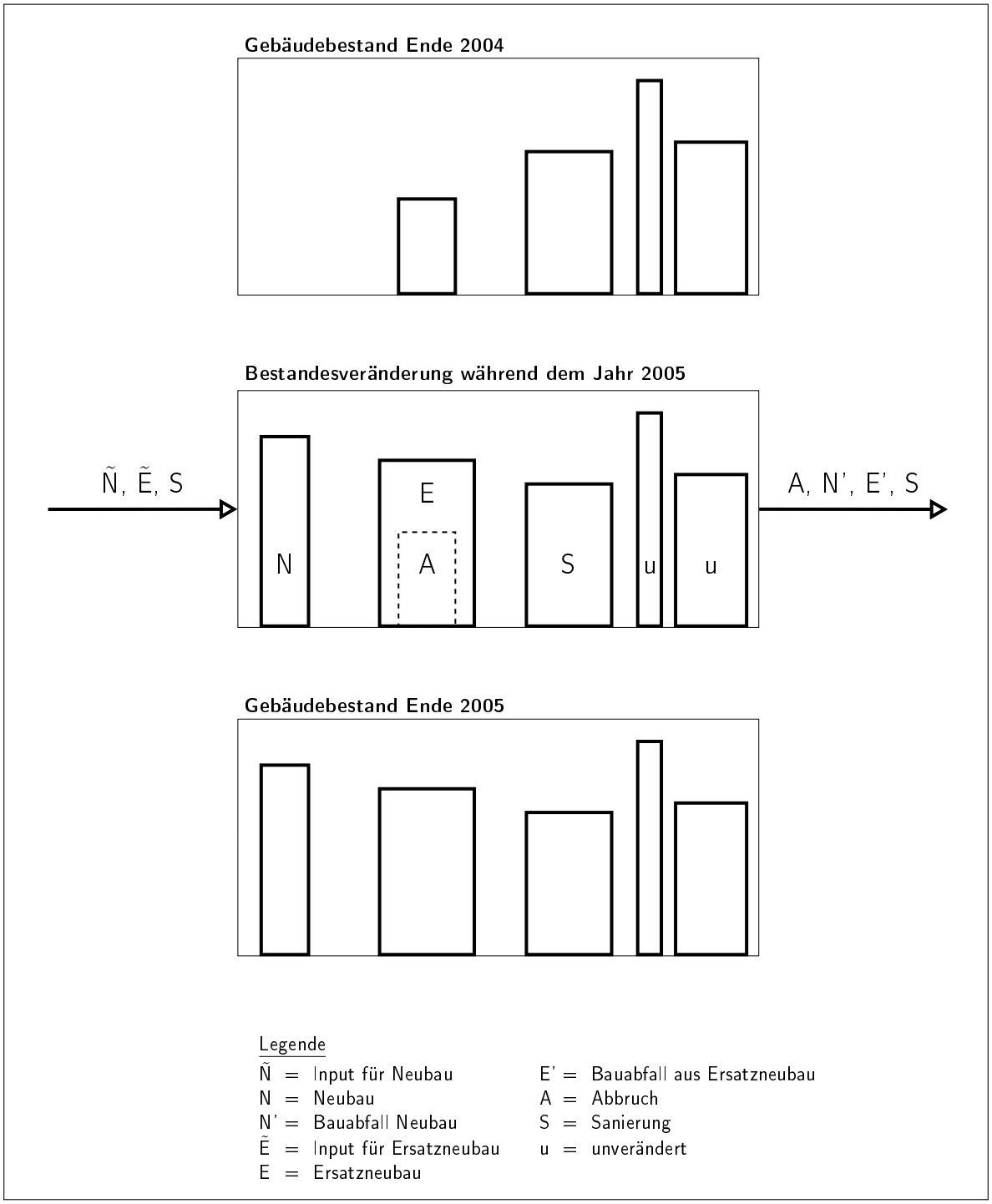
Berechnung der jährlichen Materialflüsse der Gebäude

Die Materialflüsse im Hochbau ergeben sich durch Neubau, Sanierung und Abbruch der Gebäude und ihrer Erschliessung. Diese Flüsse können in Flüsse in das System (Input) und diejenigen aus dem System (Output) aufgeteilt werden.

Die Figur 2-6 zeigt das Prinzip: Ende 2004 gibt die Statistik der Stadt Zürich einen gewissen Bestand von Gebäuden an. Während dem Jahr 2005 sind die Abbrüche, Sanierungen und Neubauten bekannt, ebenso der Bestand am Ende des Jahres 2005. Die Bestandsdifferenz kommt also aus den Neubauten, den Ersatzneubauten und den Abbrüchen zustande; die Sanierungen verändern den Bestand nicht, produzieren aber einen Materialdurchlauf.



Figur 2-5: Diagramm des Ablaufes für die Berechnung der Materialisierung der Gebäude. Nach dem Start kann gewählt werden, was berechnet werden soll, z. B. die Abbrüche des Jahres x, der gesamte Bestand des Jahres x, alle Mehrfamilienhäuser des Jahres x etc.



Figur 2-6: Das Prinzip für die Berechnung der jährlichen Materialflüsse der Gebäude. Die Inputflüsse setzten sich aus dem Material für Neubau, Ersatzneubau und Sanierung zusammen. In den Output fliessen die Bauabfälle aus Neu- und Ersatzneubau, Abbruch und Sanierung.

Als «verlässliche» Angabe für die Modellierung wurde angenommen, dass das Volumen der Gebäude («Rauminhalt») aus der Statistik der Stadt Zürich massgebend ist. Daher wurde die Veränderung des Gebäudebestandes (bzgl. Rauminhalt) als Grundlage für den Zuwachs des Bestandes genommen. Dabei wurden Neubau und Ersatzneubau nicht differenziert un-

tersucht[3], da dies für diese Betrachtung keine Rolle spielt: Die berechnete materielle Zusammensetzung ist in beiden Fällen dieselbe Zusammensetzung des Jahres t. Der Bestand im Jahr $t+1$ berechnet sich somit aus dem Bestand im Jahr t abzüglich des abgebrochenen Volumens im Laufe des Jahres zuzüglich der Neubauten während dieses Jahres:

$$\text{Bestand}(t) - \text{Abbruch} + \text{Neubau} = \text{Bestand}(t+1)$$

$$\Rightarrow \text{Neubau} = \text{Bestand}(t+1) - \text{Bestand}(t) + \text{Abbruch} \quad (1)$$

Das Neubauvolumen wird somit über die Differenz des Bestandesvolumens zuzüglich dem Abbruchvolumen berechnet.

Da die Daten für die Bestandesveränderungen, Abbrüche und Sanierungen starken jährlichen Schwankungen unterliegen, wurde für das Modell der Mittelwert der Jahre 2002–2005 dieser Angaben genommen (vgl. dazu die Figur 3-6). Dadurch werden die statistischen Schwankungen ausgeglichen. Das Modell ist aber so aufgebaut, dass auch ausschliesslich die ausgewiesenen Werte für das Jahr 2005 betrachtet werden können. Die Wahl des Mittelwertes hat Auswirkungen auf die berechnete Materialisierung: Basis für das Referenzjahr 2005 bildet der Gebäudebestand am Ende des Jahres 2004. Wenn nun mit den Mittelwerten die Flüsse für das Jahr 2005 berechnet werden, weicht das Ergebnis der Bilanzierung nach der Formel (1) für den Bestand Ende 2005 leicht von den Daten aus der Statistik ab.

Inputflüsse Die Inputflüsse setzten sich aus den Materialien für Neubau (inkl. Ersatzneubau), Sanierung und den Bauabfällen, welche beim Neubauen anfallen (3 % des Neubaumaterials) zusammen.

Für die **Neubauten** wird die Materialzusammensetzung analog der Berechnung für den Bestand durchgeführt (siehe Abschnitt 2.3). Als Neubauvolumen werden nun aber nicht einzelne Gebäude eingesetzt, sondern das gesamte Volumen für die Neubauten eines Jahres wie es in der Gleichung (1) aufgeführt ist. Die Zusammensetzung der Baumaterialien entspricht dabei der Zusammensetzung entsprechenden Jahres.

Als **Sanierung** wird ein «grösserer Eingriff» in die Gebäudestruktur definiert: Eine Sanierung ist demnach ein Umbau, der über den reinen Werterhalt des Gebäudes hinausgeht. Im Allgemeinen braucht es für einen solchen Eingriff eine Baubewilligung und damit auch eine energetische Optimierung des Gebäudes.

Für die Bestimmung des Sanierungs-Volumens wurden zwei verschiedene Methoden untersucht:

a) Für jedes Material gibt es eine mittlere Lebensdauer im Gebäude. Dieser Wert gibt damit Auskunft darüber, welche Materialien nach welcher Zeit als Abfall anfallen bzw. bei einer Sanierung ersetzt werden [BWO, 2006], [Kt. Aargau, 1995]. So wird zum Beispiel 1 % des Daches (jährlich) ersetzt, von der Holzkonstruktion hingegen nur 0.2 %. Diese Berechnung wird daher bezüglich dem gesamten Bestand durchgeführt. Die benutzten Werte sind im Anhang in der Tabelle A-7 aufgeführt.

[3] Im Allgemeinen ist das Gebäudevolumen eines Ersatzneubaus grösser als das Volumen seines «Vorgänger-Gebäudes»

b) Ein anderer Ansatz geht von den Angaben zum «Umbaujahr» aus, die in der Statistik aufgeführt sind: Ein Umbau wird statistisch erfasst, wenn er gross genug ist (d. h. wenn eine Baubewilligung vorliegt oder das Umbauvolumen wertmässig relevant ist). Für ein Gebäude das im aktuellen Jahr umgebaut wurde, kann pauschal eine sogenannte *Eingriffstiefe* angenommen werden. Die Eingriffstiefe bestimmt, wie viel Material im Verhältnis zum totalen Material des Gebäudes ersetzt wird. Dabei wird nicht nach den verschiedenen Baustoffen unterschieden. Für das Modell wurde aus Arbeiten von S. Rubli der mittlere Wert von 10 % berechnet und als Eingriffstiefe eingesetzt [Rubli, 2004], [Rubli, 2006]. Dieser Wert korrespondiert gut mit Angaben aus [Wallbaum, 2007]. In dieser Arbeit wurde die Grösse «Total Material Requirement (TMR)» für verschiedene Wohngebäude in Deutschland über ihre gesamte Lebensdauer bestimmt. Während der untersuchten Dauer von 80 Jahren kamen die Autoren für den TMR der Erneuerung auf einen Wert, der 20 % des Gesamt-TMRs für Erstellung und Erneuerung ausmacht. Wenn davon ausgegangen wird, dass eine Sanierung alle 30–40 Jahre durchgeführt wird, dann entspricht das 10 % «Eingriffstiefe» pro Sanierung. Siehe dazu auch die Tabellen 2-6 und 2-5.

Bei der Sanierung wird angenommen, dass das ausgebaute Materialvolumen in gleicher Art wieder eingebaut wird. Das heisst konkret, dass im Modell die Input- und Outputflüsse aus der Sanierung identisch sind. Diese Annahme wurde getroffen, da es nicht möglich ist, genaue Angaben zu Sanierungen zu erhalten.

Outputflüsse Die Outputflüsse setzten sich zusammen aus den Materialien aus Abbruch, Sanierung und dem Bauabfall aus Neubau. Das Gebäudevolumen und der Aufbau der abgebrochenen Gebäude ist aus den Daten zu den Abbrüchen bekannt. Dort sind alle Gebäude aufgeführt, die in der Stadt in einem bestimmten Jahr abgebrochen wurden («Abbruchjahr»). Die weiteren Angaben zu diesen Gebäuden entsprechen denjenigen des Bestandes. Es ist somit möglich, eine Tabelle der im Jahr x abgebrochenen Gebäude mit ihrer jeweiligen Materialisierung in der Datenbank abzufragen und diese analog der Berechnung des Bestandes auszuwerten. Das ergibt eine modellierte Zusammensetzung und Mengen der Abbruchmaterialien (Rückbaustoffe). Die Outputflüsse aus der Sanierung sind dieselben wie die Inputflüsse (s. oben). Die Bauabfälle vom Bau der Neubauten entsprechen ca. 3 % der Massen der Neubau-Materialien. Dieser Wert wurde aus [BUWAL, 2001] berechnet.

Flüsse in Aufbereitung und Deponie Die Materialien, welche bei einem Rückbau anfallen, werden gemäss der Tabelle 2-1 zu Rückbaumaterialien. Da Beton sowohl als Betonabbruch als auch als Bestandteil von Mischabbruch oder Strassenaufbruch anfällt, mussten bezüglich der Verteilung von Beton auf diese drei Materialkategorien Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen sind mit der entsprechenden Begründung in der Tabelle 2-3 aufgeführt.

Von den Rückbaustoffen werden – auf Grund der Erfahrung von S. Rubli – nicht alle Fraktionen zu gleichen Teilen aufbereitet bzw. deponiert. Daher mussten dazu Annahmen getroffen werden. Aus den Projekten welche in den Tabellen 2-6 und 2-5 vorgestellt sind liess sich eine Verwertungsrate von 20–90 % ermitteln. Da diese Rate offenbar stark streut, wurden für das Modell die in der Tabelle 2-4 gezeigten Werte eingesetzt. Von den mineralischen Rückbaustoffen aus der Sanierung wird ein grösserer Teil deponiert, als aus Rückbau von Gebäuden und dem Unterhalt der Infrastruktur.

Bei der Aufbereitung der mineralischen Rückbaustoffe entsteht die sogenannte Feinfraktion (Korndurchmesser $< 5\,\text{mm}$), die z. T. deponiert wird. Der Anteil der Rückbaustoffe, der

Tabelle 2-3: Annahmen zu der Zusammensetzung der mineralischen Rückbaustoffe

Annahme	Begründung
50 % des Betons aus der Sanierung geht in den Mischabbruch.	Bei Sanierungen können die Materialien oft nicht ideal getrennt werden. Häufig sind auch die Mengen zu klein, um sauber zu trennen.
20 % des Betons aus dem Rückbau geht in den Mischabbruch.	Bei Rückbauten lohnt es sich, die Materialien sauber zu trennen, da diese in grossen Mengen anfallen und für deren Entsorgung verschiedene Preise bezahlt werden müssen.
50 % des Mischabbruches aus der Infrastruktur (Tiefbau) ist Beton.	Konstruktionsbeton und Mauerwerk wird im Tiefbau vorallem bei den Kunstbauten eingesetzt. Daher werden diese Materialien bei den Unterhaltsarbeiten nicht immer sauber getrennt; die Mengen von Mischabbruch aus dem Tiefbau sind im Vergleich zu denjenigen aus dem Hochbau gering.
50 % des Betons der Infrastruktur ist Magerbeton.	Er gelangt beim Erneuern mit dem Kies, Sand als Strassenaufbruch B in die Aufbereitung (Strassenaufbruch B kann bis zu 20 % Beton enthalten). Die Mengen von Magerbeton entsprechen ca. 13 % der Kies/Sand-Fraktion.

Tabelle 2-4: Annahmen über den Anteil der mineralischen Rückbaustoffe, der deponiert wird. *Quelle: Eigene Abschätzungen*

Anteil in Deponie aus ...	**Sanierung**	**Rückbau**	**Infrastruktur**
Betonabbruch	30 %	5 %	5 %
Mischabbruch	50 %	15 %	15 %
Strassenaufbruch	30 %	5 %	5 %
Ausbauasphalt	30 %	5 %	5 %
Min. Restfraktion	100 %	100 %	100 %

deponiert wird, wurde auf 5 % geschätzt und für alle mineralischen Rückbaustoffe pauschal eingesetzt.

In der Studie wurde die «direkte Verwertung auf der Baustelle» nicht berücksichtigt. Das geschah aus folgenden Gründen: Bei den Gebäuden ist die direkte Verwertung von Rückbaumaterialien sehr selten, da diese i. A. nicht auf derselben Baustelle wieder verwendet werden können. Im Tiefbau – vor allem in ländlichen Gebieten – ist es bei grösseren Bauvorhaben üblich, den Strassenaufbruch in der Nähe der Baustelle zwischenzulagern und dann an Ort wieder einzubauen. Diese Praxis wird in der Stadt Zürich nach Auskunft von Herrn Bürgi (TAZ) nur ausnahmsweise durchgeführt, da die Platzverhältnisse in der Stadt sehr beschränkt sind. Diese Flüsse wurden daher im Modell sowohl für die Gebäude wie auch für die Infrastruktur auf Null gesetzt.

2.4 Validieren der Gebäudematerialisierung

Die Daten, welche in [Kt. Aargau, 1995] erhoben wurden, stammen aus dem Kanton Aargau. Es war somit nicht von Anfang an klar, ob diese Daten für die Stadt Zürich direkt übernommen werden können. Allerdings unterscheidet sich die generelle Bauweise im Kanton Aargau

nicht grundsätzlich von derjenigen in der Stadt Zürich. Die Zusammensetzung der Gebäudebestände dürfte aber schon differieren. Diesem Aspekt wird mit der Typologisierung nach dem Baujahr und der Nutzung Rechnung getragen: Sie ermöglicht es, die jeweils «typische» Materialisierung auf andere (von der bauweise her) ähnliche Bestände zu übertragen.

Für die Validierung wurde das Modell einerseits stichprobenartig mit realen Daten aus Baubegleitungen verglichen und andererseits der Bestand der Stadt Zürich mit der ARK-Methode zur Materialisierung eines Gebäudebestandes berechnet.

Stichproben Für Daten von durchgeführten Um- und Rückbauprojekten konnte auf verschiedene Materialflussanalysen zurückgegriffen werden, welche in den letzten Jahren in der Stadt Zürich bei Um- und Rückbauten durchgeführt wurden: Es waren Controlling-Projekte bei grösseren Bauvorhaben, bei denen es darum ging, die Materialflüsse zu bestimmen, welche im Zusammenhang mit den Eingriffen in die Bausubstanz anfielen [Rubli, 2004], [Rubli, 2006] und interne Berichte. Für alle in den Tabellen 2-6 und 2-5 aufgeführten Projekte gilt, dass die abgeführten Materialmengen in zuvor nicht bekannter Genauigkeit erfasst wurden. Diese Angaben können damit mit einer berechneten Materialisierung auf Grund von Plänen und/oder einem Ausmass am bestehenden Objekt gleichgestellt werden.

Für die Validierung wurden diese Gebäude mit dem Modell materialisiert und die berechneten Modell-Ergebnisse mit den «realen» Daten verglichen. In der Tabelle 2-6 sind zwei Rückbauprojekte (Siedlung Bernerstrasse, Siedlung Brunnenhof) und das Ersatzneubauprojekt Werdwies aufgeführt. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, stimmen die Modellergebnisse in der Grössenordnung recht gut mit den real erhaltenen Mengen überein. Die Abweichung des Modells zu den realen Daten liegt zwischen 1–19 %. Offenbar unterschätzt das Modell für diese drei Projekte das Materialvolumen tendenziell, allerdings innerhalb von ± 20 %. Die Volumen-Angaben für das Neubauprojekt Werdwies wurden uns von D. Andrianello vom Architekturbüro Bosshard & Partner in Zürich freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Aus den drei Umbauprojekten, welche in der Tabelle 2-5 dargestellt sind, kann zusätzlich die *Eingriffstiefe* bestimmt werden: Sie gibt an, wieviel des berechneten Materiales bei einer Sanierung ersetzt wird. Für die Berechnung der Materialflüsse aus Sanierungen wurde der Wert von 10 % für die Eingriffstiefe übernommen. Dies mit der Begündung, dass die in den Controlling-Projekten erhobene maximale Eingriffstiefe von 21 % in den wenigsten Fällen erreicht wird. Da ein grosser Teil der Sanierungen ohne grosse Eingriffe in die bestehende Bausubstanz durchgeführt wird, scheint der Wert von 10 % für die Eingriffstiefe einem «Mittelwert» zu entsprechen. Für das Modell wurden daher 10 % eingesetzt.

Tabelle 2-5: Begleitete Umbauprojekte. Als **Eingriffstiefe** wird die Masse der Bauabfälle im Verhältnis zur totalen Gebäudemasse verstanden. *Quelle: [Rubli, 2004], [Rubli, 2006]*

	Gebäude-volumen m^3	**Bau-jahr**	**Umbau-jahr**	**Gebäude--masse*** Tonnen	**Bauabfälle Total** Tonnen	**Eingriffs-tiefe** %	**Abfall pro m^3** t/m^3
VZ Werd	63'300	1977	2003	28'084	3'658	13%	0.058
Triemli	31'200	1973	2004	13'930	2'912	21%	0.093
Parkring	19'800	1963	2005	7'244	1'072	15%	0.054

* *Totale Masse der Baumaterialien, Resultat aus eigener Berechnung*

Tabelle 2-6: Vergleich des Modelles mit bekannten Projekten. *Quelle: [Rubli, 2006], D. Andrianello*[*]

Rückbau Siedlung Bernerstrasse	Modell m^3	Daten aus [Rubli, 2006] m^3	Abweichung des Modelles %
Beton	5'683	5'801	-2 %
Mauerwerk	4'577	9'662	-53 %
Restfraktion	1'530	804	90 %
Kies, Sand, Belag	1'642	368	346 %
Total	**13'432**	**16'635**	-19 %
Total Konstr. Volumen	14'174	17'603	-19 %
Anteil Konstr. Vol.	24 %	30 %	
Rauminhalt	59'450		
Baujahr	1959		
Abbbruchjahr	2004		

Rückbau Siedlung Brunnenhof	Modell m^3	Daten von S. Rubli m^3	Abweichung des Modelles %
Beton	750	1'555	-52 %
Mauerwerk	2'767	2'268	22 %
Mineralisch	425	143	198 %
Total	**3'942**	**3'966**	-1 %
Total Konstr. Volumen	4'688	5'230	-10 %
Anteil Konstr. Vol.	25 %	27 %	
Rauminhalt	19'110		
Baujahr	1931		
Abbruchjahr	2005		

Neubau Siedlung Werdwies	Modell m^3	Daten von D. Andrianello m^3	Abweichung des Modelles %
Beton	10'773	15'227	-29 %
Mauerwerk	4'734	2'105	125 %
Total	**15'507**	**17'332**	-11 %
Rauminhalt	94'529		
Baujahr	2006		

[*] *Architekturbüro Bosshard & Partner, Zürich*

Tabelle 2-7: Vergleich der Gebäudebestände des eigenen Modelles mit den Werten berechnet nach dem ARK-Projekt (Erklärung im Text). Die beiden Modelle stimmen gut überein.
Quelle: [Lichtensteiger, 2006], eigene Berechnung

	Eigenes Modell	**ARK-Modell**	**Differenz**
	A	B	A−B
	Tonnen	Tonnen	%
Total (= 100 %)	64'557'800	64'211'600	-0.5 %
Zusammensetzung Material	%	%	%
Beton und Mauerwerk			
Beton	50.4 %	52.8 %	2.4 %
Mauerwerk	30.4 %	27.1 %	-3.3 %
Total	**80.9 %**	**80.0 %**	**-0.9 %**
Restliche Materialien			
Restfraktion	7.6 %	14.5 %	6.9 %
Brennbar	0.5 %	0.7 %	0.1 %
Holz	1.8 %	0.9 %	-0.9 %
Metall	1.7 %	1.1 %	-0.6 %
Rest	7.4 %	2.8 %	-4.6 %
Total	**19.1 %**	**20.0 %**	**0.9 %**
Beton und Mauerwerk	81.9 %	80.0 %	-0.9 %
Restliche Materialien	19.1 %	20.0 %	0.9 %
Total	**100.0 %**	**100.0 %**	0.0 %

ARK-Projekt Das ARK-Projekt ist eine an der Eawag entwickelte Methode zur Abschätzung der in den Gebäuden gelagerten Materialien [Lichtensteiger, 2006]. Das Vorgehen dort entspricht im Prinzip der Methode von [Kt. Aargau, 1995], hat aber eine andere Datengrundlage. Die Typologisierung der Altersgruppen erfolgt gleichabständig in 25-Jahres-Schritten, die Nutzung wird nach Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Dienstleistungsgebäude und Produktionsgebäude unterschieden. Die Kategorie «Übrige» fehlt, Kirchen und Parkhäuser sind dort unter den DLG aggregiert, Bauernhöfe bei den PRG. Der Aufbau für die Materialsierung erfolgt über «typische Musterhäuser», die virtuell in verschiedener Bauweise zusammengesetzt werden.

Aus [Lichtensteiger, 2006] konnten für das Modell «Zusammensetzungsfaktoren» gebildet werden, analog denjenigen aus [Kt. Aargau, 1995]. Damit wurde es möglich, den gesamten Gebäudebestand der Stadt Zürich nach der ARK-Methode zu berechnen (Tabelle 2-7). Die Abweichung der Resultate des Modelles zu denjenigen nach dem ARK-Modell beträgt für das Total der Materialien weniger als 1 %.

Insgesamt kann aus den Vergleichen mit den Projekten von S. Rubli und dem ARK-Modell mit den Werten des Modells geschlossen werden, dass das Modell die Materialisierung des Gebäudebestandes in der richtigen Grössenordnung berechnet.

2.5 Exkurs: Input-Output-Modell (I-O-Tabelle)

Mit einer Input-Output-Analyse (I-O-Analyse) kann ein System von Wirtschaftsbetrieben unter dem Aspekt der Material- bzw. Geldflüsse untersucht werden. Dazu muss eine Systemgrenze um das Objekt des Interesses gezogen werden, anschliessend kann der Input in und der Output aus dem System analysiert werden. Gleichzeitig interessiert aber auch, wie die Flüsse *innerhalb* des Systems verlaufen, d. h. wie die einzelnen Teilnehmer im System miteinander verflochten sind.

Bei einem (statischen) Input-Output-Modell geht man davon aus, dass die Verflechtung der Branchen innerhalb des Systems im Laufe der Zeit konstant ist. Wenn in der Modellierung der Input in das System verändert wird, verändern sich die Flüsse innerhalb des Systems entsprechend der Verflechtung der Branchen und damit auch der gesamte Output aus dem System. Umgekehrt kann aber auch der Output modelliert werden. Dann folgt aus dem Modell der dazu benötigte Input, um diesen neuen Output zu erhalten.

Ein I-O-Modell eignet sich daher, um bei gegebenem Output – in unserem Fall die gebauten Gebäude – den dazu benötigten Input zu berechnen. Dieser Input kann in die einzelnen Materialien aufgeschlüsselt werden.

Im folgenden werden die Grundsätze dieser Methode ausgeführt. Sie geht auf den Ökonomen W. Leontief zurück, der dafür 1973 den Nobelpreis erhielt.

Tabelle 2-8: Input-Output-Analyse: Ein einfaches Beispiel mit frei gewählten Zahlenwerten: Die Holzflüsse in m^3, welche aus dem Wald via Sägerei und Zimmerei in den Hausbau und die Energie fliessen.

	Sägerei	Zimmerei	VL_L	Energie	Haus	GA
Sägerei	-	90	90	10	-	100
Zimmerei	-	-	-	10	90	100
VL_B	-	90				
Input aus dem Wald (PA)	90	-				
Import	10	10				
GA	100	100				

VL_B	Vorleistungsbezüge	PA	Primäraufwand
VL_L	Vorleistungslieferungen	GA	Gesamtaufkommen

Materialflüsse Für die I-O-Analyse stellt man das System der Materialflüsse als Input-Output-Tabelle (I-O-Tabelle) dar, wie dies in der Tabelle 2-8 gezeigt ist. Das einfache Beispiel zeigt die zwei Branchen *Sägerei* und *Zimmerei* und deren Holzflüsse in m^3 (die Zahlen sind frei gewählt). Das Holz kommt als Rundholz aus dem Wald in die Sägerei (Input), anschliessend gelangen Bretter und Balken zur Zimmerei, welche daraus einen Dachstock herstellt. Den liefert sie auf die Baustelle für den Bau eines Hauses (Haus). Die Abfälle der Sägerei und Zimmerei werden als Brennholz an ein Energieunternehmen verkauft.

In der ersten Zeile der Tabelle 2-8 sind die so genannten Vorleistungsbezüger aufgeführt, in der ersten Spalte die Vorleistungslieferer. Vorleistungen heissen sie, weil deren Flüsse innerhalb des Systems fliessen und als Vorleistung zur Herstellung eines Endproduktes

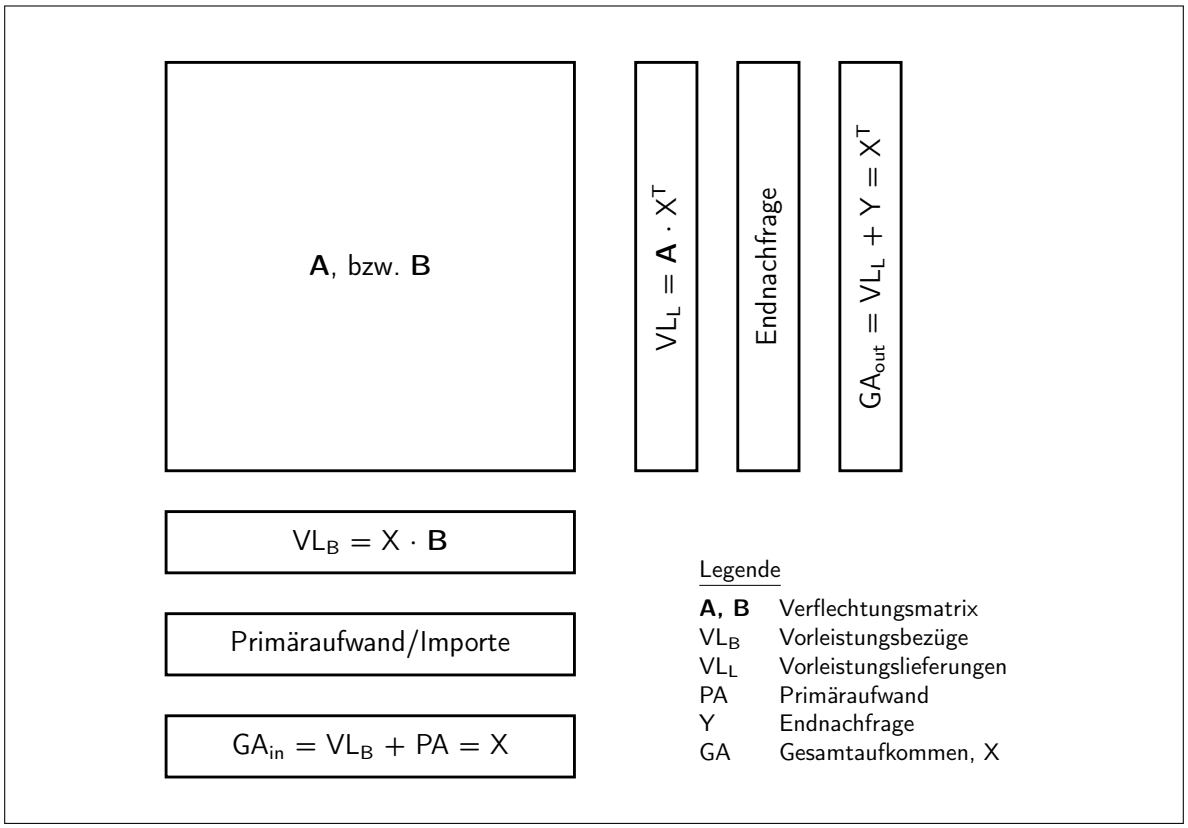
interpretiert werden. Da Vorleistungslieferer und -bezüger dieselben Branchen sind, entsteht eine quadratische Matrix der *Vorleistungsverflechtungen*.

Die Summe der Vorleistungsbezüge ist in der Zeile VL_B zusammengefasst. Sie zeigt, wieviel Holz diese Branche aus den anderen Branchen bezieht. Unterhalb der Vorleistungen ist der Input in das System eingetragen, und zwar als so genannter Primäraufwand (PA) aus dem Inland sowie als Importe. Darunter steht das Gesamtaufkommen als Spaltensumme.

Die Vorleistungslieferungen sind in der Spalte VL_L zusammengezählt. Dieser Wert gibt an, wieviel eine Branche innerhalb des Systems liefert. Rechts der Vorleistungen sind die Endnachfrage und das Gesamtaufkommen aufgeführt. Die Endnachfrage zeigt, welche Endverbraucher (hier *Energie* und *Haus*) wieviel Holz aus jeder Branche beziehen, das entspricht dem Output aus dem System. Das Gesamtaufkommen (GA) ist die Zeilensumme.

Unter der Annahme, dass während der beobachteten Zeit innerhalb des Systems keine Lagerveränderung erfolgt, muss die Spaltensumme gleich der Zeilensumme sein: Alles, was in die einzelne Branche hineingeht, geht auch wieder hinaus. Aber auch für das Gesamtsystem muss das gelten, die Summe von Primäraufwand und Importen muss gleich der Endnachfrage sein.

Die I-O-Tabelle wird nun folgendermassen gelesen: Spaltenweise sind die Materialbezüge der Branche eingetragen: Die Sägerei (in der zweiten Spalte) bezieht 90 aus dem Wald und 10 aus Importen. Umgekehrt liefert sie (in der zweiten Zeile) 90 an die Zimmerei und 10 an die Energie. Die Zeilen zeigen also, an wen die jeweilige Branche die hergestellten Produkte liefert.



Figur 2-7: Das Schema für das I-O-Modell, bzw. O-I-Modell

Matrizen für das I-O-Modell Die Tabellen der I-O-Analysen können für die Modellierung zu Matrizen umgeformt werden. Dazu werden aus der Vorleistungsverflechtung Verteilungskoeffizienten gebildet: Der jeweilige Materilabezug i (Zeile) einer Branche j (Spalte) wird als Anteil bezüglich des Gesamtaufkommens dieser Branche j ausgedrückt. Wenn das Gesamtaufkommen mit X und die Einträge in der I-O-Tabelle mit x_{ij} bezeichnet werden, dann berechnen sich die Koeffizienten a_{ij} der Matrix **A** wie folgt:

$$\mathbf{A} = a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j}$$

Das heisst, die einzelnen Einträge x_i einer Spalte *j* werden durch die jeweilige Spaltensumme X_j dividiert. Das entspricht dem «Verteilen» der Vorleistungsbezüge innerhalb der jeweilige Spalte und kann folgendermassen interpretiert werden: Wieviel Vorleistungen muss die Branche j beziehen, um ihren gegebenen Output zu produzieren? Damit wird ein Modell entwickelt, wo der Output den Input bestimmt (ein *Output-Input*-Modell). Die Koeffizienten a_{ij} heissen daher auch Inputkoeffizienten und werden zu der *Verflechtungsmatrix* **A** zusammengefasst. Dieses Modell kann für die Nachfragesimulation benutzt werden: Wieviel Holz muss aus dem Wald und aus den Importen in das System fliessen, um eine gegebene Nachfrage Y aus dem Bauwesen zu befriedigen?

Umgekehrt können die Einträge x_{ij} auch bezüglich einer Zeile *i* betrachtet und dann zeilenweise durch das Gesamtaufkommen der Branche i dividiert, bzw. *verteilt* werden:

$$\mathbf{B} = b_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_i}$$

In diesem Fall sind die Einträge der Matrix **B** als Outputkoeffizienten zu verstehen: Wie verteilen sich die Vorleistungslieferungen bei einem gegebenen Gesamtaufkommen? Das entspricht dann einem *Input-Output*-Modell, in dem der Input den Output bestimmt.

Die Verflechtungsmatrix **A** bzw. **B** gibt also an, wie sich die internen Materialflüsse verteilen. Sie kann auch als «interner Verbrauch» interpretiert werden.

W. Leontief schreibt zu der Berechnung der Outputkoeffizienten a_{ij}: «In any case, the input coefficients (...) must be interpreted as ratios of two quantities measured in physical units.» [Leontief, 1986, S. 23]. Die Werte der Matrizen **A** und **B** beziehen sich daher i. A. auf Materialflüsse und nicht auf Geldflüsse.

In der Figur 2-7 ist das Schema für die zwei verschiedenen Modelle dargestellt. Der Input (Primäraufwand/Importe) und die Endnachfrage (Output) werden für die Modellierung als Zeilen bzw. Spaltenvektor geschrieben, ebenso die Vorleistungen und das Gesamtaufkommen.

Mathematisch lässt sich das Gesamtaufkommen X bzw. X^T im O-I-Modell wie folgt berechnen und umformen, wobei PA für den Input in das System und Y für den Output stehen, I bezeichnet die Einheitsmatrix:

$$
\begin{aligned}
X^T &= \underbrace{\mathbf{A} \cdot X^T}_{=VL_L} + Y \\
X^T - \mathbf{A} \cdot X^T &= Y \\
(\mathbf{I} - \mathbf{A}) \cdot X^T &= Y \\
X^T &= (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot Y
\end{aligned}
$$

Aus einer gegebenen Nachfrage Y kann mit der Verflechtungsmatrix A das Gesamtaufkommen und damit die jeweilige Zeilen oder Spaltensumme berechnet werden.

Vorteil des I-O-Modelles Das I-O-Modell bietet für die (dynamische) Modellierung Vorteile bei der Berechnung von Materialien. Wenn das Volumen eines Gebäudes, der Konstruktionsvolumenanteil und die prozentuale Verteilung der Materialien bekannt sind, dann braucht es grundsätzlich kein O-I-Modell, um die Materialisierung eines Gebäudes zu berechnen. Aber mit einem O-I-Modell kann mit wenig zusätzlichem Aufwand viele weitere Information gewonnen werden: so z. B. die Zusammensetzung der einzelnen Produkte (Zerlegung von Beton in Zement, Armierung und Kies/Sand), oder die Zusammensetzung von Kies/Sand aus Primärem- und Recyclingmaterial. Solche Resultate werden im Hinblick auf die dynamische Modellierung wichtig, welche als Folgeprojekt geplant ist; hier wurde diesbezüglich bereits Vorarbeit geleistet.

2.6 Materialisierung der Infrastruktur

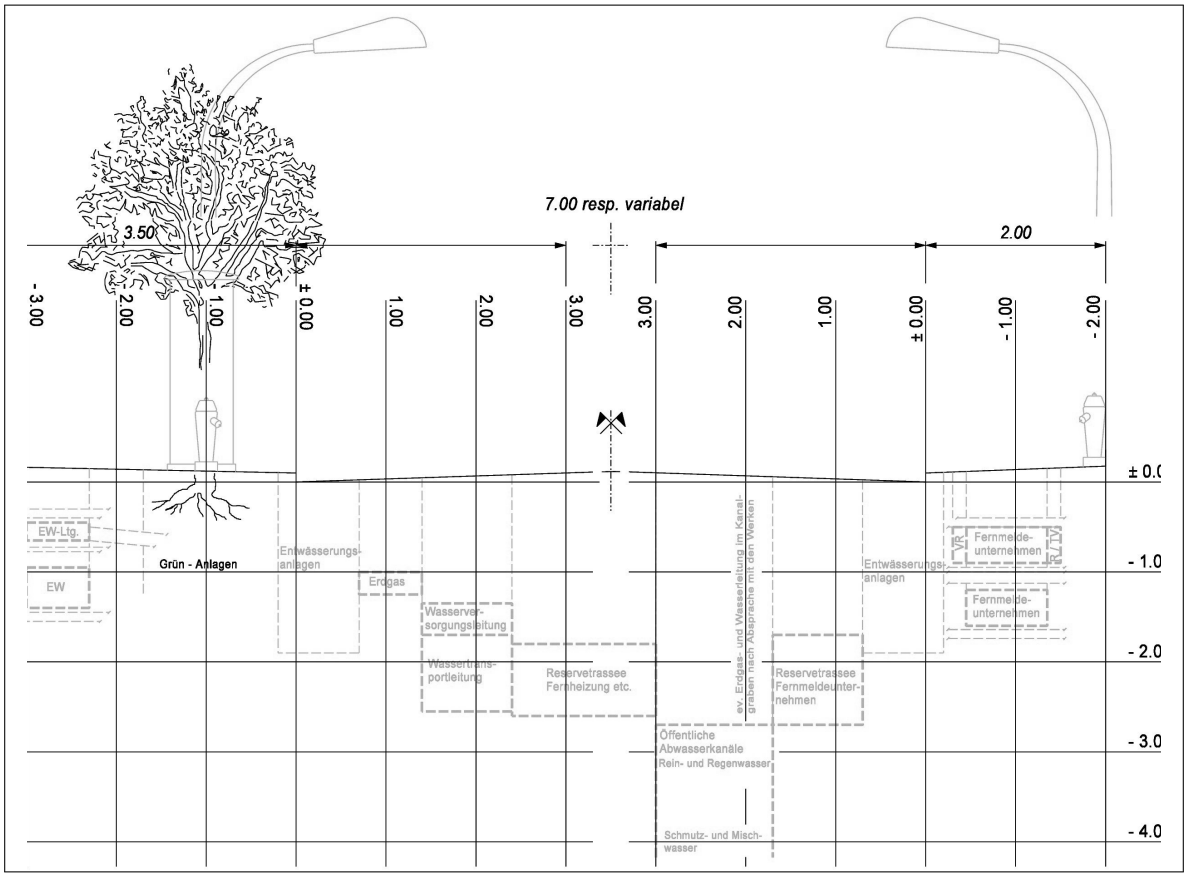
Die Infrastrukturnetze in der Stadt Zürich wurden in verschiedene Nutzungskategorien aufgeteilt: **Verkehr** (Strasse, Schiene), **Wasser** (Trinkwasser, Abwasser) und **Energie** (Gas, Fernwärme, Strom). Die Kommunikationsnetze (Telefon, Daten, Radio/TV) wurden der Einfachheit halber zu der Energie genommen.

Die Figur 2-8 zeigt den typischen Aufbau eines Strassenkörpers mit den Installationen der Infrastrukturnetze unter und neben der Strasse [TED, 2005]. Das Modell verwendet für jede Nutzugskategorie der Ver- und Entsorgungsnetze eine spezifische Tiefe unter der Strasse, eine typische Breite (z. T. in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers/Kanales) und damit einen typischen Graben-Querschnitt. Dieser Querschnitt kann mit der Länge des Netzes multipliziert werden und aus dem erhaltenenen Volumen können die entsprechenden Materialien berechnet werden. Der Aufbau der Strassen wurde aus [TBA, 2005] übernommen. In der Tabelle 2-10 sind die Quellen der Daten zu den einzelnen Bereichen aufgeführt.

Verkehr

Das Verkehrsnetz in der Stadt Zürich umfasst folgende Teilnetze (zu den Verkehrslastklassen T1-T6 siehe Tabelle 2-9):

Strassen Unter Strassen wird für diese Untersuchung die Gemeinde- und Kantonsstrassen auf dem Areal der Stadt Zürich verstanden. Diese Strassen weisen Verkehrslastklassen T1-T4 auf. Die privaten Strassen wurden bereits bei den Gebäuden berücksichtig und werden hier nicht mehr dazugezählt.



Figur 2-8: Der Normaufbau eines Strassenkörpers aus [TED, 2005].

Befestigte Wege Die befestigten Wege umfassen die Rad- und Fusswege, welche mit einem gebundenen Belag befestigt sind.

Unbefestigte Wege Zahlen zu den unbefestigten Fusswegen liessen sich nur wenige finden; für diese Arbeit zählen die Wege von «Grün Stadt Zürich» dazu. Nicht betrachtet wurden die Waldwege.

Parkplätze Grosse öffentliche Parkplatz-Areale wurden ebenfalls erfasst. Ihr Aufbau wurde als T1 berechnet.

Autobahnen Autobahnen sind Nationalstrassen auf dem Gebiet der Stadt Zürich (z. B. Sihlhochstrasse, Milchbucktunnel, . . .). Autobahnen haben einen Aufbau gemäss der Verkehrslastklasse T5 oder T6.

Schiene Zum Schienenverkehr in der Stadt Zürich zählen Tram, SBB (inkl. S-Bahn) und die SZU (Sihltal, Üetliberg).

Kunstbauten Die Kunstbauten (Brücken, Tunnel, . . .) sind aufgeteilt nach «Strasse», «Autobahn» und «Schiene».

Angaben zu den Strassen- und Schienenflächen auf dem Areal der Stadt Zürich konnten wir vom Tiefbauamt der Stadt Zürich (TAZ) erhalten. Diese sind nach Verkehrslastklassen und Besitzer differenziert. Damit können die Strassen im Besitz der Stadt, die Kantonsstrassen

Tabelle 2-9: Die Verkehrslastklassen für die Dimensionierung des Strassenoberbaus. *Quelle: [TBA, 2005]*

Verkehrslastklasse	Belastung	Nutzung
T1	sehr leicht	Geh-, Radweg
T2	leicht	Wohn- und Quartierstrassen
T3	mittel	Quartiererschliessung
T4	schwer	Haupt- und Ausfallstrassen
T5	sehr schwer	Hauptverkehrsstrassen
T6	extrem schwer	Hochleistungsstrassen
Sonderbelastung		Parkplätze (PW)
Gleisbau, Bushaltestellen		ÖV, Gleisverkehr

und diejenigen der privaten Eigentümer je einzeln untersucht werden. Aus den erhaltenen Daten ist es leider nicht möglich, das Alter der einzelnen Strassenabschnitte – und damit einen typischen Aufbau in Abhängigkeit des Alters – systematisch zu erfassen[4]. Zeitliche Änderungen der Bauweise konnten daher nicht berücksichtigt werden. Das Tiefbauamt der Stadt Zürich hat «Richtlinien für den Strassenoberbau» [TBA, 2005] zusammengestellt, welche als Grundlage für einen *normalen Strassenaufbau* benutzt wurde. Mit den Annahmen des heutigen Norm-Aufbaus für *alle* Strassen werden die Materialmengen wohl eher etwas überschätzt. In der Grössenordnung sind sie aber sicher richtig.

In [TBA, 2005] ist ebenfalls ein Normalprofil eines Tram-Trassees enthalten. Dieser Aufbau wurde für das ganze Netz der VBZ eingesetzt. Die SBB lieferten die Angaben eines Normalprofiles, das für die Berechnung der Geleise von SBB und SZU als Basis genommen wurde. Im weiteren stützen sich die Angaben auf eine Diplomarbeit zum Thema «Material- und Abfallbewirtschaftung des Systems Fahrbahn SBB» [Schneider, 2002].

Das Tiefbauamt der Stadt Zürich stellte auch detaillierte Angaben zu den Kunstbauten für den Bereich «Strassen» zur Verfügung. Daraus wurden die Materialmengen berechnet. Diese Zusammensetzung wurde ebenfalls für die Kunstbauten von Schiene und Autobahn verwendet.

Wasser

Die Wassernetze umfassen die Trinkwasserversorgung (kurz Wasser) und die Abwasserentsorgung (kurz Abwasser) in der Stadt. Zu diesen zwei Bereichen stellten die Netzbetreiber Wasserversorgung der Stadt Zürich (WVZ) und Entsorgung & Recycling (ERZ), Bereich Entwässerung detaillierte Daten zur Verfügung. Sie konnten ausführliche Zahlen zu den Netzlängen und -profilen liefern. Aus der Einbautiefe und der Grabenbreite wurde das aufzufüllende Grabenvolumen bis an die Unterkante des Strassenkörper berechnet.

Energie

Als Netze für Energie wurden die Gasversorgung der Stadt Zürich (Erdgas Zürich AG), das Stromnetz (Elektrizitätswerke der Stadt Zürich, EWZ) und das Netz der Fernwärme in die

[4]Gemäss mündlicher Mitteilung von Herrn M. Bürgi (TAZ) ist das Alter einer Strasse nicht eruierbar.

Tabelle 2-10: Die Quellen der Daten der einzelnen Bereiche der Infrastruktur

	Quellen
Verkehr	
Strassen (Gemeinde, Kanton)	
T1-T6, Wege, Parkplätze	Tiefbauamt der Stadt Zürich (TAZ)
Autobahn	Tiefbauamt des Kantons Zürich (TBA)
Schiene	
VBZ	Verkehrsbetriebe Stadt Zürich (VBZ)
SBB, SZU	TAZ, Schweizerische Bundesbahnen (SBB)
Kunstbauten	Tiefbauamt der Stadt Zürich (TAZ)
Wasser	
Wasser (WVZ)	Wasserversorung der Stadt Zürich (WVZ)
Abwasser (ERZ)	Entsorgung + Recycling Zürich (ERZ)
Energie	
EWZ	Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ)
Gasversorgung	Erdgas Zürich AG
Fernwärme	Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 2007

Untersuchung aufgenommen. Für das Stromnetz konnten vom EWZ Daten zu den Netzlängen und einem Normaufbau des Trassee bezogen werden. Für Gas- und Fernwärme wurden die Werte aus dem Statistischen Jahrbuch der Stadt Zürich [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007] übernommen. In den Normen für den Strassen und Entwässerungsanlagen [TBA, 2005] ist die «Anordnung von Werkleitungen» als Schema angegeben. Dieses Schema stellt die Grundlage für die Einbautiefe der Energienetze dar (Figur 2-8).

Die Kommunikationsdienste (Telefon, Datenverkehr, Radio/TV) wurden vereinfachend pauschal in diesen Netzen integriert betrachtet (Parallelführung im Trassee der Stromversorgung).

Materialflüsse der Infrastruktur

Der grösste Teil der Infrastrukturnetze in der Stadt Zürich ist gebaut, ihre jährliche Veränderung ist daher gering. Dies lässt sich an folgender Zahl zeigen: Die Netze für Wasser und Abwasser betragen je mehr als 1'000 km Länge. Wenn für die Erschliessung eines neuen Quartieres einige Kilometer neu dazukommen, so ist dies in der Grössenordnung von einigen Promillen – eine vernachlässigbare Grösse für das Modell. Die Materialflüsse der Infrastruktur beschränken sich somit auf die Erneuerung. Hier wurde für jede Nutzung mit **Erneuerungsraten** gearbeitet:

Eine Erneuerungsrate einer Strasse von 2 % bedeutet demnach, dass sie nach 50 Jahren ersetzt wird bzw. zweimal in 100 Jahren. Diese Erneuerungsraten wurden jeweils pauschal auf das entsprechende Netz bezogen. Die Werte wurden ebenfalls detailliert von den Werken zur Verfügung gestellt. Sie sind z. T. nach der Nutzung und nach verschiedenen Materialien differenziert.

Die Angaben zu den ermittelten Längen, Flächen und Erneuerungsraten für die Infrastrukturnetze finden sich im Anhang in der Tabelle A-4.

2.7 Unsicherheit

Die detaillierte Datengrundlage für die Infrastruktur lassen die Unsicherheit der Resultate relativ klein werden, sowohl für den Bestand wie auch für die jährlichen Flüsse. Es wird mit einer Unsicherheit von ± 10 % gerechnet.

Hingegen ist die Materialisierung der Gebäude und ihre jährlichen Flüsse unsicherer. Die Arbeit, welche den von uns verwendeten Faktoren zugrunde liegt, ist aber sehr detailliert erarbeitet worden und kann nach unserer Betrachtung gut auf die Stadt Zürich übertragen werden. Trotzdem muss bei der Materialzusammensetzung der Gebäude mit Unsicherheiten von ± 20 % (bezogen auf das Einzelobjekt) gerechnet werden. Auf den ganzen Bestand bezogen sollte die Unsicherheit aber 10 % nicht überschreiten. Die Tabelle 2-11 zeigt die geschätzten Unsicherheiten der Materialmengen.

Bei den Materialflüssen ist die Unsicherheit etwas grösser. Es ist nicht möglich, die Resultate mit bekannten Grössen zu überprüfen, da solche nicht existieren. Die Resultate können aber mit anderen Studien vergleichbar gemacht werden. Im Abschnitt 4 wird darauf eingegangen.

Tabelle 2-11: Die geschätzten Unsicherheiten der Materialmengen im Modell.

	Lager	**Flüsse**
Gebäude		
Einzelgebäude	20 %	100 %
Gebäudebestand	10 %	30 %
Infrastruktur	15 %	20 %
Gesamtunsicherheit	15 %	20 %

3 Resultate

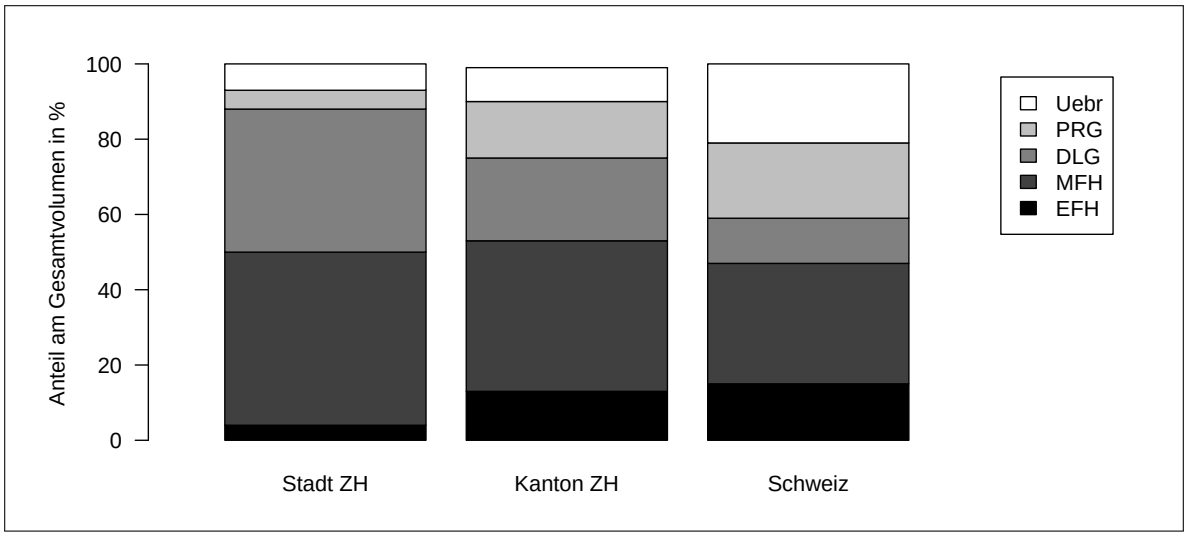
In einem ersten Schritt der Darstellung erfolgt eine Analyse des Gebäudebestandes und der Infrastrukturdaten. Dies ist notwendig, um allfällige Unterschiede zu anderen Studien besser interpretieren zu können. In einem zweiten Schritt werden die mit Hilfe des verwendeten Modells erhobenen Materiallager und -flüsse in der Stadt Zürich dargestellt und interpretiert.

3.1 Analyse des Gebäudebestandes

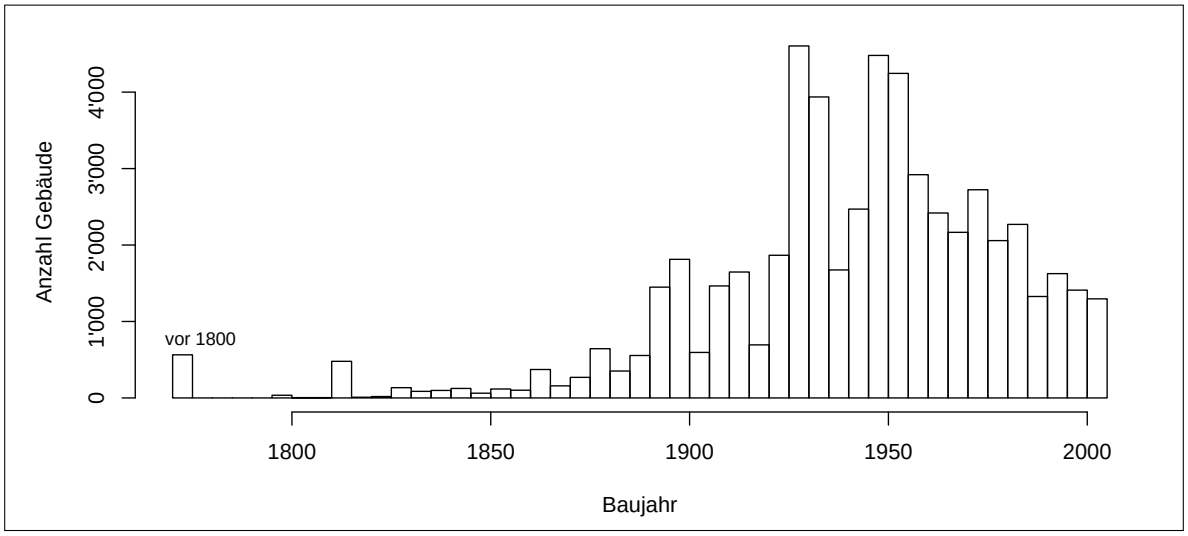
Die «Statistik der Stadt Zürich» weist für Ende 2005 einen Bestand von 55'339 Gebäuden in der Stadt Zürich aus. Diese können nach verschiedenen Kriterien dargestellt werden.

In der Figur 3-1 sind die Gebäudevolumenanteile in der Stadt Zürich, im Kanton Zürich und in der Schweiz, differenziert nach ihrer Nutzung dargestellt, die genauen Werte sind im Anhang tabelliert (Tabelle A-3). Interessant ist, dass bei allen drei Ebenen der Anteil des Wohnens (EFH und MFH) rund 50 % ausmacht. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei den übrigen Gebäudetypen, wie Dienstleistungs-, Produktionsgebäude und übrige Gebäude. Während die Produktionsgebäude und die übrigen Gebäude in der Stadt Zürich weniger häufig sind als im Kanton Zürich oder in der Schweiz, ist der Volumenanteil der Dienstleistungsgebäude in der Stadt Zürich deutlich höher. Die Daten zeigen somit sehr gut auf, welche Bedeutung der Dienstleistungssektor in der Stadt Zürich hat. Die übrigen Gebäude (Uebr) beinhalten auch die Landwirtschaftsgebäude. Daher ist dieser Anteil auf der Ebene Schweiz deutlich höher. Der Unterschied der Nutzungsanteile zwischen dem Kanton Zürich und der gesamten Schweiz ist weniger stark ausgeprägt als zwischen der Stadt Zürich und den beiden anderen Ebenen.

Zusammenfassend lässt sich für die Stadt Zürich folgendes sagen: 84 % des Gebäudevolumens entfällt auf die Mehrfamilienhäuser und Dienstleistungsgebäude. Diese dominieren somit den Gebäudebestand in der Stadt.



Figur 3-1: Der Gebäudebestand der Stadt Zürich, des Kantons Zürich und der Schweiz nach Nutzungstyp und Gebäudevolumen in Prozenten. Gesamtvolumen Stadt Zürich 2005: 166 Mio. m^3, Gesamtvolumen Kanton Zürich 2005: 575 Mio. m^3, Gesamtvolumen Schweiz 2000: 3'740 Mio. m^3. *Quelle: [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007], Stat. Amt des Kantons Zürich, [Lichtensteiger, 2006]*

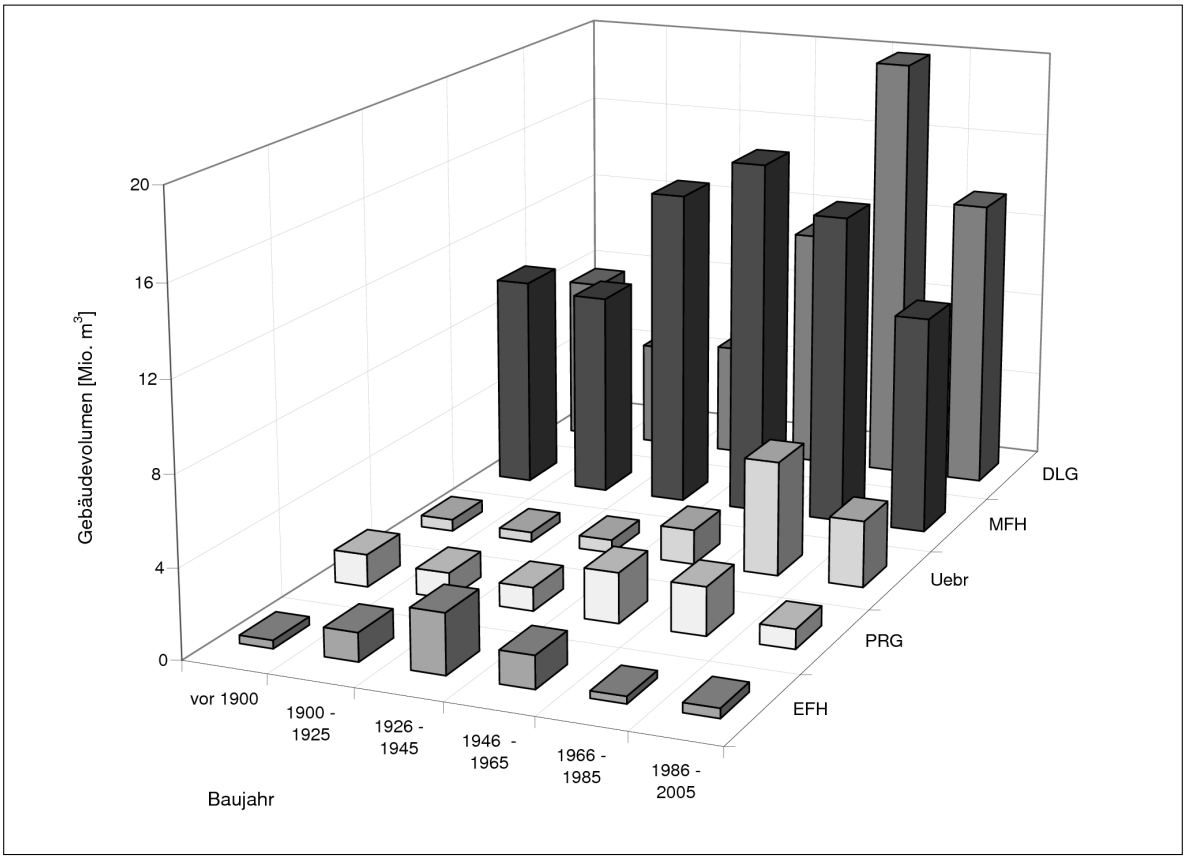


Figur 3-2: Altersverteilung des Gebäudebestandes der Stadt Zürich. Ende 2005 wurden 55'339 Gebäude gezählt (ein Balken pro zehn Jahre). *Quelle: Statistik Stadt Zürich*

Die Analyse der Gebäudeanzahl nach ihrem Alter (Figur 3-2) ergibt eine interessante Verteilung: Deutlich erkennbar sind die hohen Bautätigkeiten am Ende des 19. Jahrhunderts und in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. In diesen Zeiträumen stieg die Bevölkerungszahl aufgrund der starken Industrialisierung in und um die Stadt stark an. Damals fanden einerseits die Eingemeindungen statt, andererseits entwickelte sich ab den 20er Jahren der gemeinnützige Wohnungsbau stark. Diese Entwicklung wurde durch die Kriegsjahre etwas gehemmt, danach erhöhte sich die Bautätigkeit aber bis in die 60er Jahre auf den Stand der Vorkriegsjahre. Gleichzeitig zeigt die Figur auch, dass die Abbrüche nicht «exakt» der mittleren Lebensdauer eines Gebäudes entsprechen. Es gibt immer noch Gebäude die weit über 200 Jahre alt sind. Der Mittelwert des Gebäudealters beträgt 66 Jahre (Baujahr 1939), der Median fällt auf das Baujahr 1947. Das durchschnittliche Gebäude in der Stadt Zürich hat eine Gebäudegrundfläche von 238 m^2 und ein Volumen («Rauminhalt» der GVZ) von 2'993 m^3 mit einem Untergeschoss und drei oberirdischen Stockwerken.

Die drei Parameter «Alter», «Nutzung» und «Volumen» können dreidimensional dargestellt werden, wie es in der Figur 3-3 zu sehen ist. In dieser Darstellung wird ebenfalls deutlich, dass der grösste Teil der Gebäude (nach Volumen) als Mehrfamilienhaus oder Dienstleistungsgebäude genutzt wird. Einfamilienhäuser hingegen machen bezüglich des Volumens einen kleinen Teil der Gebäude in der Stadt aus. Die entsprechenden Werte sind im Anhang in der Tabelle A-5 aufgeführt.

Die Stadt Zürich als Besitzerin von Gebäuden Die «Stadt Zürich» ist Besitzerin von rund 11 % des Gebäudevolumens. Diese 11 % setzen sich wie folgt zusammen: EFH 1 %, MFH 27 %, DLG 59 %, PRG 4 %, Uebr 9 %. Die Baugenossenschaften, welche häufig von der Stadt Zürich Unterstützung erhalten, sind Eigentümer von weiteren 10 % der Gebäude (8 % Wohngebäude, 2 % restliche). Natürliche und juristische Personen (*Private* und *Institutionen*) besitzen je rund ein Drittel der Gebäude. Die privaten Eigentümer besitzen vorwiegend Wohngebäude (26 % vom Total), die Institutionen hingegen 22 % Dienstleistungs- und Produktionsgebäude. Unter *Verschiedene* werden hier auch die Gebäude von Bund und dem Kanton Zürich gezählt. Ihr Anteil umfasst zusammen rund 7 % oder die Hälfte der 14 % von *Verschiedene* (Figur 3-4). Die

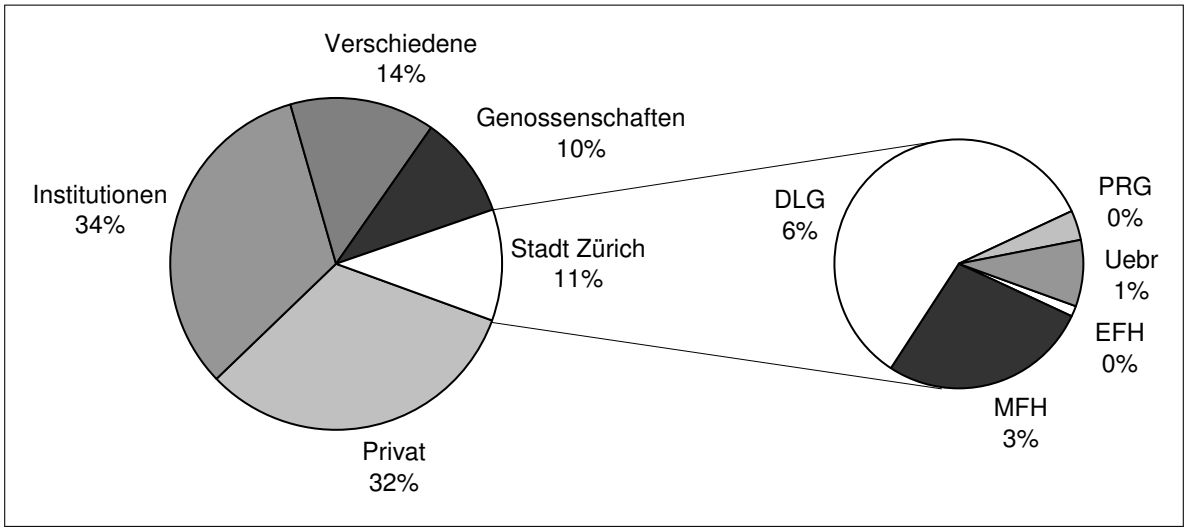


Figur 3-3: Der Gebäudebestand der Stadt Zürich 2005 nach Baujahr, Nutzung und Volumen. Auch in dieser Darstellung wird deutlich, dass die Mehrfamilienhäuser und Dienstleistungsgebäude den grössten Teil des Gebäudevolumens ausmachen. Das totale Gebäudevolumen 2005 beträgt rund 166 Mio. m^3. *Quelle: Statistik Stadt Zürich*

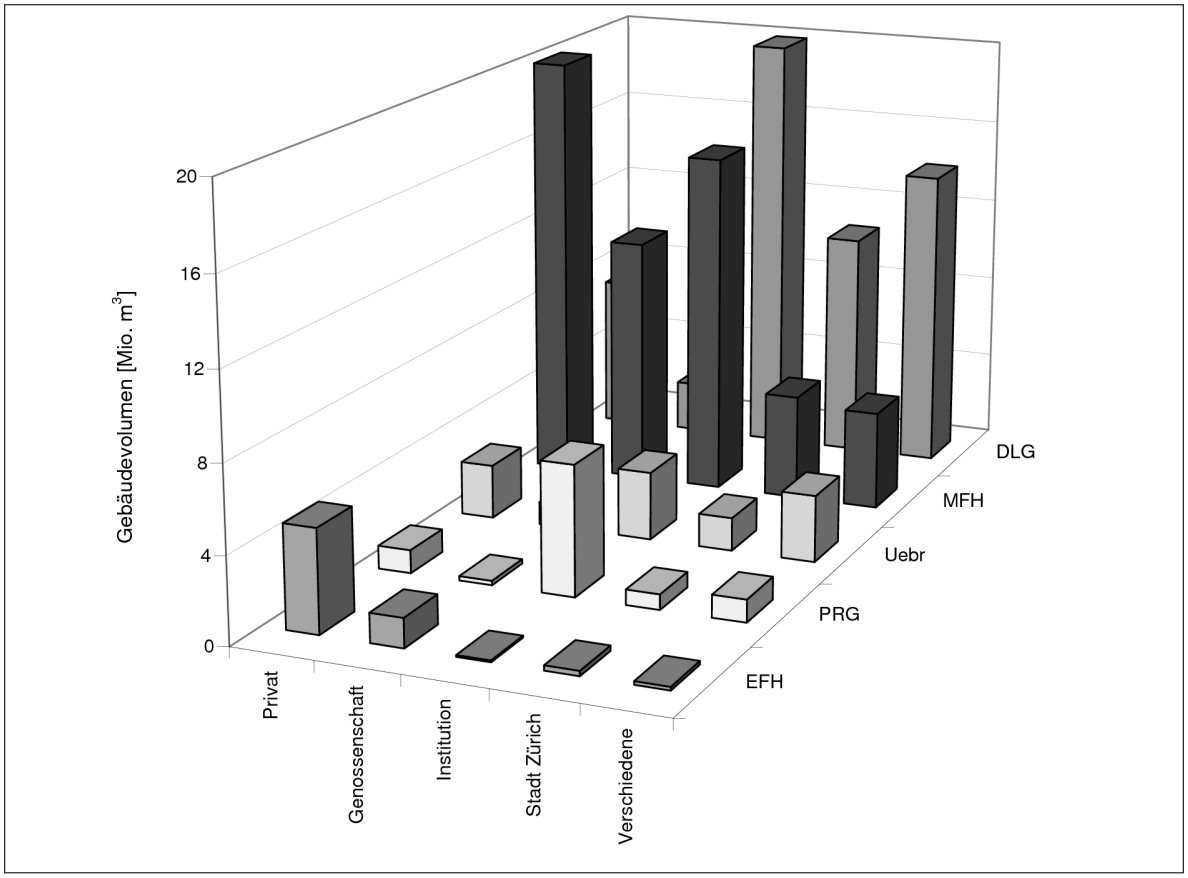
Figur 3-5 zeigt die Verteilung von Volumen, Nutzung und Besitzer als 3-D-Diagramm. Die exakten Werte sind im Anhang aufgeführt (Tabelle A-6).

Neubauten, Abbrüche und Sanierungen Die zeitlichen Entwicklungen der Neubauten, Abbrüche und Sanierungen weisen grosse jährliche Schwankungen auf. Diese widerspiegeln nur zum Teil die reale Situation auf dem Baumarkt. Der grössere Teil der Schwankungen kommt durch die Diskretisierung der statistischen Erhebung von einem Jahr zustande: So werden z. B. für das Jahr 2005 nur 165 Neubauten ausgewiesen, gleichzeitig befanden sich aber 299 Gebäude im Bau [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007]. Diese erscheinen damit erst im Jahr 2006 oder 2007 in der Statistik. Für die Abschätzung der Materialflüsse sind diese Datengrundlagen nicht optimal. Aus diesem Grund werden die Materialflüsse über die Mittelwerte der Bestandesveränderung, der Abbrüche und Sanierungen aus den Jahren 2002-2005 bestimmt. Dadurch werden die statistischen Schwankungen ausgeglichen.

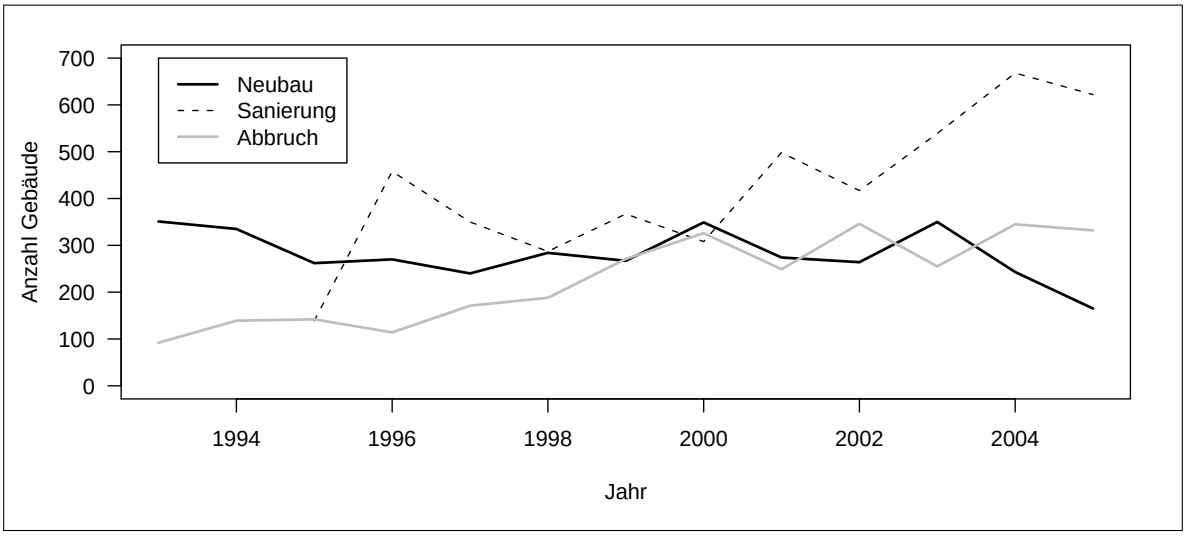
Die Neubauten können aus der Statistik der Stadt Zürich nach ihrem «Baujahr» bestimmt werden. Als «Umbau» gilt ein Eingriff in ein Gebäude, der entweder eine gewisse Kostengrenze übersteigt und/oder für den eine Baubewilligung erforderlich ist. Diese Daten zu den Sanierungen werden erst seit dem Jahr 2000 systematisch als *Umbaujahr* erfasst. Die Zahl der Abbrüche wird in der Stadt Zürich seit 1993 erfasst. Auch diese Werte weisen eine grosse



Figur 3-4: Eigentümer der Gebäude in der Stadt Zürich in % des Gebäudevolumens. *Institution* = Pensionskassen, Immobilienfirmen, Firmen, etc. *Verschiedene* = Bund, Kanton, andere.
Quelle: Statistik Stadt Zürich



Figur 3-5: Der Gebäudebestand der Stadt Zürich 2005 nach Eigentümer, Nutzung und Volumen. Die «Stadt Zürich» ist Eigentümerin von über 4'000 Gebäuden oder rund 11 % des Gebäudevolumens in der Stadt. *Quelle: Statistik Stadt Zürich*



Figur 3-6: Zeitreihe der Neubauten, Sanierungen und Abbrüche von 1993-2005 in der Stadt Zürich. Die Umbauten werden erst seit dem Jahr 2000 systematisch erfasst, vorher sind die Angaben unvollständig. *Quelle: Statistik Stadt Zürich*

jährliche Variabilität auf. Die Figur 3-6 zeigt die zeitliche Entwicklung der Anzahl von Neubauten, Sanierungen und Abbrüchen für die Jahre 1993-2005. Es ist zu erkennen, dass sich die Anzahl der Neubauten (schwarze Linie) seit 1993 eher auf einem konstanten Niveau bewegt, während die Umbau- und Abbruchzahlen im gleichen Zeitraum relativ stark zugenommen haben.

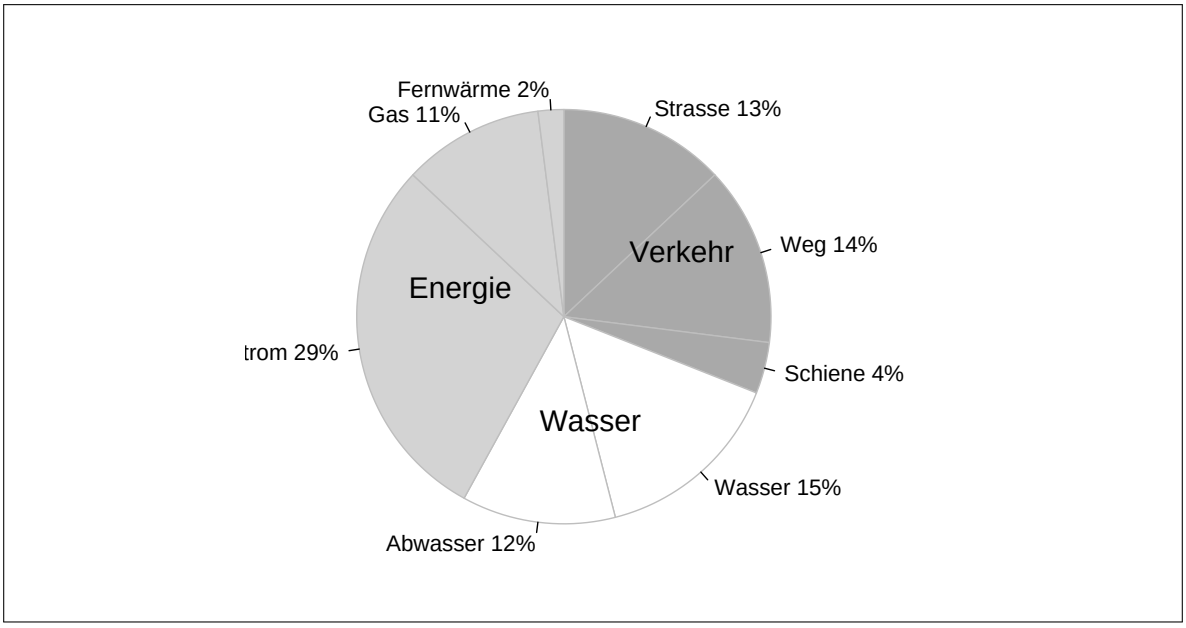
3.2 Analyse der Infrastruktur

Verkehrsflächen Die Hälfte der erfassten Verkehrsflächen in der Stadt Zürich entfällt auf die Gemeinde- und Kantonsstrassen und über ¼ auf die Geh-, Rad- sowie unbefestigte Wege. Der Schienenverkehr (VBZ, SBB, SZU) beansprucht 14 % der Verkehrsfläche. Die Flächen für die Kunstbauten von Strassen und Schiene machen zusammen knapp 6 % aus (Tabelle 3-1). Insgesamt beträgt die Fläche, welche für den Verkehr benutzt wird über 10 Mio. m^2 oder 20 % der Landfläche der Stadt ohne Wald und Gewässer [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007].

Netzlängen Die Netze der Ver- und Entsorgungsinfrastruktur sind unter den Strassen und den Gehwegen eingebaut. Die Länge der Wasser- und Abwassernetzte liegen daher in der Grössenordnung der Strassenlängen (um 1'000 km). Die Längen, Flächen, Volumina und Erneuerungsraten der Infrastruktur-Netze in der Stadt Zürich sind in der Tabelle im Anhang A-4 detailliert aufgeführt. Diese Zahlen umfassen nur die öffentlichen Netze, d. h. ohne die privaten Anschlüsse. Die Versorgung mit Strom erfordert hingegen eine feinere Verästelung, diese Trassees werden z. T. auf beiden Strassenseiten im Trottoir geführt. Die Länge des Stromnetzes ist daher über 2'000 km lang! Die Fernwärme beansprucht mit 3 % der totalen Längen nur einen geringen Anteil. Die Angaben stammen von den jeweiligen Netzbetreibern, mit Ausnahme der Fernwärme. Diese Zahl stammt aus dem Statistischen Jahrbuch der Stadt Zürich [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007]. In der Figur 3-7 ist die prozentuale Verteilung der aufsummierten Infrastrukturnetze und Verkehrswege aufgeführt, die entsprechenden Werte finden sich in der Tabelle A-9 im Anhang.

Tabelle 3-1: Die verschiedenen Verkehrsflächen in der Stadt Zürich. Die Strassen und Wege dominieren den Flächenverbrauch mit 85 %, die Schienen belegen nur 15 % der Verkehrsfläche. *Quelle: TAZ, SBB und [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007]*

	Fläche m^2	Fläche %	Breite m	**L**änge km	Länge %
Strassen (ohne Kunstbauten)					
Gemeinde, Kanton	5'363'776	51 %	7.0	766	32 %
Autobahn	132'150	1 %	9.0	15	1 %
Parkplätze, öffentlich	341'667	3 %	2.5	137	6 %
Weg, befestigt	2'460'000	23 %	2.5	984	41 %
Weg unbefestigt	190'000	2 %	2.0	95	4 %
Schiene (ohne Kunstbauten)					
VBZ, SBB, SZU	1'472'467	14 %	5.0	294	12 %
Kunstbauten					
Stadt, Kanton	382'157	4 %	5.0	76	3 %
Autobahn	117'850	1 %	9.0	13	1 %
Schiene	142'500	1 %	5.0	29	1 %
Total	**10'602'567**	**100 %**		**2'409**	**100 %**

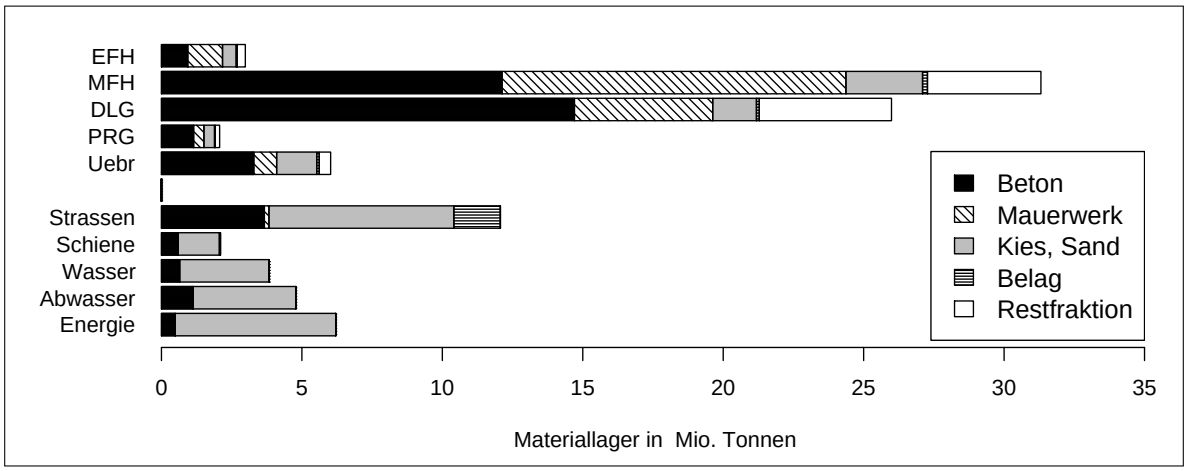


Figur 3-7: Der Bestand der Infrastruktur-Netze, relativ zu ihrer Länge dargestellt. Die totale Länge beträgt rund 7'500 km. *Quelle: Angaben der Netzbetreiber, [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007]*

3.3 Das Lager der mineralischen Baustoffe im Bestand der Stadt Zürich 2005

Die Stadt Zürich weist im Referenzjahr 2005 einen mineralischen Materiallagerbestand von total 97.5 Mio. Tonnen auf, wobei 70 % davon in den Gebäuden verbaut sind. Die verschiedenen Materialien verteilen sich aber – wie in der Figur 3-8 gezeigt wird – unterschiedlich auf Gebäude und Infrastruktur: Beton, Mauerwerk und die mineralische Restfraktion (Gips, Keramik, Glas) befinden sich zu grossen Teilen in gebundener Form in den Gebäuden. Die Infrastrukturnetze sind hingegen vorwiegend aus Kies/Sand, etwas Beton und Belag aufgebaut.

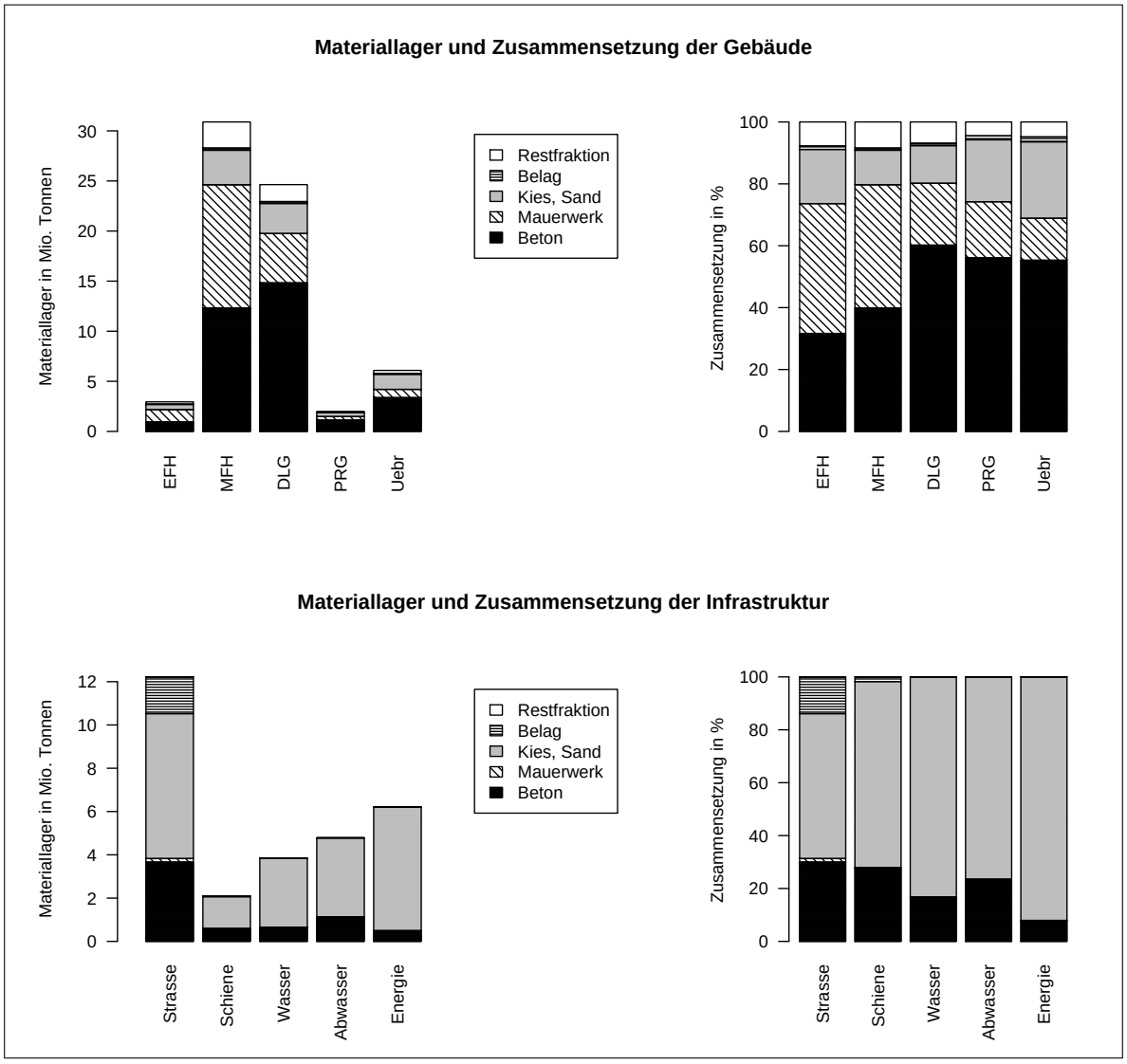
Etwas mehr als 80 % des Betons ist in den Gebäuden gelagert, der Rest befindet sich in der Infrastruktur als Konstruktionsbeton in Kunstbauten, als Magerbeton oder in Form von Zementwaren. Der Kies/Sand wird zu 70 % und der Belag zu 75 % in der Infrastruktur eingesetzt. Der Rest dieser Materialien wird im Hochbau vor allem zur Erschliessung der Gebäude auf den Parzellen verwendet. In der Tabelle A-8 im Anhang sind die detaillierten Zahlen zu den Figuren 3-8 3-9 aufgeführt.



Figur 3-8: Das Materiallager in der Stadt Zürich im Jahr 2005 in Mio. Tonnen. Total sind in der Stadt fast 100 Mio. Tonnen mineralische Baustoffe gelagert, davon rund 70 % in den Gebäuden.

Die Figur 3-9 zeigt die Materialzusammensetzung des Gebäudeparks (oben) und der Infrastruktur (unten) unterteilt nach den verschiedenen Nutzungen in absoluten Werten (jeweils links) und in Prozenten (jeweils rechts). Erneut wird deutlich, dass bei den Gebäuden die Mehrfamilienhäuser und die Dienstleistungsgebäude den Gebäudepark dominieren. Die Gebäude sind zum grössten Teil aus Beton und Mauerwerk aufgebaut. Allerdings variiert die Zusammensetzung dieser zwei Fraktionen zwischen den verschiedenen Nutzungstypen beträchtlich. Die EFH haben einen Betonanteil von rund 30 %, die DLG einen solchen von fast 60 %. Die Beiträge der von Gips, Keramik und Glas liegen unter 10 %, diejenigen von Kies, Sand und von Belag bewegen sich zwischen 10-20 %. Diese werden für die Erschliessung der Gebäude verwendet.

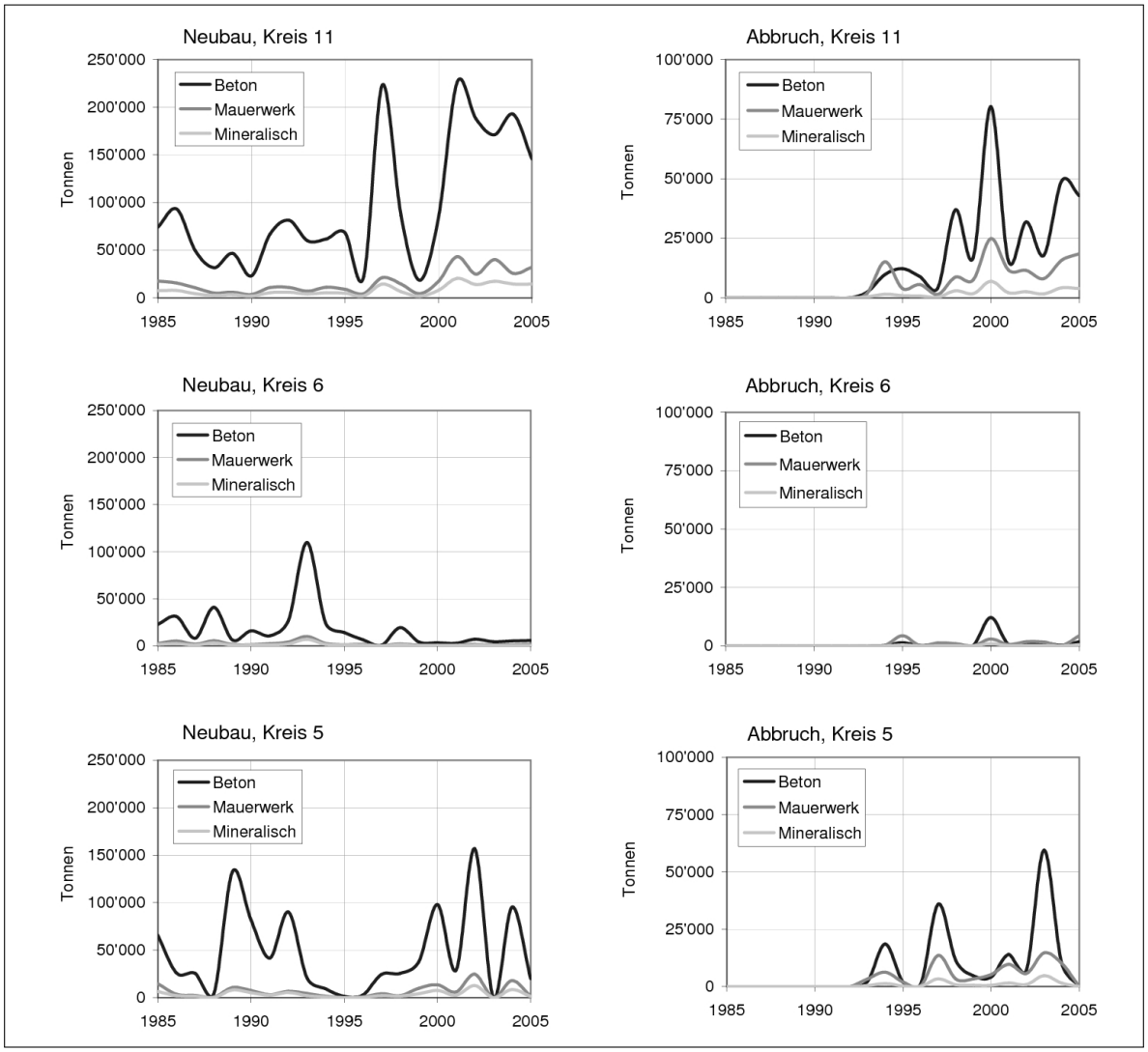
Bei den Infrastrukturnetzen tragen die Strassen den grössten Teil des Materiallagers bei. Ihr Anteil liegt bei 42 %. Die Infrastrukturnetze sind vorwiegend aus Beton und Kies/Sand aufgebaut. Der Betonanteil bewegt sich bei den verschiedenen Netzen zwischen 8 % (Energie) und 30 % (Strassen bzw. Kunstbauten im Strassennetz). Der Kiesanteil in den verschiedenen Netzen bewegt sich zwischen 92 % (Energie) und 55 % (Strassen). Der Belagsanteil in den Strassen beträgt im Durchschnitt 14 %. Vergleiche dazu auch die Tabelle A-4 im Anhang.



Figur 3-9: Das mineralische Materiallager im Gebäudepark (oben) und in der Infrastruktur (unten) der Stadt Zürich im Jahr 2005. Die grössten Materialmengen befinden sich in den Mehrfamilienhäusern und den Dienstleistungsgebäuden. Der Anteil von Beton macht bei den Gebäuden 30-60 % aus. Das Materiallager in der Infrastruktur wird dominiert von den Strassen. Aufgebaut ist die Infrastruktur vorwiegend aus den Fraktionen «Kies, Sand» und «Beton».

Materialisierung auf der Ebene Stadtkreis

Das mit der Datenbank verknüpfte Modell lässt im weiteren die Differenzierung der Materialisierung der Gebäude nach Stadtkreisen zu. Damit kann die Dynamik der Veränderung in der Stadt dargestellt werden. Exemplarisch dient dazu die Figur 3-10. Dort sind die Materialmengen für die Neubauten der Jahre 1985-2005 und diejenigen der Abbrüche der Jahre 1993-2005 für die Stadtkreise 5, 6 und 11 dargestellt. Schon auf dem ersten Blick sind die markanten Unterschiede erkennbar. Im Kreis 6 wurde in den letzten zehn Jahren wenig neu gebaut oder abgebrochen. Dieser Kreis ist offenbar im Moment relativ «stabil». Wie erwartet, wurde im Kreis 5, mit Ausnahme des Rückgangs um 1995, regelmässig viel rück- und neu gebaut. Auch der Kreis 11 erfährt seit 1995 einen regelrechten Bauboom mit sehr grossen Rückbauvolumina um das Jahr 2000. Zurückzuführen ist dies auf den Umbau des Industrie-



Figur 3-10: Materialmengen in Tonnen aus Neubauten und Abbrüchen für die Stadtkreise 5, 6 und 11. Die Zahlen zu den Abbrüchen sind erst ab 1993 erhoben worden. Die Skalen für die Neubauten und die Abbrüche sind für die Darstellung verschieden gewählt.

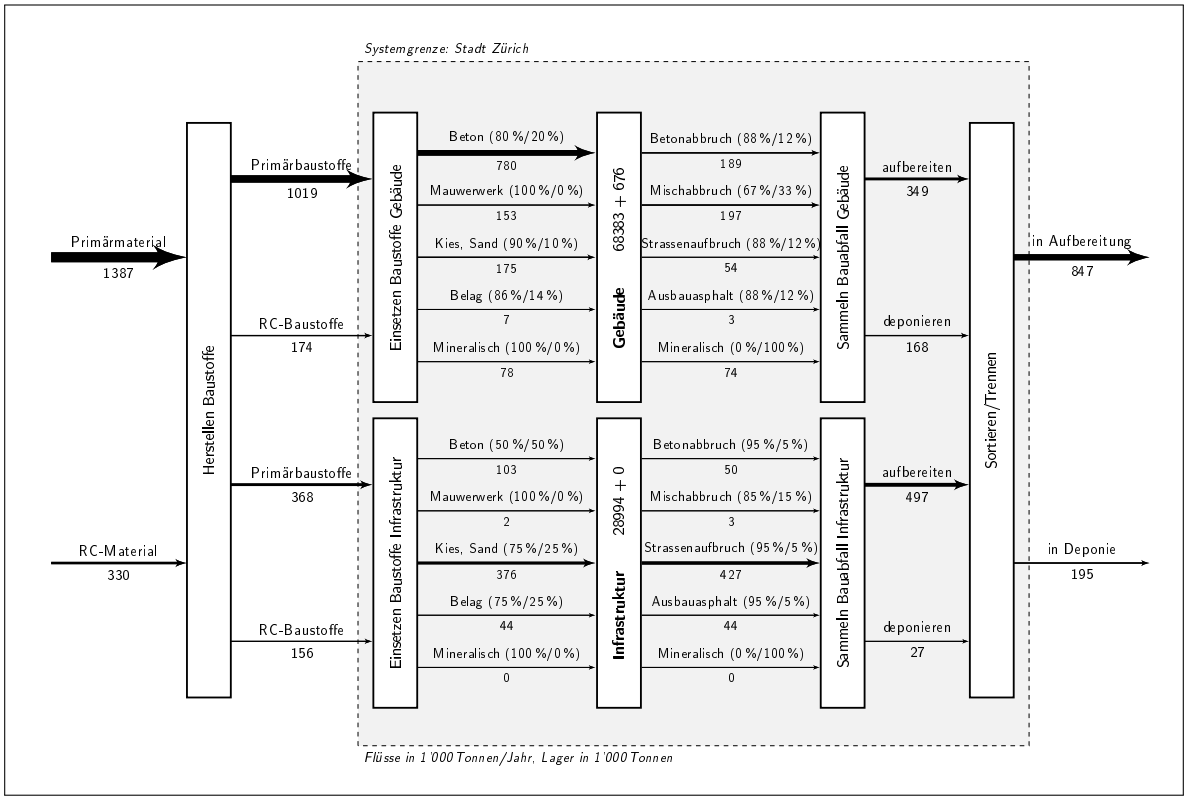
gebietes «Neu-Oerlikon» sowie den Umbau und die Erschliessung von neuem Bauland in Unter-Affoltern. Interessant ist der Vergleich der Materialmengen aus dem Rückbau mit dem Materialverbrauch für die Neubauten. Immerhin liegt die Materialmenge aus dem Rückbau in den Kreisen 5 und 11 im Bereich von 25–30 % des Materialverbrauches für die Neubauten. Diese Informationen sind wichtig, weil sie in der zweiten Phase allenfalls als Grundlagen für die dynamische Modellierung von gewählten Szenarien dienen können.

Was in dieser Darstellung ebenfalls deutlich wird, sind die grossen statistischen Schwankungen, so z.B. für die Neubauten im Kreis 11 zwischen den Jahren 1997–2001 (vgl. dazu die Figur 3-6). Allerdings ist es natürlich auch so, dass mit zunehmender Verfeinerung der Analyse die effektive Anzahl der gebauten oder abgebrochenen Objekte jährlich stark schwanken kann, da der ausgleichende Effekt über die Grösse des ganzen Stadtgebietes nicht mehr gegeben ist. Einzelne Bauvorhaben können daher in einem Kreis das Resultat stark beeinflussen.

3.4 Die Materialflüsse in der Stadt Zürich im Jahr 2005

Übersicht: Primäre- und Recycling-Baustoffe

Eine Übersicht der Flüsse und Lager der mineralischen Materialien zeigt die Figur 3-11[5]. Die insgesamt 1.7 Mio. Tonnen Inputflüsse sind unterteilt in Primärmaterial, d. h. Rohmaterial zur Herstellung der Baustoffe, mit einem Anteil von über 80 % und Recycling-(RC)-Material mit knapp 20 % Anteil am Gesamtinput. Der Input in die Gebäude beträgt mit 1.2 Mio. Tonnen pro Jahr knapp 70 % des gesamten Inputs in die Stadt Zürich, demnach gelangen 30 % in die Infrastruktur. Beton dominiert den Fluss in die Gebäude. Er macht über ¾des Inputs in die Gebäude aus. Bei der Infrastruktur ist es die Kies/Sand-Fraktion, welche mit 70 % den grössten Anteil an den eingesetzten Baustoffen einnimmt.



Figur 3-11: Eine Übersicht der mineralischen Materialflüsse im Jahr 2005 in 1'000 Tonnen pro Jahr (t/a). Die Input-Flüsse in die Gebäude und in die Infrastruktur sind mit den Werten in der Klammer um die prozentuale Verteilung Primärbaustoffe/Recycling-Baustoffe ergänzt. Bei den Outputflüssen geben die Prozent-Werte in der Klammer die Anteile für aufbereiten/deponieren an.

Die totalen Outputflüsse von 1.0 Mio. Tonnen pro Jahr kommen zu je 50 % aus den Gebäuden und aus der Infrastruktur; sie sind beide fast gleich gross. Die Erneuerungsrate der Infrastruktur ist mit 1.8 % mehr als doppelt so hoch wie diejenige der Gebäude (0.75 %), daher sind die Materialflüsse der Infrastruktur relativ grösser, obwohl das Materiallager der Infrastruktur weniger als die Hälfte der Gebäude beträgt. Der grösste Teil der mineralischen Bauabfälle und Rückbaumaterialien gelangt in die Aufbereitung, weniger als 20 % wird deponiert. Da die Aufbereitung ausserhalb der Stadt Zürich liegt, können diese Flüsse nur sehr

[5]Innerhalb der folgenden Diagramme sind einzelne kleine Rundungsdifferenzen bei der Darstellung der Werte für die Lager und Flüsse aufgetreten.

grob abgeschätzt werden.

Das Lagerwachstum von 0.68 Mio. Tonnen pro Jahr entspricht 0.7 % des totalen Materiallagers in der Stadt Zürich. Da aber die Infrastruktur nicht wächst (eine Modellannahme) entspricht das Wachstum 1 % des Gebäudebestandes (Input 1.7 %, Output 0.7 %). Die Zahlen der Outputflüsse zu der Abbildung 3-11 sind in der Tabelle A-12 aufgeführt.

Die Materialflüsse in die verschiedenen Nutzungstypen

Im Weiteren erfolgt die Darstellung der Resultate mittels Materialflussschemen. Die Daten basieren auf dem im Abschnitt Methoden vorgestellten Aufbau zur Datenerhebung und beziehen sich auf das Jahr 2005 (vgl. Figur 2-3). Wesentlich ist dabei, dass die Materialflüsse im Hochbau über die Bestandesänderungen und über die Abbruch- und Umbaudaten erhoben wurden, während die Flüsse in der Infrastruktur auf den sehr detaillierten Erneuerungsraten der einzelnen Infrastrukturnetze basieren (Tabelle A-4). Es werden zuerst die Flüsse der gesamten mineralischen Baustoffe gezeigt, anschliessend die Flüsse der einzelnen Material-Fraktionen.

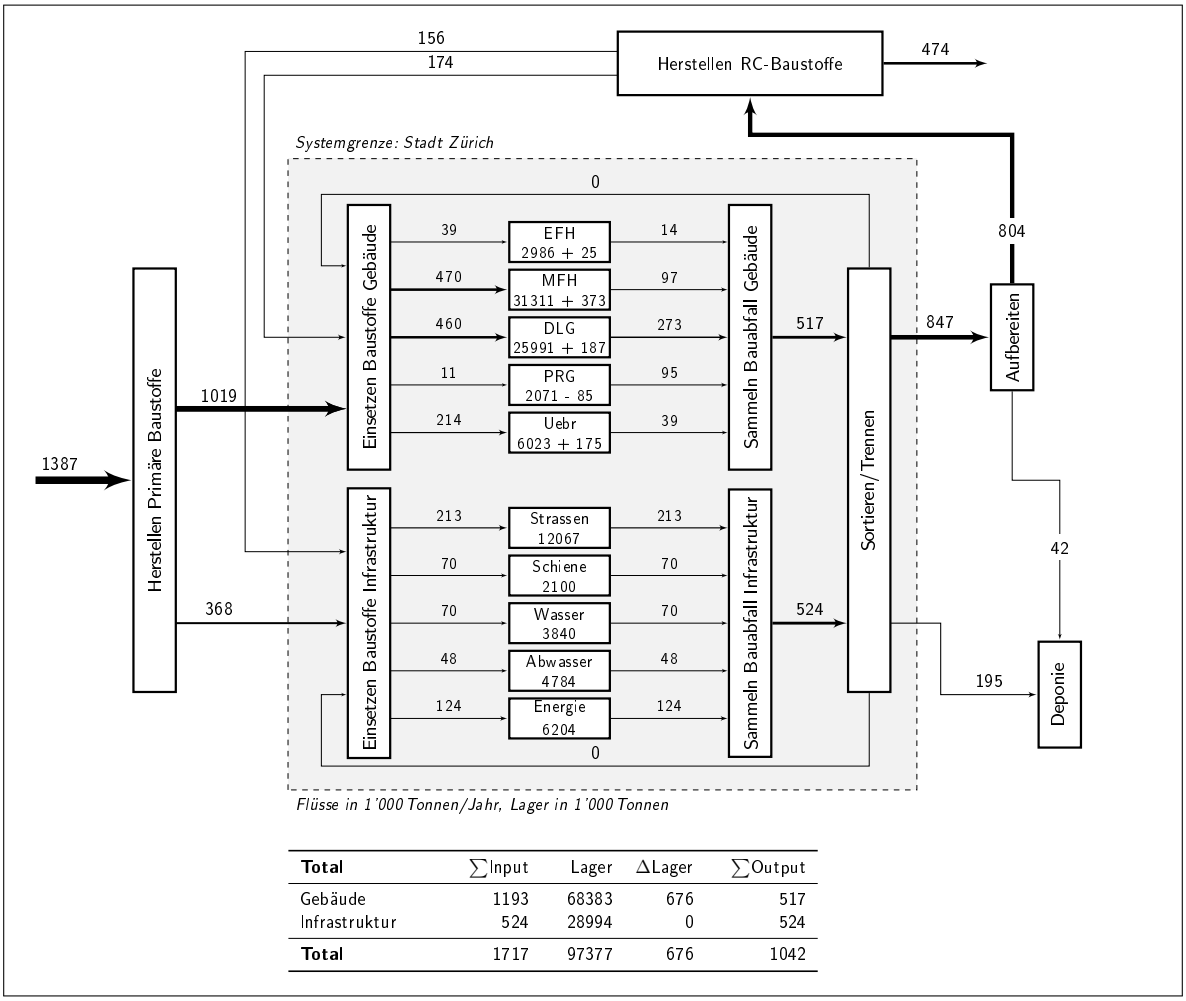
Totale Flüsse Die Figur 3-12 zeigt die totalen Materiallager und -flüsse in der Stadt Zürich nach der jeweiligen Nutzungskategorie. Von den Flüssen in die Gebäude gelangen die grössten Mengen in die MFH und DLG (je 39 %). In die übrigen Gebäude (Uebr) fliessen rund 18 % der gesamten mineralischen Materialien, was überraschend viel ist. Dies ist zu einem grossen Teil auf den Bau von Parkhäusern zurückzuführen. Parkhäuser haben relativ grosse Volumina und können demnach die Statistik stark beeinflussen (vgl. Tabellen A-10 und A-11). EFH und PRG werden in der Stadt fast nicht gebaut, sie erhalten zusammen 4 % der Inputflüsse in die Gebäude.

Die Verhältnisse der Outputflüsse sind folgendermassen verteilt: EFH 3 %, MFH 19 %, DLG 54 %, PRG 18 % und die übrigen 7 %. Die PRG tragen verhältnismässig viel zu den Outputflüssen bei. Auf die verschiedenen Abbruchraten wird später noch vertiefter eingegangen.

Da sich das Lager der Infrastruktur nicht verändert, sind dort die Input- und Outputflüsse gleich gross. Die Netze werden lediglich unterhalten und kaum ausgebaut. Die Materialflüsse verteilen sich wie folgt auf die verschiedenen Nutzungen: Strasse 41 %, Schiene und Wasser je 13 %, Abwasser 9 %, Energie 23 %. Die Netze der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sind ähnlich lang, werden aber nicht im gleichen Rhythmus erneuert. Die Wasserversorgung erneuert ihre Leitungen ca. alle 50 Jahre, die Abwasserrohre und -kanäle müssen rund 100 Jahre im Einsatz bleiben. Daher sind ihre Materialflüsse verschieden gross, obwohl ihre Netze fast gleich lang sind.

In den folgenden Figuren 3-13 bis 3-17 sind die Input- und Outputflüsse und die Lager der einzelnen Baustoffe in die verschiedenen Nutzungen aufgeteilt. Im Gegensatz zur Figur 3-12, in der die Outputflüsse als definierte *Rückbaumaterialien*[6] ausgewiesen sind, zeigen diese Figuren die effektiven Flüsse der einzelnen Baustoffe bzw. Materialien. Das heisst für die Outputflüsse, dass dort der jeweilige Baustoff (z.B. Beton) angegeben ist und nicht das Rückbaumaterial (z.B. Betonabbruch). Beton kann in verschiedenen Rückbaumaterialien vorhanden sein, nämlich im Betonabbruch, im Mischabbruch und im Strassenaufbruch. Gezeigt wird also die Summe des Baustoffes in allen möglichen Rückbaumaterial-Flüssen. Die Werte der Outputflüsse sind in der Tabelle A-14 aufgeführt.

[6] Vergleiche dazu die entsprechenden Definitionen im Glossar

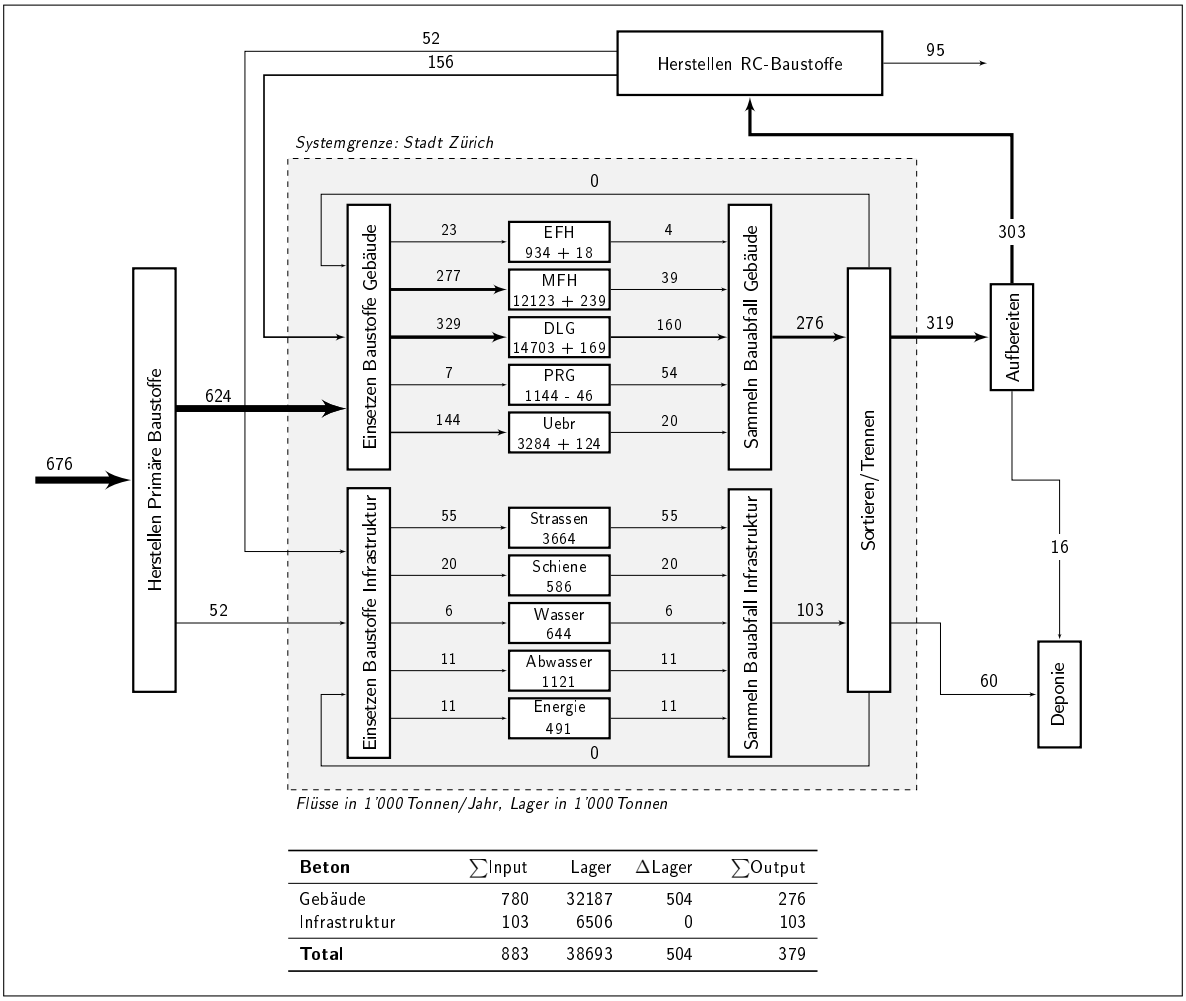


Total	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	1193	68383	676	517
Infrastruktur	524	28994	0	524
Total	1717	97377	676	1042

Figur 3-12: Die Lager und Materialflüsse 2005 aller mineralischen Baustoffe in der Stadt Zürich in 1'000 t/a. Der grössere Teil des Inputs fliesst in die Gebäude und dort in die MFH und DLG. Der Output aus den Gebäuden und der Infrastruktur ist hingegen fast gleich gross.

Beton Der totale Beton-Input von 883'000 Tonnen pro Jahr (t/a) gelangt zum grossen Teil in die Gebäude (fast 90 %). Die Verteilung in den Gebäuden ist ähnlich den totalen Flüssen, d. h. die MFH (36 %) und DLG (42 %) erhalten die grössten Anteile. Der Rest verteilt sich auf EFH mit 3 %, PRG mit 1 % und Uebr mit 18 %. Die Outputflüsse von Beton hingegen stammen zum grössten Teil aus den DLG mit 58 %, den MFH mit 14 % und den PRG mit 19 %. Aus den Übrigen Gebäuden (7 %) und den EFH (2 %) stammt nur ein kleiner Teil des Betonoutputs. In der Infrastruktur wird über die Hälfte des Betons in den Strassen und deren Kunstbauten eingesetzt. Die anderen Nutzungen brauchen zwischen 6 % (Wasserversorgung) und 19 % (Schiene) des Betoninputs. Der totale Output von Beton beträgt 379'000 t/a. Davon stammen 73 % aus den Gebäuden und 27 % aus der Infrastruktur (Figur 3-13). Der Output in die Aufbereitung ist deutlich grösser als der Bedarf der Stadt Zürich nach RC-Beton. Hier liegt demnach ein grosses Potenzial für den zusätzlichen Einsatz von RC-Beton. Das zeigt sich auch am grossen Einsatz von Beton aus primärer Produktion (76 % des totalen Inputs).

Die Summe der Inputflüsse des Betons ist mit 883'000 t/a mehr als doppelt so hoch wie die Summe der Outputflüsse (379'000 t/a). Das Lagerwachstum von Beton im Hochbau ist mit etwas über 500'000 t/a oder ca. 1.3 % des Lagers relativ hoch. Wir sind demnach noch deutlich



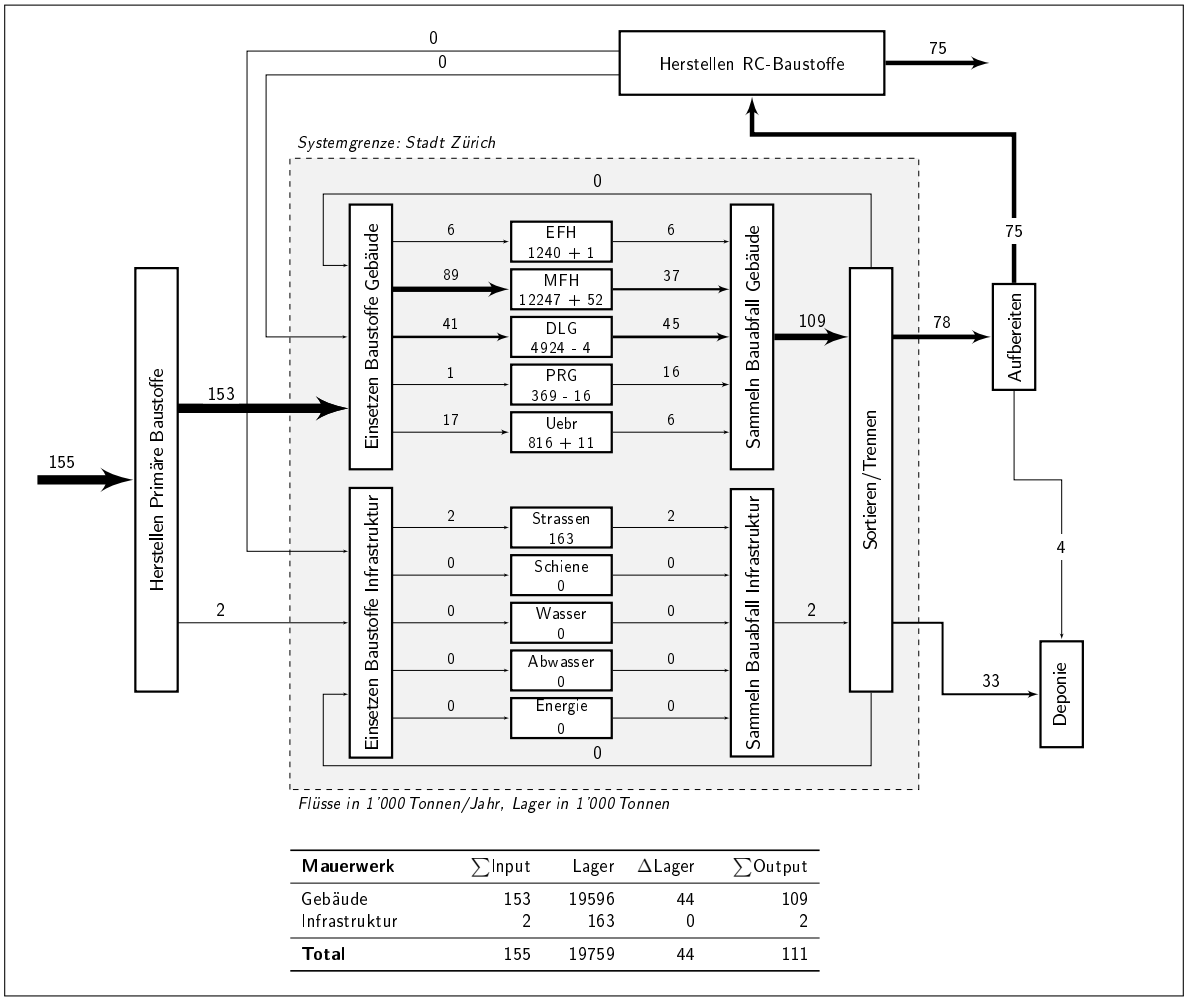
Beton	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	780	32187	504	276
Infrastruktur	103	6506	0	103
Total	883	38693	504	379

Figur 3-13: Die Betonlager und -flüsse im Jahr 2005 in der Stadt Zürich in 1'000 t/a. Der grösste Teil des Betons fliesst in die MFH, DLG und die übrigen Gebäude (Uebr).

von einem Zustand des Fliessgleichgewichtes entfernt. Interessant ist dabei auch der Vergleich mit dem Lagerwachstum aller mineralischen Materialien. Dieses beträgt 676'000 t/a gemäss Figur 3-12 und ist damit nur noch um etwa 30 % höher als das Betonlagerwachstum. Dies bedeutet, dass das Betonlagerwachstum den relevantesten Beitrag am gesamten Lagerwachstum der mineralischen Materialien leistet.

Mauerwerk Die Materialien zur Erstellung des Mauerwerks gelangen zu fast 100 % in die Gebäude. In der Infrastruktur wird das Mauerwerk einzig in den Kunstbauten eingesetzt. In die EFH fliessen 4 % des totalen Mauerwerkinputflusses, in die MFH fliesst der grösste Teil von 58 %, in die DLG fliessen 26 %, in die PRG weniger als 1 % und in die übrigen knapp 11 %. Die mineralischen Bauabfälle von Mauerwerk stammen wiederum zum grössten Teil von den DLG mit 41 %. Die MFH tragen 34 % dazu bei, die EFH 5 %, die PRG 15 % und die übrigen nur 6 % (vergleiche Figur 3-14).

Mauerwerk wird heute nicht aus RC-Materialien hergestellt, daher wird die gesamte Nachfrage nach Mauerwerk aus primären Baustoffen gedeckt. Mauerwerk, das im Mischabbruch in die Aufbereitung gelangt, kann von dort als Zuschlagstoff im Magerbeton in das System (Infrastruktur) zurückfliessen. Diese Nutzung ist genauer zu untersuchen. Im Abschnitt 4



Mauerwerk	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	153	19596	44	109
Infrastruktur	2	163	0	2
Total	155	19759	44	111

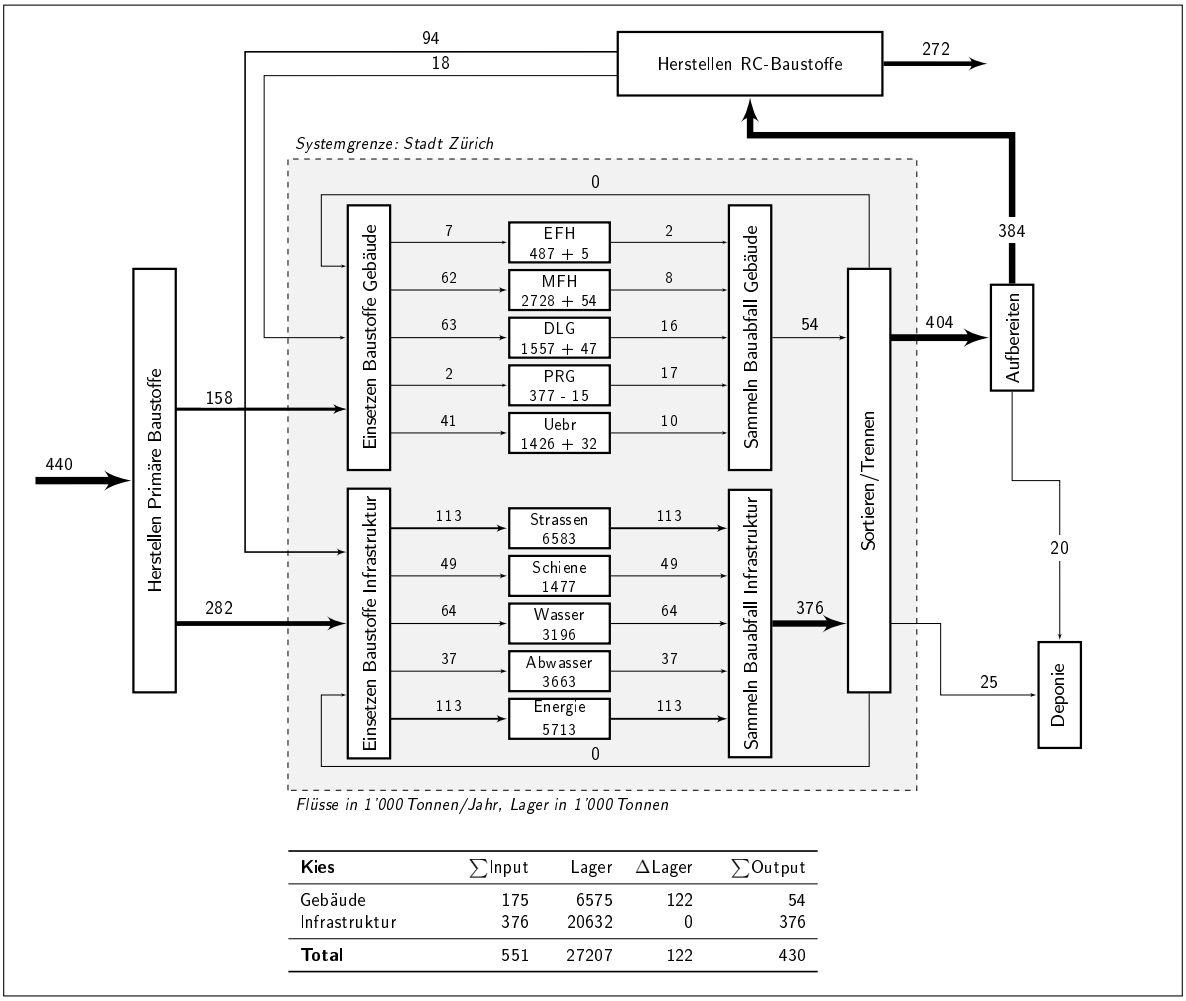
Figur 3-14: Die Materialflüsse und -lager von Mauerwerk im Jahr 2005 in 1'000 t/a. Mauerwerk wird nicht zu Mauerwerk rezykliert, daher ist der gesamte Input Primärbaustoff.

wird darauf näher eingegangen.

Die Summe der Inputflüsse des Mauerwerks ist mit 155'000 t/a nur etwa 50 % höher als die Summe der Outputflüsse (111'000 t/a). Das Lagerwachstum von Mauerwerk im Hochbau ist mit 44'000 t/a oder ca. 0.2 % sehr gering. Hier wird der Zustand des Fliessgleichgewichtes schon fast erreicht. Der Grund für das kleine Lagerwachstum ist darin zu sehen, dass die zurückzubauenden Gebäude höhere Mauerwerksanteile haben als die Gebäude, welche heute erstellt werden. Umgekehrt ist in den heutigen Gebäuden der Betonanteil sehr viel höher als in den Gebäuden, welche vor 60 Jahren erstellt wurden (siehe auch Figur 2-4).

Kies, Sand Kies und Sand wird zu über zwei Drittel in der Infrastruktur benötigt, nämlich 68 % des totalen Inputs von 554'000 t/a (Figur 3-15). Die restlichen 158'000 t/a fliessen in den Gebäudenpark und verteilen sich folgendermassen: EFH 4 %, MFH 36 %, DLG 36 %, PRG 1 % und übrige 24 %. Der Anteil für die übrigen Gebäude ist so hoch, weil ihnen im Modell ein relativ grosser Anteil an Erschliessungsstrassen beigemessen wird.

Ein beträchtlicher Anteil des Outputs von Kies/Sand stammt aus den PRG (32 %), da diese Nutzungskategorie eine hohe Rückbauquote aufweist. Die anderen Nutzungen tragen die



Kies	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	175	6575	122	54
Infrastruktur	376	20632	0	376
Total	551	27207	122	430

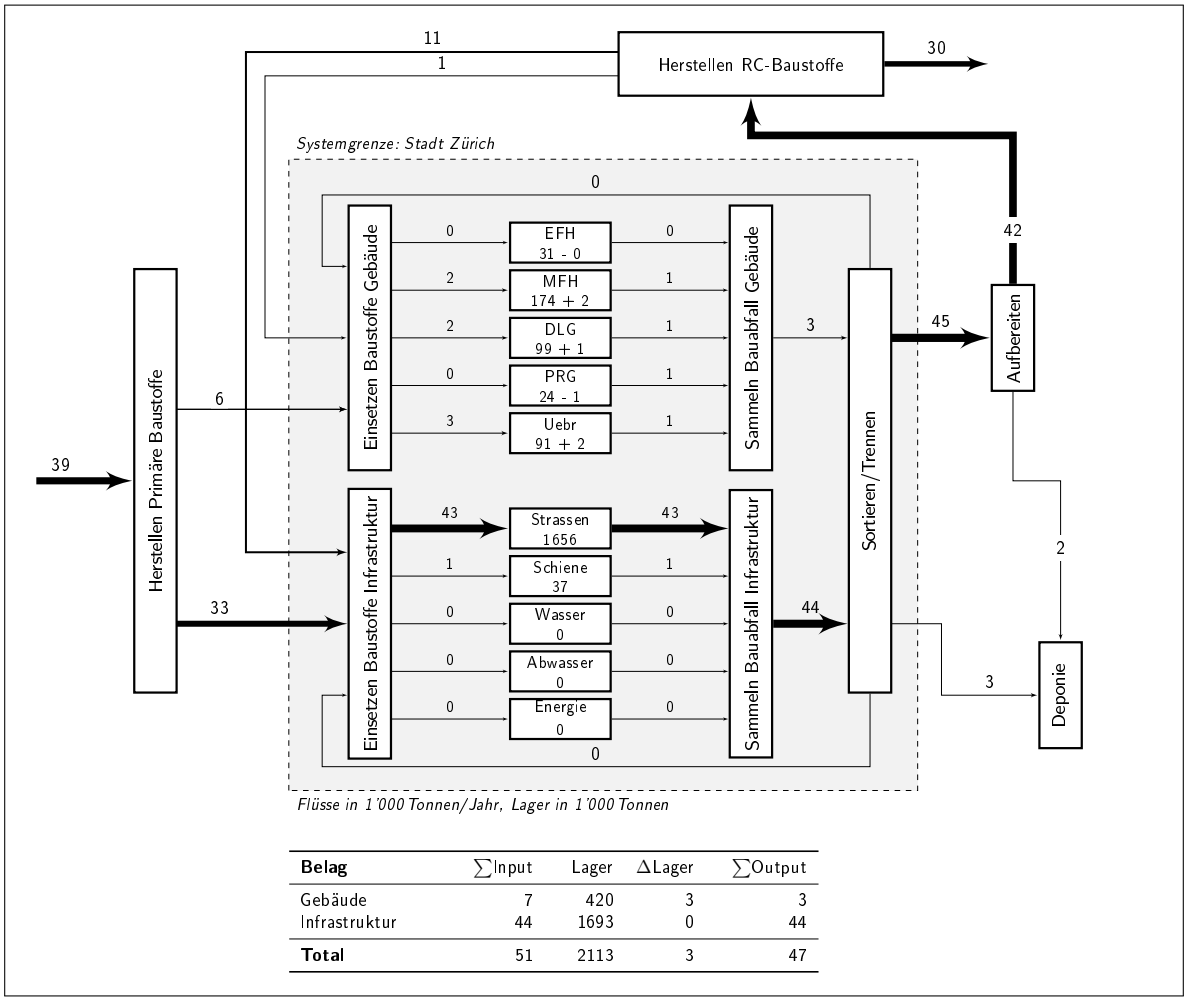
Figur 3-15: Die Kies-/Sandflüsse sowie ihre Lager in der Stadt Zürich im Jahr 2005 in 1'000 t/a. Kies/Sand wird vorwiegend in der Infrastruktur eingesetzt.

folgenden Anteile bei: EFH 4 %, MFH 16 %, DLG 30 % und Übrige 17 %. In der Infrastruktur verteilen sich die Inputflüsse wie folgt: In die Strassen und in die Energieversorgung fliessen jeweils 30 %, Schiene 13 %, Wasser 17 % und Abwasser 10 %. Die Outputflüsse, total 439'000 t/a, stammen zu 86 % aus der Infrastruktur und nur zu 14 % aus den Gebäuden.

In der Stadt Zürich wird viel weniger RC-Kies/Sand eingesetzt, als in die Aufbereitung gelangt. 60 % des aufbereiteten Materials wird in das Umland verschoben. Hier liegt ein beträchtliches Potenzial für den stärkeren Einsatz von RC-Material. Diese könnte vor allem für den Bau von Strassen und Infrastrukturnetzen eingesetzt werden. Auch dieser Aspekt wird im Abschnitt 4 weiter diskutiert.

Die Summe der Inputflüsse von Kies/Sand liegt mit 554'000 t/a etwas höher als die Summe der Outputflüsse (432'000 t/a). Das Lagerwachstum von Kies/Sand ist mit 122'000 t/a oder ca. 0.45 % relativ gering, weil bei der Infrastruktur von einem Fliessgleichgewicht ausgegangen wird und der Beitrag aus dem Hochbau deutlich tiefer ist als bei der Infrastruktur.

Belagsmaterial Wie in der Figur 3-16 zu sehen, werden 45'000 t/a Belagsmaterial im öffentlichen Strassenbau eingesetzt. Da die Erschliessung der Parzellen den Gebäuden zugeordnet



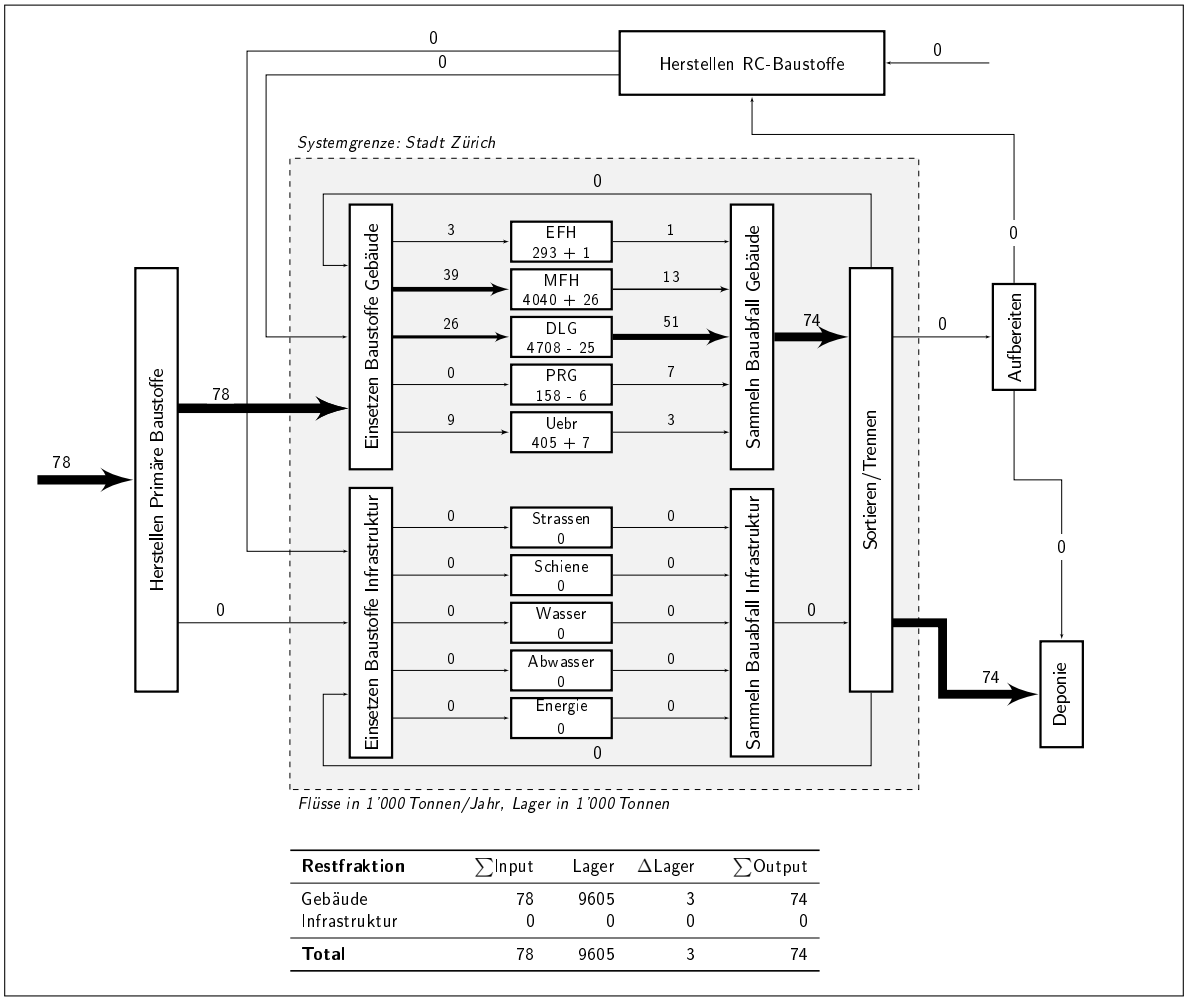
Belag	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	7	420	3	3
Infrastruktur	44	1693	0	44
Total	51	2113	3	47

Figur 3-16: Die Flüsse und Lager von Belagsmaterial in der Stadt Zürich im Jahr 2005 in 1'000 t/a. Der grösste Teil des Belages wird im Strassenbau der Infrastruktur eingesetzt.

wird, beträgt der Anteil am Gesamtfluss des Belages für den Hochbau 13 % oder in absoluten Zahlen 7'000 t/a. In der Infrastruktur wird von einem Fliessgleichgewicht ausgegangen, daher verlassen auch 45'000 t/a Belagsmaterial den Strassenbau. Insgesamt sind die umgesetzten Mengen von Belagsmaterial im Vergleich zu den anderen Materialien eher klein. Da das Belagsmaterial vorallem für die Infrastruktur benötigt wird, findet nur ein geringer Lageraufbau von 3'000 t/a in der Erschliessung der Gebäude statt.

Auch beim Belagsmaterial wird das Potenzial für die Wiederverwendung innerhalb der Stadtgrenze nur ungenügend ausgenutzt: Der grösste Teil des Inputs ist Primärmaterial, die Outputflüsse aus der Aufbereitung gehen in das Umland und sind damit dem internen Materialkreislauf entzogen.

Mineralische Restfraktion Die Materialien Gips, Keramik und Glas (78'000 t/a) gelangen vollumfänglich in die Gebäude. Sie verteilen sich analog den anderen Flüssen mehrheitlich auf die MFH (50 %) und DLG (33 %). Die anderen Nutzungen benötigen 3 % (EFH), 1 % (PRG) und 12 % (Uebr). Der totale Output ist bei diesen Materialien fast so gross wie der Input, nämlich 74'000 t/a. Diese stammen zu 68 % aus den DLG und zu 17 % aus den MFH. Die Beiträge aus den EFH, PRG und den Übrigen liegen unter 10 % .



Restfraktion	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	78	9605	3	74
Infrastruktur	0	0	0	0
Total	78	9605	3	74

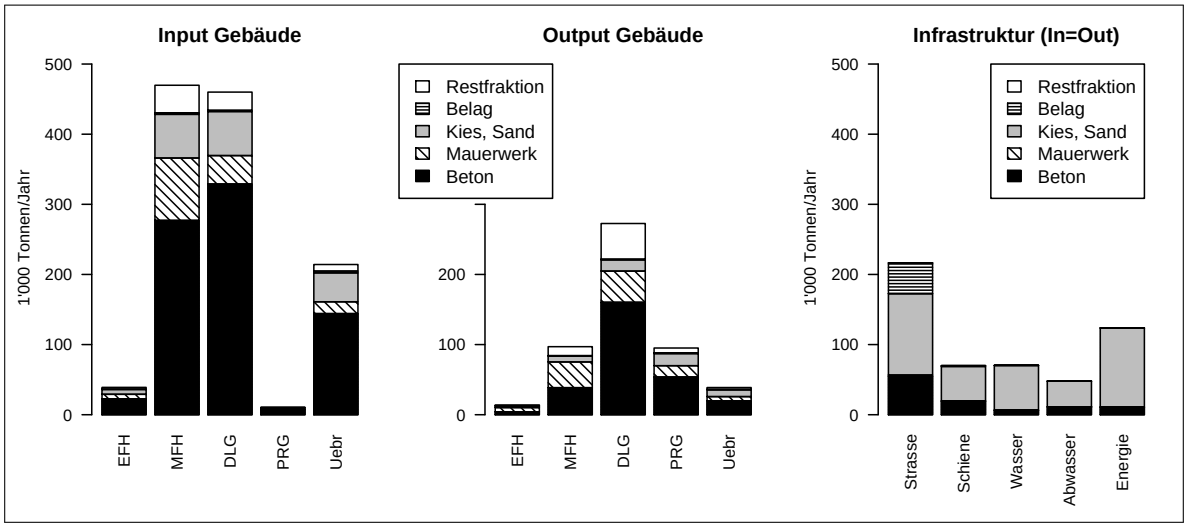
Figur 3-17: Die Lager und Flüsse der mineralischen Restfraktion (Gips, Keramik, Glas) im Jahr 2005 in 1'000 t/a. Diese Fraktion wird nach den Annahmen des Modells vollständig deponiert.

Die mineralische Restfraktion geht nach den Annahmen der Modellbildung vollständig in die Deponie und ist damit der Wiederverwertung entzogen (Figur 3-17).

Die Zusammenfassung der Lager, Input und Outputflüsse

Um einen Überblick über die vielen Input- und Outputflüsse zu erhalten, sind diese in der Figur 3-18 nach Nutzungskategorie und Material zusammengefasst. Bei den Gebäuden ist das Wachstum der Stadt gut ersichtlich. Die Summe der Inputflüsse ist erheblich grösser als die Summe des Outputs. In dieser Darstellung wird erneut deutlich, dass die MFH und DLG nicht nur den Gebäudebestand sondern auch die Materialflüsse dominieren. Auf die grossen Inputflüsse in die Kategorie «Übrige Gebäude» wird weiter unten eingegangen. Zu erkennen ist auch hier wieder der höhere Betonanteil bzw. die hohen Betonflüsse beim Input im Vergleich zum Output, was wiederum das hohe Betonlagerwachstum im Hochbau erklärt (siehe Figuren 3-11 und 3-13).

In der Tabelle 3-2 sind die Raten der Materialflüsse im Verhältnis zu ihrem Lager aufgeführt. Auffallend ist die hohe Inputrate von 3.6 % bei den übrigen Gebäuden (Uebr). Aus der Statistik der Gebäude kann gezeigt werden, dass in den Jahren 2002-2005 überdurchschnittlich



Figur 3-18: Vergleich der Input- und Outputflüsse für das Jahr 2005 in 1'000 t/a. Der Input in die Gebäude verteilt sich zu grossen Teilen auf die MFH und DLG. Die Outputflüsse aus den Gebäuden werden hingegen von den DLG dominiert. Die Flüsse der Infrastruktur umfassen nur Beton, Kies/Sand und Belag; die mineralische Restfraktion ist der Vollständigkeit halber ebenfalls aufgeführt.

viele Parkhäuser und Autoeinstellhallen gebaut wurden (jeweils um 2.5 %, vgl. Tabellen A-10 und A-11 im Anhang). Diese haben ein grosses Gebäudevolumen und beeinflussen damit die Materialflüsse stark.

Die Outputflüsse der Gebäude werden von den DLG dominiert. Diese weisen einerseits eine relativ hohe Rückbaurate aber vor allem eine sehr hohe Umbau- und Sanierungsrate auf (siehe Figur 3-19). Daher ist der Beitrag dieser Kategorie zu den geamten Outputflüssen mit Abstand am grössten. Die PRG tragen ebenfalls mehr zum Output bei, als ihr Anteil am Bestand erwarten lässt. Der hohe Output-Wert von 4.6 % der Produktionsgebäude (PRG) widerspiegelt den Rückzug der Industrie in der Stadt. Viele PRG werden abgebrochen und durch Dienstleistungs- und Wohngebäude ersetzt.

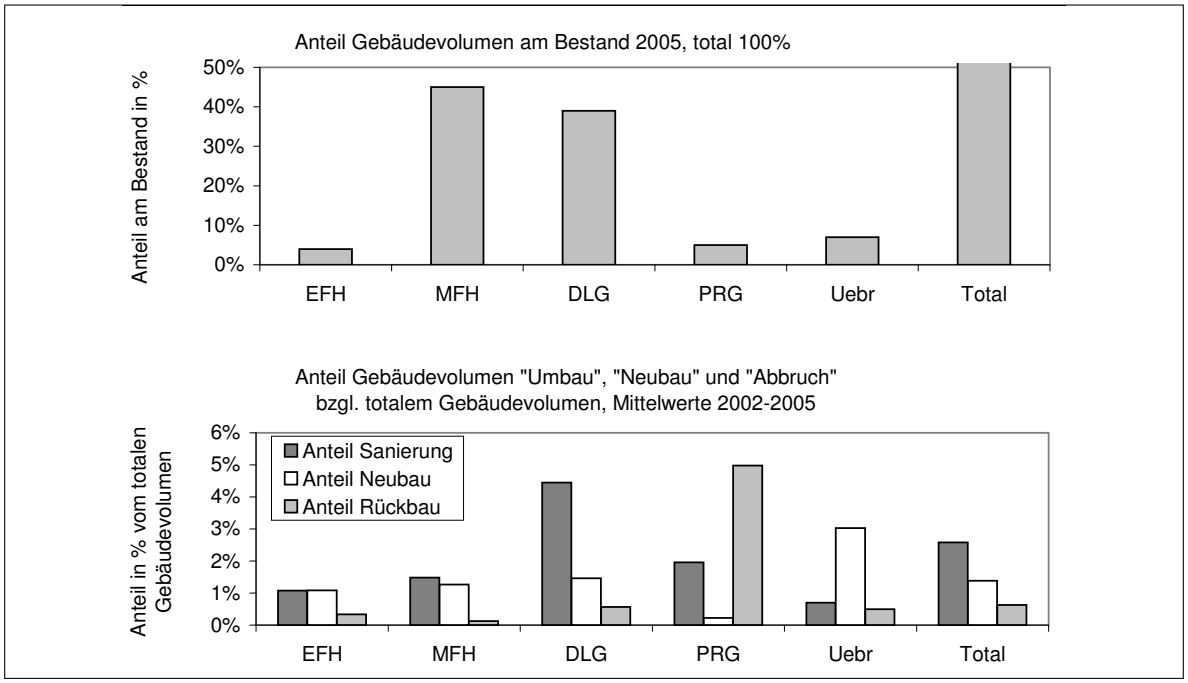
Bei der Infrastruktur entsprechen die Raten den Erneuerungsraten der Netze, da das Gesamtvolumen – als Modellannahme – konstant bleibt. Hier haben die Schienen den höchsten Wert, nämlich 3.3 %. Die Abwasserleitungen und -kanäle haben eine Lebenserwartung von 100 Jahren, was einer Erneuerungsrate von 1.0 % entspricht. Die Erneurungsraten der restlichen Kategorien liegen dazwischen. Die Zahlenwerte sind in der Tabelle A-15 aufgeführt.

In der Figur 3-19 sind die Anteile der Gebäudenutzungskategorien am totalen Gebäudevolumen (oben) und die dazugehögigen Sanierungs-, Neubau- und Rückbauraten (unten) aufgeführt. Interessant sind dabei die sehr unterschiedlichen Raten bei den Nutzungskategorien. Während sich die verschiedenen Raten bei den Wohngebäuden (EFH und MFH) auf einem vergleichbaren Niveau bewegen. Sieht dies bei den verbleibenden Nutzungskategorien anders aus:

Bei den DLG dominiert, wie bereits oben erwähnt, der Umbau mit einer rund vier Mal höheren Umbaurate als bei den Wohngebäuden. Auch die Rückbaurate ist deutlich höher als bei den Wohnbauten. Da auch das DLG-Lager hoch ist, sind die Input- und Outputflüsse bei den Dienstleistungsgebäuden entsprechend gross (Figur 3-18). Die hohen Umbauraten bei den DLG hängen mit der intensiveren Nutzung (hohe Fluktuation), den unterschiedlichen Ansprüchen der Nachmieter und dem schnelleren Wandel der Bedürfnisse der Nutzer zusammen. Zudem ist die Leerstandsziffer bei den DLG um Faktoren höher als beim Woh-

Tabelle 3-2: Die Input- und Outputflüsse als Rate in Prozent des Lagers (bezüglich den Massen). Auffallend sind die hohen Werte beim Input in die Nutzungskategorie «Übrige» (3.6 %). Der Rückgang der Produktionsgebäude in der Stadt Zürich zeigt sich mit 4.6 % bei den Outputflüssen: Es werden viele PRG abgebrochen. Die Erneuerungsraten der Infrastruktur liegen zwischen 1.0-3.3 %.

	Gebäude		**Infrastruktur**	
	Input	**Output**	**Input = Output**	
	Rate in %	Rate in %		Rate in %
EFH	1.3 %	0.5 %	**Strasse**	1.8 %
MFH	1.5 %	0.3 %	**Schiene**	3.3 %
DLG	1.8 %	1.0 %	**Wasser**	1.8 %
PRG	0.5 %	4.6 %	**Abwasser**	1.0 %
Uebr	3.6 %	0.6 %	**Energie**	2.0 %
Total	**1.7 %**	**0.8 %**	**Total**	**1.8 %**



Figur 3-19: Vergleich des Bestandes (oben) und der Sanierung-, Neubau- und Rückbauanteile (unten) nach den verschiedenen Nutzungskategorien in %. Auffallend sind die hohe Umbaurate der DLG und die sehr hohe Rückbaurate (Abbruch) der PRG. Aber auch die Neubaurate der Kategorie «Uebr» (übrige Gebäude) ist überdurchschnittlich hoch. *Quelle: Statistik Stadt Zürich*

nen, was die Investoren zwingt, ihre DLG-Infrastruktur den Bedürfnissen der Nachfrage anzupassen [Wüest & Partner, 2005].

Bei den PRG sind die Umbaurate und vor allem die Rückbaurate sehr hoch, während die Neubaurate tief ist. Hier zeigt sich nochmals deutlich der Trend zur Umnutzung und zum Rückbau der PRG in den Industriegebieten in der Stadt Zürich hin zu den Dienstleistungs- und Wohngebäuden, welcher seit knapp zwanzig Jahren stattfindet. Die hohen Sanierung- und Rücktätigkeiten bei den PRG führen trotz des relativ kleinem Anteils am Gesamtgebäudevolumen zu erheblichen Outputflüssen (Figur 3-18).

Tabelle 3-3: Die Input- und Outputflüsse des Prozesses «Gebäude» geordnet nach Neubau, Sanierung und Abbruch in Tonnen pro Jahr (t/a) und in %.

	Input		**Output**	
	t/a	%	t/a	%
Sanierung	163'000	14 %	170'700	33 %
Neubau	1'030'500	86 %	31'800	5 %
Abbruch	0	0 %	315'000	61 %
Total	1'193'500	100 %	517'500	100 %

Die Zusammensetzung der Materialflüsse aus den Gebäuden

Die Input- und Outputflüsse können auch nach Bauaktivitäten (Neubau, Sanierung, Abbruch) differenziert werden (Tabelle 3-3). Die Baustoffe, welche für Neubauten und für Sanierungen benötigt werden, entsprechen dem Input. Über 80 % des Inputs von 1.3 Mio. Tonnen werden für den Neubau von Gebäuden verwendet, und nur 20 % für Umbauten und Sanierungen. Von den 0.6 Mio. Tonnen der mineralischen Rückbaumaterialien stammen 5 % aus dem Neubau (3 % des Neubaumaterials), 43 % aus den Umbauten und Sanierungen und 52 % aus den Rückbauten. Es ist damit gut zu erkennen, dass der Rückbau von Gebäuden einen grossen Einfluss auf die Outputflüsse hat.

3.5 Kennzahlen

Um die Ergebnisse mit anderen Studien vergleichen zu können, bietet es sich an, aus den Ergebnissen Kennzahlen zu verschiedenen Bezugsgrössen zu bilden. Die Tabelle 3-4 zeigt die wichtigsten Kennzahlen bezüglich Rauminhalt (Volumen in m^3), Einwohner und Materialmengen (in Tonnen). Als Beispiel sei der Kennwert «Tonnen pro Einwohner» (t/cap, bzw. t/cap·a) beschrieben. Er befindet sich in der Spalte «Einwohner» in den letzten drei Zeilen (Lager, Input- und Outputfluss). Das Materiallager umfasst 274 t/cap. Die Inputflüsse betragen 4.94 t/(cap·a), d. h. fast 5 t/(cap·a). Die Outputflüsse sind hingegen mit knapp 3 t/(cap·a) viel tiefer – auch hier ist wieder festzustellen, dass die Stadt Zürich bezüglich den Materiallagern weiterhin am wachsen ist.

In dieser Art wurde eine umfangreiche Tabelle zu den neun Kenngrössen Bruttogeschossfläche, Rauminhalt, Einwohner, Arbeitsplätze, Gebäude (Anzahl), Netzlänge, Material Gebäude, Material Infrastruktur und Material Total zusammengestellt. Sie ist auf Anfrage bei den Autoren erhältlich.

Tabelle 3-4: Die wichtigsten Kennzahlen zu den Materiallagern und der Input- und Outputflüssen für das Jahr 2005. Für das Lager stehen auf der Diagonalen jeweils die absoluten Werte der Bezugsgrösse, ober- und unterhalb die Kennwerte der entsprechenden Zeile oder Spalte. Zu den Input- und Outputflüssen sind nur die totalen Materialflüsse eingetragen.

Lager	**Rauminhalt**		**Einwohner**		**Material Total**	
Rauminhalt	165'630'000	m^3	452	m^3/cap	8.03	m^3/t
Einwohner	0.002	cap/m^3	366'800	cap	0.02	cap/t
Material Total	0.607	t/m^3	274	t/cap	100'592'919	Tonnen
Input-Flüsse	0.011	t/(m^3·a)	4.94	t/(cap·a)	1'810'335	t/a
Output-Flüsse	0.006	t/(m^3·a)	2.90	t/(cap·a)	1'063'019	t/a

4 Diskussion

4.1 Vergleiche mit anderen Studien

Vergleich mit der Studie des BUWAL von 2001 für die Schweiz

In der Studie des BUWAL (heute BAFU) «Bauabfälle Schweiz» wurden die Lager und totalen Materialflüsse aus Hoch- und Tiefbau (Gebäuden und Infrastruktur) für das Jahr 1997 berechnet und für das Jahr 2010 mit einem Modell abgeschätzt [BUWAL, 2001]. Diese Werte können in Tonnen pro Einwohner umgerechnet und so mit den Werten der Stadt Zürich verglichen werden. In den Tabellen 4-1 und 4-2 sind die Resultate für die Stadt Zürich denjenigen aus der BUWAL-Studie gegenübergestellt. In der Tabelle A-13 sind die Bevölkerungszahlen für die Schweiz, den Kanton Zürich und die Stadt Zürich aufgeführt.

Gebäude Es zeigt sich, dass die Resultate für die Materiallager (hier handelt es sich um *alle* Materialien, nicht nur um die mineralischen Baustoffe) in den Gebäuden sehr gut mit der BUWAL-Studie übereinstimmen. Für die Schweiz werden total 188 t/cap angegeben, im Vergleich dazu ist dieser Wert für die Stadt Zürich mit 195 t/cap etwas höher. Die Abweichung ist gering und kann mit dem höheren Anteil der DLG in der Stadt Zürich erklärt werden.

Tabelle 4-1: Vergleich der Materiallager und -flüsse der Gebäude für die Schweiz und für die Stadt Zürich in t/cap. Die Werte der Lager stimmen gut überein. Hingegen sind die Outputflüsse in der Stadt Zürich höher als die Angaben für die Schweiz. Das kann durch den grossen Anteil der DLG in der Stadt und die hohe Abbruchrate bei den PRG erklärt werden.
Quellen: Statistik Stadt Zürich, BFS, [BFS, 2005], [BUWAL, 2001], eigene Berechnung.

Gebäude	Stadt Zürich 2005	Schweiz 1997
Materiallager		
Eigene Berechnung	195 t/cap	
BUWAL, 2001		188 t/cap
Outputflüsse		
Eigene Berechnung	1.47 t/(cap·a)	
BUWAL, 2001		0.72 t/(cap·a)
Erneuerungsrate		
Eigene Berechnung	0.75 %	
BUWAL, 2001		0.39 %

Die entsprechenden Werte für die Outputflüsse weichen hingegen stark voneinander ab. Die mit dem Modell berechneten Outputflüsse der Stadt Zürich sind mit 1.47 t/cap rund doppelt so hoch wie diejenigen des BUWAL (0.72 t/cap). Die Unterschiede lassen sich wie folgt erklären: Die Outputflüsse aus den Gebäuden der Stadt Zürich sind viel höher, weil der Anteil der DLG in der Stadt Zürich erheblich grösser ist als auf der Ebene Schweiz. Wie im Resultatteil gezeigt wurde, sind vor allem die die Outputflüsse aus den Umbauten der DLG gross (Figuren 3-18 und 3-19). Die hohe Umbauaktivität im Bereich der DLG hängt teilweise mit den hohen Leerstandziffern von DLG in der Stadt Zürich zusammen. Einerseits bedeutet die hohe Leerstandsziffer für die Investoren, dass sie sich den wechselnden Ansprüchen

Tabelle 4-2: Vergleich der Materiallager- und -flüsse der Infrastruktur für die Schweiz und die Stadt Zürich auf Pro-Kopf-Basis in t/cap bzw. t/cap*a. Zusätzlich zu den Angaben aus der BUWAL-Studie wurden die Materialmengen der Infrastrukturnetze der Schweiz mit der eigenen Methode abgeschätzt.
Quellen: Statistik Stadt Zürich, BFS, [BFS, 2005], [BUWAL, 2001], eigene Berechnung.

Infrastruktur	Stadt Zürich 2005	Schweiz 1997
Materiallager		
Eigene Berechnung	79 t/cap	*127 t/cap**
BUWAL, 2001		99 t/cap
BFS, 2005		111 t/cap
Input- und Outputflüsse		
Eigene Berechnung	1.43 t/cap	*1.44 t/cap**
BUWAL, 2001		0.87 t/cap
Erneuerungsrate		
Eigene Berechnung	1.81 %	*1.13 %**
BUWAL, 2001		0.88 %

* *Eigene Abschätzung*

der Mieter/Käufer anpassen müssen. Andererseits ist der Wechsel in ein anderes Gebäude für Mieter/Käufer von DLG-Räumen unter diesen Bedingungen kein Problem. Die damit zusammenhängende Dynamik ist in der Stadt Zürich viel stärker ausgeprägt als auf der gesamtschweizerischen Ebene. Auch bei den PRG sind relativ grosse Outputflüsse feststellbar. Die hohen Outputflüsse sind vor allem auf die hohe Rückbautätigkeit (Figur 3-18) in dieser Kategorie zurückzuführen. Allerdings sind die Umbauraten mit über 2 % ebenfalls relativ hoch.

Das Verhältnis von Outputfluss pro Einwohner zum Lager pro Einwohner entspricht der «Erneuerungsrate». Für die Stadt Zürich ist diese mit 0.75 % aus den erwähnten Gründen deutlich höher als in der Schweiz (0.39 %)

Infrastruktur In der Tabelle 4-2 sind die Materiallager und -flüsse in den Infrastrukturnetzen der Stadt Zürich und der Schweiz auf Pro-Kopf-Basis aufgeführt [BUWAL, 2001]. Zusätzlich sind bei den Materiallagern und -flüssen weitere Werte («Eigene Berechnungen») für die Schweiz angegeben. Diese basieren auf den Strassenflächen und Netzlängen aus der BUWAL-Studie, sowie weiteren Daten zur Materialisierung der Infrastruktur, welche auch für die Stadt Zürich verwendet wurden. Die Werte zu den Pro-Kopflagern wurden mit einem weiteren Wert aus einer anderen Quelle ergänzt [BFS, 2005].

Die Ergebnisse der Materiallager in den Infrastrukturnetzen decken sich mit den Erwartungen: In der Stadt Zürich ist die Bevölkerungsdichte mit rund 4'000 Einwohner pro Quadratkilometer (cap/km^2) viel grösser als die Bevölkerungsdichte der Schweiz (172 cap/km^2). Die hohe Bevölkerungsdichte und die damit verbundene höhere Dichte an Gebäuden führt dazu, dass zur Erschliessung der Gebäude (Infrastrukturnetze und Verkehrswege) kürzere Wege zurückgelegt werden müssen. So sind die Verkehrsflächen auf Pro-Kopf-Basis in der Stadt Zürich nur rund ein Viertel so gross wie dies für die ganze Schweiz der Fall ist (vgl. Tabelle 4-3). Auch die anderen Verkehrswege und Infrastrukturnetze unterscheiden sich in

Tabelle 4-3: Vergleich der Verkehrsflächen und Infrastrukturnetzlängen pro Kopf für die Stadt Zürich und die gesamte Schweiz. *Quelle: [BUWAL, 2001], eigene Berechnung*

	Stadt Zürich	**Ganze Schweiz**
	m^2/cap	m^2/cap
Strassenfläche	16.4	61.0
Übriger Verkehr	8.2	28.2
Schiene	4.4	6.7
Kunstbauten	1.7	N.B.*
	m/cap	m/cap
Trinkwasser	3.1	6.5
Abwasser	2.5	4.9
Gas	2.2	1.6
Strom	5.8	5.7
Fernwärme	0.4	0.0

* *nicht bekannt*

gleicher Weise. Eine Ausnahme bilden die Energienetze, welche in der Stadt Zürich dichter sind als auf der Ebene Schweiz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese in der Stadt fast vollumfänglich im Boden verlegt werden, während in ländlichen Gebieten auch viele Freiluftleitungen vorhanden sind. Hier werden aber nur die unter der Erde verlaufenden Leitungen berücksichtigt. Der im Vergleich zur Ebene Schweiz tiefere Wert des Materiallagers in der Stadt Zürich von 79 t/cap (Schweiz: 99–127 t/cap), kann also mit der hohen Gebäudedichte in der Stadt begründet werden.

Die Pro-Kopf-Daten für die jährlichen Materialflüsse weichen noch stärker von der BUWAL-Studie ab: Für die Stadt Zürich werden 1.43 t/(cap·a) berechnet, für die Schweiz liegt der Wert gemäss der BUWAL-Studie bei 0.87 t/(cap·a). Der Sachverhalt ist also bei den Flüssen im Vergleich zu den Lagern genau umgekehrt. In der Stadt ist der jährliche Pro-Kopf-Materialbedarf beinahe doppelt so hoch wie auf der Ebene Schweiz. Der Grund dafür ist die viel intensivere Nutzung der Infrastruktur. Die damit verbundene hohe Belastung geht mit einer erhöhten Erneuerungsrate einher. Für das Modell stehen sehr detaillierte Daten der Netzbetreiber zur Verfügung, so dass von einer guten Datenqualität zur Berechnung der Flüsse in der Stadt Zürich ausgegangen werden kann.

Der tiefe Wert der BUWAL-Studie von 0.87 t/(cap·a) kontrastiert mit der eigenen Abschätzung für die Materialflüsse auf der Ebene Schweiz, welcher mit 1.13 % einer Lebensdauer von gut 90 Jahren entspricht. Offenbar wurden in der BUWAL-Studie andere Grundlagen und Annahmen eingesetzt; leider ist das aus den dortigen Angaben nicht zu rekonstruieren. Werden die Werte für die Flüsse ins Verhältnis zum Lager gesetzt, resultieren die Erneuerungsraten. Diese liegen für die Stadt Zürich bei 1.81 %, nach der BUWAL-Studie hingegen werden in der Schweiz nur 0.88 % der Infrastrukturnetze erneuert.

Vergleich mit einer weiteren Studie [Lichtensteiger, 2006]

Die Materiallager für die Schweiz wurden in einer weiteren Studie ebenfalls abgeschätzt [Lichtensteiger, 2006, Tabelle A-30]. Gemäss dieser Studie lagern gegen Ende des 20. Jahrhunderts in der Schweiz rund 400 Tonnen Material pro Einwohner, davon sind 97 % minerali-

sche Materialien. Unsere Berechnung liefert den Wert von 275 t/cap, wovon 95 % mineralische Materialien sind. Während die Anteile der mineralischen Baustoffe mit 95 % bzw. 97 % gut übereinstimmen, bestehen beträchtliche Unterschiede bei den mineralischen Materiallagern. Die Unterschiede lassen sich einerseits mit der dichteren Bauweise in der Stadt Zürich erklären, welche pro Kopf weniger Material benötigt, andererseits wurden in der besagten Studie die Lagerbestände in den weiteren Infrastrukturbauten, wie z. B. den militärischen Bauten, Staumauern, Tunnels usw. im Rahmen einer Diplomarbeit detailliert erhoben. Diese Beiträge führen zu den höheren Werten in [Lichtensteiger, 2006].

Vergleich Input/Output-Studien (Kies, Beton, Zement, Deponien)

Für eine grobe Validierung der Materialflüsse können Daten von Unternehmen, Verbänden oder Kantonen hinzugezogen werden. So sind in der Tabelle 4-4 die Input- und Outputflüsse von verschiedenen Materialien aus unterschiedlichen Datenquellen aufgeführt. Die Werte für die Stadt Zürich können so den Werten des Statistischen Amtes des Kantons Zürich und des BFS sowie den Daten der Verbände CemSuisse (Verband der Schweizerischen Zementindustrie), ARV (Aushub-, Rückbau- und Recyclingverband Schweiz) und FSKB (Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie) gegenübergestellt werden. Bei den Inputflüssen werden die Pro-Kopf-Flüsse von Beton und Kies verglichen. Bei den Outputflüssen sind die totalen Materialoutputs in die Verwertung und Entsorgung angegeben.

Die Inputmengen von Beton betragen nach dem Modell für die Stadt Zürich rund 2.4 t/(cap·a) oder 883'000 Tonnen/a insgesamt. Für den Kanton Zürich lässt sich aus Daten von CemSuisse der Wert von 5 t/(cap·a) hochrechnen. Auf der Ebene Schweiz liegt der Betonbedarf bei 4.9 t/(cap·a) [BFS, 2007]. Der Betonbedarf pro Kopf und Jahr in der Stadt Zürich ist damit nur halb so gross wie derjenige des Kantons Zürich oder der Schweiz.

Das hat verschiedene Gründe:

1. In der Stadt Zürich werden keine grossen Tiefbauvorhaben wie die NEAT oder der Uetlibergtunnel umgesetzt. Allgemein ist zu erwähnen, dass der Betonbedarf für den Tiefbau in der Stadt Zürich mit einem Anteil von ca. 12 % am gesamten Betonbedarf viel tiefer liegt als beispielsweise auf der Ebene Schweiz, wo der Tiefbauanteil bei ca. 30 % liegen dürfte.

2. Das Gebäudevolumenwachstum im Kanton Zürich ist schon seit längerer Zeit höher als in der Stadt Zürich. Zwischen 2001 und 2005 hat sich diese Tendenz erheblich verstärkt (Figur 4-1). Während sich das Wachstum in der Stadt Zürich im besagten Zeitraum von 0.92 % auf 0.67 % reduziert hat, nahm das Wachstum im Kanton von 1.07 % auf 1.30 % zu. Damit ist das Wachstum im Kanton heute beinahe doppelt so hoch wie in der Stadt Zürich. Das hat somit auch einen grösseren Betonbedarf im Kanton zur Folge.

3. Die Zahlen für den Kanton und die Schweiz wurden aus den Zementlieferungen berechnet. Da ein Teil des Zementes für Mauerwerk und andere «nicht-Beton-Anwendungen» eingesetzt wird, sind diese Werte eher an der oberen Grenze.

Der Vergleich der Outputflüsse zeigt hingegen ein anderes Bild (Tabelle 4-4). Die Outputflüsse der Stadt Zürich sind höher als die Werte für den Kanton Zürich und die Schweiz. Die Zahlen für den Kanton Zürich sind im Vergleich zur BUWAL-Studie je nach Quelle höher oder tiefer, insgesamt aber tiefer als die Werte der Stadt Zürich.

Tabelle 4-4: Vergleich der eigenen Berechnung der Input- und Outputflüsse mit verschiedenen Publikationen und Daten der Fachverbände für den Kanton Zürich und die Schweiz.

Inputflüsse		**Input Beton** t/(cap·a)	**Kies für Beton** t/(cap·a)	**Kies/Sand, Belag** t/(cap·a)	**Kies Total** t/(cap·a)	**Quelle**
	Stadt Zürich	2.41	2.02	1.48	3.50	[1]
	Kanton Zürich	5.07	4.06			[2]
	Schweiz	4.86	3.88	2.48	6.37	[3]
Outputflüsse		**Output Total** t/(cap·Jahr)	**in Deponie** t/(cap·Jahr)	**in Aufbereitung** t/(cap·Jahr)	**Rest, in KVA etc.** t/(cap·Jahr)	**Quelle**
	Stadt Zürich	2.90	0.20	2.37	0.34	[1]
	Kanton Zürich	1.28	0.02	1.23		[4]
	Kanton Zürich	2.21	0.08	2.14		[5]
	Kanton Zürich	-	0.13	-		[6]
	Kanton Zürich	-	-	0.97		[7]
	Schweiz	1.60	0.22	1.21		[8]

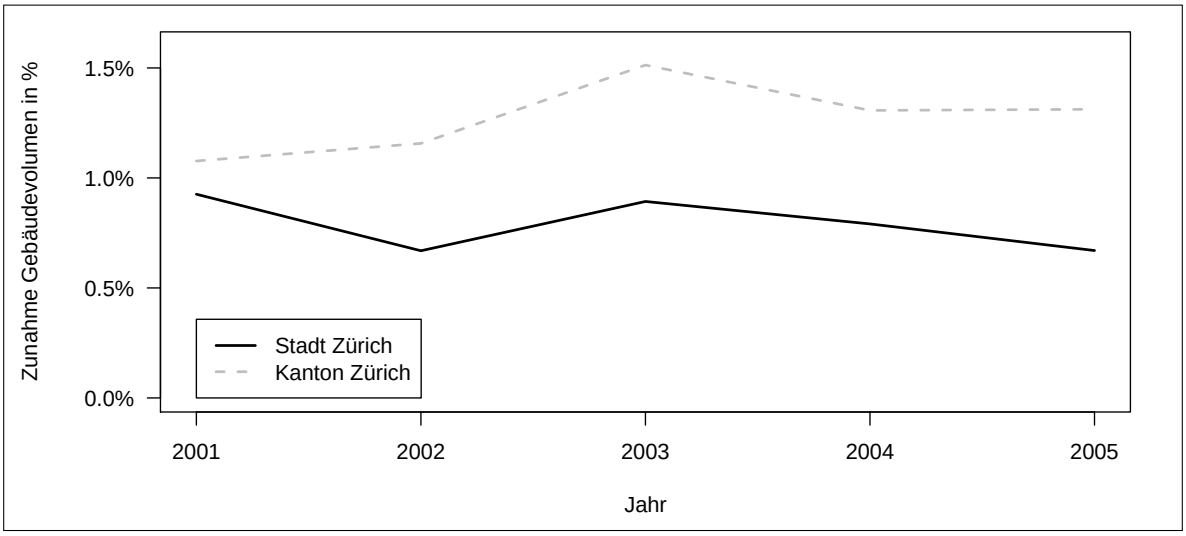
Quellen

[1] Eigene Berechnung
[2] CemSuisse für Kt. ZH, Zahlen von 2000-2003, www.cemsuisse.ch
[3] [BFS, 2007]
[4] STATISTIK.INFO: 21/2005, Statistisches Amt des Kantons Zürich
[5] Kanton ZH: Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Planung 2007-2010, S. 41ff
[6] Deponiestatistik des Kantons Zürich 2005
[7] ARV und FSKB, Zahlen für den Kanton Zürich
[8] [BUWAL, 2001]

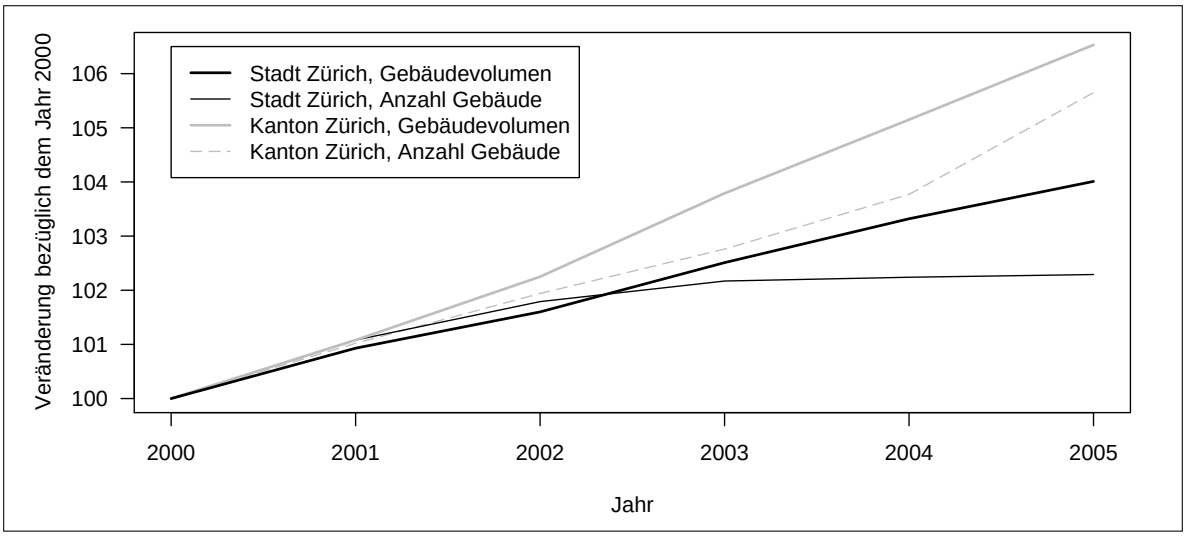
ARV: Aushub-, Rückbau- und Recyclingverband Schweiz
CemSuisse: Verband der Schweizerischen Cementindustrie
FSKB: Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie

In der Figur 4-2 ist die Entwicklung der Gebäudevolumen und Gebäudeanzahl auf indexierter Basis (Jahr 2000) dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede zwischen der Stadt Zürich und dem Kanton Zürich zu erkennen. Während bei den Gebäudevolumen und Gebäudezahlen auf kantonaler Ebene (graue Linien) ein ähnlicher Verlauf erkennbar ist, sieht dies bei der Stadt Zürich (schwarz) anders aus. Hier laufen die Werte ab 2002 deutlich auseinander. Das Gebäudevolumen nimmt zwar noch immer kontinuierlich zu, wenn auch weniger stark als auf kantonaler Ebene, aber die Gebäudeanzahl nimmt ab dem Jahr 2002 nicht mehr zu. Dies bedeutet, dass vermehrt alte Gebäude durch neue Gebäude ersetzt werden, welche grössere Gebäudevolumen aufweisen als die alten Gebäude. Die damit zusammenhängende höhere Rückbautätigkeit führt dann auch zu den höheren Outputflüssen aus dem Hochbau. Wie in der Tabelle 4-5 zu sehen ist, werden tatsächlich in der Stadt Zürich deutlich mehr Wohngebäude abgebrochen, als das für die Schweiz und den Kanton Zürich der Fall ist.

Hinzu kommen die im Vergleich zum Kanton Zürich und zur Schweiz höheren Output-



Figur 4-1: Jährliches Gebäudevolumenwachstums von 2001 bis 2005 in % für die Stadt Zürich und den Kanton Zürich. *Quelle: Statistik Stadt Zürich, Stat. Amt Kanton Zürich*



Figur 4-2: Indexierte Entwicklung der Gebäudevolumen und Gebäudeanzahl für die Stadt Zürich und den Kanton Zürich zwischen 2000 und 2005 (Basisjahr des Index: 2000 = 100).
Quelle: Statistik Stadt Zürich, Stat. Amt Kanton Zürich

flüsse aus der Infrastruktur. Es wurde bereits erwähnt, dass die Erneuerungsraten in der «Infrastruktur» aufgrund der intensiveren Nutzung deutlich höher liegen als auf der Ebene Schweiz.

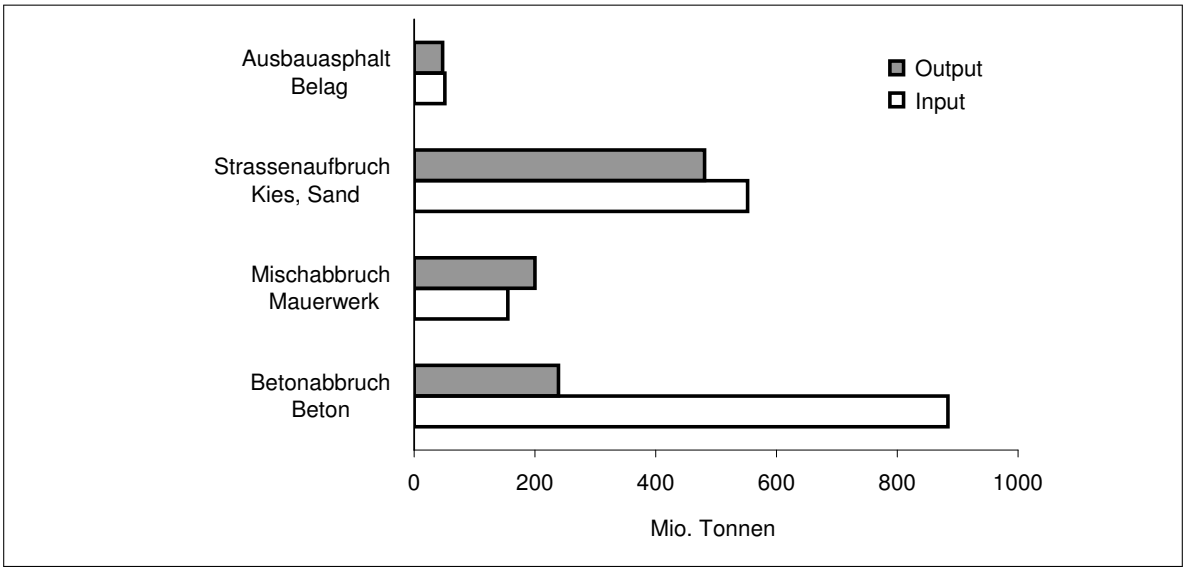
Der Vergleich mit den Angaben der Verbände und Zahlen des Kantons Zürich ergibt also ein widersprüchliches Bild. Die Outputflüsse sind deutlich höher als die Vergleichswerte, die Inputflüsse hingegen nur halb so gross. Hier sieht man ein Phänomen, das auf der kantonalen Ebene oder auf der Ebene Schweiz verzögert ebenfalls eintreten könnte: Die Stadt Zürich ist zu einem grossen Teil gebaut, eine gewisse Sättigung ist erreicht, das Wachstum ist im Vergleich zum Kanton Zürich abgeschwächt. Daher sind die die Inputflüsse in die Stadt kleiner als es im Kanton der Fall ist. Hingegen entstehen in der Stadt durch die intensivere Nutzung und die starke Anpassung und Veränderung des Gebäudebestandes grosse Outputflüsse.

Tabelle 4-5: Der Vergleich der Abbrüche von Wohngebäuden für die Stadt Zürich, den Kanton Zürich und die Schweiz für das Jahr 2005 und den Mittelwert der Jahre 2002-2005. Iin der Stadt Zürich werden überdurchschnittlich viele Wohngebäude rückgebaut, was entsprechend grosse Materialflüsse zur Folge hat.

Nur Wohngebäude	**Anteil Abbruch am Bestand** in % bzgl. Anzahl Gebäude		
	Mittelwert 2002-2005	2005	Quelle
Schweiz	0.07%	*0.05%**	BFS, eigene Hochrechnung
Kanton Zürich	0.14%	0.25%	Stat. Amt Kt. Zürich
Stadt Zürich	0.25%	0.45%	Statistik Stadt Zürich

* *Daten für das Jahr 2000*

Die Zusammensetzung der Outputflüsse ist in der Figur 4-3 gezeigt. Beim Belag halten sich Output und Input knapp die Waage; der grosse Teil des Belages wird in den (öffentlichen) Strassen eingebaut und dort nur erneuert, das Wachstum beruht einzig auf die Zunahme bei den Gebäuden. Das Bild für Kies/Sand bzw. Strassenaufbruch ist ähnlich. Beim Mischabbruch ist der Output grösser als der Input. Mischabbruch besteht zum grösseren Teil aus Mauerwerk, enthält aber auch einen gewissen Anteil Betonabbruch; die genaue Zusammensetzung kann stark variieren. Mauerwerk wird heute nur aus primären Materialien hergestellt, Mischabbruchgranulat wird daher vorwiegend im Tiefbau im Magerbeton eingesetzt. Der Output von Betonabbruch ist viel kleiner als der Input in das System, die heutige bauweise in Beton ist hier direkt ersichtlich.



Figur 4-3: Ein Vergleich der Input- und Outputmaterialien für das Jahr 2005 zeigt, dass der Input von Beton viel grösser ist, als der Output von Betonabbruch. Mauerwerk fliesst weniger in die Stadt als hinaus - die heutige bauweise der Gebäude ist hier ersichtlich: Beton dominiert die Konstruktion der Häuser.

4.2 Einsatz von RC-Beton in der Stadt Zürich

Die «Bauherrin Stadt Zürich» fördert den Einsatz von RC-Beton sehr stark. So wird bei Neubauvorhaben in den Ausschreibungen die Lieferung von RC-Beton verlangt. Damit wird ein sehr hoher RC-Betonanteil von ca 80 % am gesamten Betonbedarf der Bauherrin Stadt Zürich erreicht. In der Tabelle 4-6 sind die Primärbeton- und RC-Betonflüsse für die «Bauherrin Stadt Zürich» und die restlichen Bauherren in der Stadt aufgeführt. Die «Bauherrin Stadt Zürich» setzt bei ihren Bauprojekten mehr RC-Beton ein, als alle anderen Bauherrschaften zusammen, obwohl der Beton-Bedarf der «Bauherrin Stadt Zürich» nur 15 % des totalen Betoninputs ausmacht. Die Förderstrategie der «Bauherrin Stadt Zürich» im Bereich des RC-Betons führt demnach dazu, dass der Anteil von RC-Beton am totalen Betoninput für die gesamte Stadt von 10 % auf 21 % angehoben wird.

Tabelle 4-6: Beton-Input in die Stadt Zürich im Jahr 2005. Die Bauherrin «Stadt Zürich» hat in den letzten Jahren rund 80 % RC-Beton eingesetzt!
Quelle: Eigene Berechnung, Auskunft von W. Hofmann[*]

	Beton Tonnen/Jahr	davon RC-Beton Tonnen/Jahr	RC-Beton Anteil
Bauherrin Stadt Zürich	120'000	96'000	80 %
Restliche Bauherren	660'230	66'023	10 %
Total	780'230	162'023	21 %

[*]Fachstelle Ingenieurwesen, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich

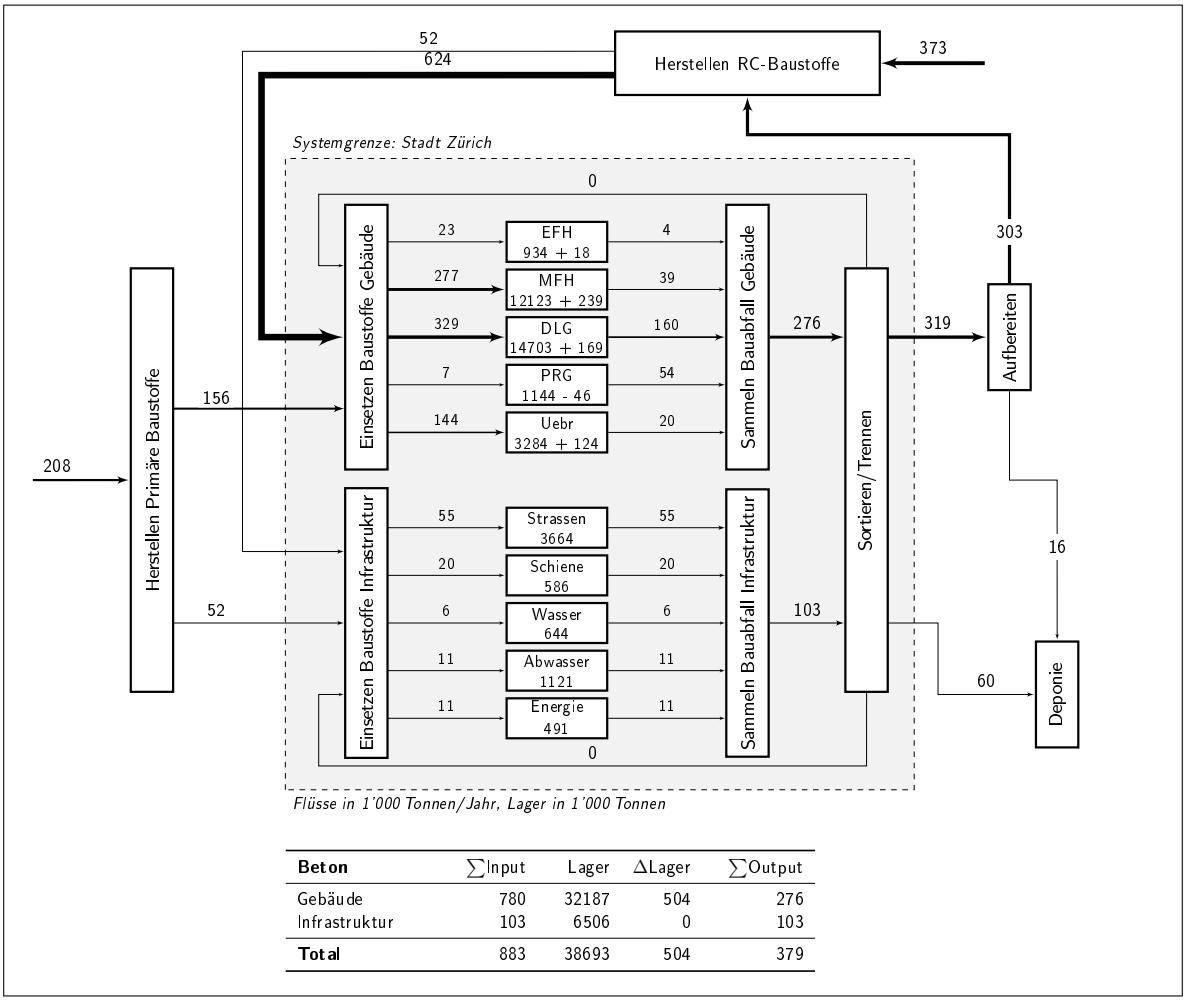
Wenn nun alle Bauherrschaften, welche in der Stadt Zürich bauen, gleich viel RC-Beton einsetzen würden, wie dies die «Bauherrin Stadt Zürich» in den letzten Jahren tat, dann könnte in der ganzen Stadt bedeutend mehr RC-Beton verbaut werden, als in die Aufbereitung gelangt (Figur 4-4). Insgesamt würden damit jährlich rund 680'000 Tonnen RC-Beton im Hochbau und in der Infrastruktur verbaut. Der Inputfluss von Primärbeton ginge von 676'000 t/a (vgl. Figur 3-13) auf 208'000 t/a zurück. Der Output an Betonabbruch aus der Stadt Zürich, welcher in die Aufbereitungsanlagen im Umland gelangt, beträgt jedoch mit 319'000 t/a nur etwa die Hälfte des Input. Dies würde bedeuten, dass RC-Material aus dem Umland importiert werden müsste oder nicht so viel RC-Beton hergestellt werden könnte.

An diesem Beispiel lässt sich sehr gut zeigen, welche Vorteile die Materialflussanalyse im Bereich des Ressourcenmanagements bietet. Ohne Kenntnisse des gesamten Systems wäre eine solche Aussage, wie sie oben gemacht wird, nicht möglich. Die Erhebung aller relevanten Materialflüsse in einem zu untersuchenden System ist deshalb die Grundlage, um überhaupt eine Ressourcenstrategie zu entwickeln.

4.3 Potenzial im Ressourcenmanagement von Hochbau und Tiefbau

In der Folge werden kurz einige Ideen und Möglichkeiten für ein optimiertes Ressourcenmanagement in der Stadt Zürich skizziert.

Magerbeton im Tiefbau aus RC-M Magerbeton wird in den Infrastrukturnetzen als Hüll- und Füllbeton verwendet, so z. B. um Wasserleitungen im Graben einzubetten. Dieser Magerbeton könnte von der Funktionalität her gut als Recycling-Beton mit Zuschlagstoffen



Beton	∑Input	Lager	ΔLager	∑Output
Gebäude	780	32187	504	276
Infrastruktur	103	6506	0	103
Total	883	38693	504	379

Figur 4-4: Wenn für alle arbeiten an Gebäuden in der Stadt Zürich 80 % RC-Beton eingesetzt würde, dann sähe das Flussdiagramm für Beton so aus, dass der grösste Teil des Inputs von Beton mit RC-Beton gedeckt würde. Die Nachfrage nach RC-Beton in den Gebäuden wäre grösser als der Fluss in die Aufbereitung. Vergleiche dazu die Figur 3-13

aus Mischabbruchgranulat hergestellt werden. Dieser Aspekt ist aus einem weiteren Grund wichtig: In den nächsten Jahren wird tendenziell mehr Mischabbruch anfallen. Wenn er nicht vollständig deponiert werden soll (was aus den begrenzten Kapazitäten der Deponien nicht erwünscht ist), dann muss Mischabbruch vermehrt auch im Tiefbau eingesetzt werden [Schneider, 2005].

Zwischenlager für Kies in der Stadt Heute fehlt es in der Stadt an Flächen, wo kiesiger Aushub und Kies/Sand aus dem Unterhalt der Infrastrukturbauten zwischengelagert werden kann. Das ausgehobene Material muss daher rasch abtransportiert werden. Das hat zur Folge, dass anschliessend neue Baustoffe – meist aus primärer Produktion – zurück in die Stadt gefahren werden müssen (mündliche Mitteilung von Herrn M. Bürgi, TAZ).

Um die direkte Verwertung von Kies und Sand in der Stadt überhaupt zu ermöglichen, müsste ein Zwischenlager innerhalb der Stadtgrenzen bereitgestellt werden. Dort könnte verwertbares Material temporär gelagert und direkt in der Stadt wieder eingesetzt werden – allenfalls sogar auf der selben Baustelle, wo es zuvor ausgehoben wurde.

Beim Neubau des Letzigrundstadions konnte dieses Idee umgesetzt werden und sie hat sich bewährt. Der verantwortliche Unternehmer konnte rund ein Drittel des kiesigen Aushubmaterials dort zwischenlagern und aufbereiten. Es wurde anschliessend auf Baustellen in der Stadt oder in nächster Nähe wieder als Baumaterial eingesetzt. Damit konnten die durch die Transporte verursachten Emissionen deutlich reduziert werden. [Rubli, 2007].

Kies via Tiefbau in den Hochbau Ein weitergreifendes Konzept sieht vor, den Kies/Sand aus primärer Produktion vorwiegend bei der Infrastruktur einzusetzen. Dort liegt dieses Material – quasi zwischengelagert – bis es im Laufe der Erneuerung wieder ausgehoben wird. Nun gelangt es in die Aufbereitung und von dort in die Herstellung von Konstruktionsbeton. Beton aus RC-Kies (RC-Beton) wird heute bereits häufig für den Bau von Gebäuden verwendet (z. B. die Schulanlage «Im Birch»).

Mit der dynamischen Modellierung kann diese Idee durchgerechnet werden und die Resutalte für ein optimiertes Ressourcenmanagement verwendet werden.

4.4 Fazit

Die in der vorliegenden Studie zusammengefassten Daten aus der Erhebung der mineralischen Baustoffflüsse und Lager für das Referenzjahr 2005 bilden wichtige Grundlagen zum Verständnis des mineralischen Ressourcenhaushaltes der Stadt Zürich. Es konnten teilweise nicht erwartete Erkenntnisse gewonnen werden, welche auch wichtige Informationen liefert für die zweite Phase des Projektes, in der es um die dynamische Modellierung des Systems geht. Auf diese Erkenntnisse wird in den nachfolgenden Abschnitten nochmals kurz eingegangen.

Die Resultate aus den Stoffflussanalysen zeigen, dass die Stadt Zürich weiterhin am wachsen ist. **Die mineralischen Baustofflager haben im Bezugsjahr 2005 um 676'000 Tonnen zugenommen.** Der grösste Beitrag zum Lagerwachstum liefert der Beton mit einem Lagerwachstum von 504'000 t/a, was knapp 75 % des gesamten mineralischen Lagerwachstums entspricht. Der Vergleich mit Werten für die Schweiz und den Kanton Zürich zeigt allerdings, dass das Lagerwachstum der Stadt Zürich geringer ist als dasjenige ihres Umlandes.

Interessant sind die Vergleiche der Lager und Flüsse auf pro-Kopf-Basis mit dem Kanton Zürich und der Schweiz. Während das mineralische Materiallager in den Gebäuden für die Stadt Zürich und die Schweiz mit 195 t/cap bzw. 188 t/cap auf einem sehr ähnlich Niveau liegt, unterscheiden sich die Input- und Outputflüsse markant. **So ist beispielsweise der Betoninput pro Kopf in der Stadt Zürich (2.41 t/(cap·a)), im Vergleich zur Schweiz (5.07 t/(cap·a)) oder dem Kanton Zürich (4.86 t/(cap·a)) nur halb so gross.** Die Unterschiede lassen sich damit begründen, dass in der Stadt Zürich keine grossen Infrastrukturprojekte wie z. B. die NEAT realisiert werden. Ein weiterer wichtiger Grund ist das deutlich geringere Gebäudevolumenwachstum. In der Stadt Zürich ist dieses im Bezugsjahr 2005 nur rund halb so hoch wie im Kanton Zürich.

Gegensätzlich verhält es sich mit den Outputflüssen. Diese sind in der Stadt deutlich höher als auf der Ebene Schweiz. In Zürich findet eine intensivere Veränderung des Bestandes durch Umbauten und Ersatzneubauten statt, welche sich in grössen Outputflüssen als der landesweite Durchschnitt äussert.

Die tieferen Inputflüsse und höheren Outputflüsse im Vergleich zum Bund und Kanton zeigen ein interessantes Phänomen auf. Da die flächenmässige Ausdehnung innerhalb der

Stadtgrenzen begrenzt ist, wird die bestehende Gebäudesubstanz intensiver genutzt. Die Umbau- und Ersatzneubauraten steigen an, was zu höheren Outputflüssen führt. Andererseits wird weniger Material für den Neubau eingesetzt. Diese Entwicklung wird sich in den nächsten Jahrzehnten mit grosser Wahrscheinlichkeit fortsetzen bzw. intensivieren, womit es immer wahrscheinlicher wird, dass ein Fliessgleichgewicht erreicht wird. Das Ressourcenmanagement wird bei einer solchen Entwicklung immer wichtiger werden.

Die aufgezeigte Entwicklung für die Stadt Zürich lässt sich auch auf die Ebene Schweiz übertragen. Das heisst, auch auf der Ebene Schweiz wird diese Entwicklung stattfinden. Diese erfolgt aber vermutlich um Jahrzehnte verzögert. Dies bedeutet wiederum, dass die Erfahrungen in der Stadt Zürich in ein allfälliges Ressourcenmanagement auf der Ebene Schweiz einfliessen können.

Aus der Sicht des Ressourcenmanagements sind Möglichkeiten vorhanden, um die Materialflüsse zu optimieren. Der Einsatz von Recycling-Beton (RC-Beton) mit Zuschlagstoffen aus aufbereiteten Rückbaumaterialien (Betonabbruch, Mischabbruch, Strassenaufbruch) ist mit 20 % relativ gering. Dieser Anteil könnte auf bis zu 80 % erhöht werden, wie dies die Bauherrin «Stadt Zürich» bei ihren Neubauten in den letzten Jahren gezeigt hat.

Bei der Erneuerung der Infrastrukturnetze liegt ein grosses Potential beim Einsatz von saubererem Strassenaufbruch direkt auf der Baustelle. Hier sind vor allem Platzprobleme zu lösen, da innerhalb der Stadt das Aushubmaterial nicht beliebig lange zwischengelagert werden kann. Zu fördern ist weiterhin der vermehrte Einsatz von RC-Asphalt für Belagserneuerungen.

Ausblick: Dynamisches Ressourcenmodell

Die erste Projektphase ist mit diesem Bericht abgeschlossen. In der nachfolgenden zweiten Phase wird auf der Basis der erarbeiteten Daten ein dynamisches Ressourcenmodell erstellt, um verschiedene Szenarien für den Zeitraum von 2000-2050 zu rechnen. Mit dem dynamischen Modell und den damit verbundenen Szenarien sollen die Auswirkungen von heute eingeleiteten Massnahmen auf die künftigen Materialflüsse aufgezeigt werden. Allfällige Fehlentwicklungen sollen damit frühzeitig erkannt und allenfalls korrigiert werden.

Gebäude und Infrastruktur entkoppeln Die Dynamik der Baustoffflüsse im Bereich der Gebäude und in der Infrastruktur unterscheidet sich stark. Für das Modell wird bei der Infrastruktur aufgrund von Aussagen der Netzbetreiber davon ausgegangen, dass ein *steady state* (Fliessgleichgewicht) beinahe erreicht ist. Die Verkehrsflächen und Infrastrukturnetze sind weitgehend gebaut, ihre jährlichen Veränderungen sind minim. Die Materialflüsse kommen einzig durch Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten zustande. Der Gebäudebestand hingegen verändert sich laufend. Einerseits ändert sich die Bauweise (Erhöhung der Energieeffizienz der Gebäude, veränderte Ansprüche an die Grundrisse usw.) und andererseits wächst das Volumen des Bestandes weiterhin. Für die dynamische Modellierung bedeutet dies, dass die Entwicklung des Gebäudebestandes und der Infrastruktur separat untersucht werden sollten und erst danach in das Modell integriert werden.

Mögliche Szenarien

Energie orientierte Szenarien Herr T. W. Püntener, Projektleiter Managementprozess Energienachfrage, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) untersucht mittels verschiedener Szenarien mögliche Entwicklungen des Energieverbrauches in der Stadt Zürich. Als

Werkzeug dient dazu der regionale ECO_2-Rechener, indem die lokalen Gegebenheiten der Stadt Zürich berücksichtigt sind[7].

Es ist vorgesehen, die Modelle, soweit möglich, miteinander zu koordinieren. Dazu werden die Grundlagen der ECO_2-Energie-Szenarien für die dynamische Modellierung der Baustoffflüsse und Lager übernommen. Es wird vorgeschlagen, dass drei Szenarien vollständig gerechnet werden:

1. Szenario: Es wird ein Referenzszenario gerechnet, welches eine unbeeinflusste Entwicklung voraussetzt. Das heisst, es wird so weitergemacht wie heute.

2. Szenario: Es wird ein Szenario 2000-Watt-Gesellschaft gerechnet. Dazu müsste die Stadt Zürich grösstenteils in Minergiestandard umgebaut werden. Vermutlich wird in diesem Szenario mit beinahe 100 % Ersatzneubauten gerechnet. Allenfalls kann auch noch ein Zusatzszenario gerechnet werden, in welchem 100 % Sanierung vorausgesetzt wird.

3. Szenario: Es wird ein «realistisches» Szenario gerechnet, in dem noch zu definierende Anteile Sanierung und Ersatzneubauten gerechnet werden. Dieses wird zwischen den Szenarien 1 und 2 liegen.

Die teilweise Verknüpfung der beiden Modelle (Materialflüsse und ECO_2-Rechner) bietet verschiedene Vorteile. So wird von gleichen oder sehr ähnlichen Annahmen (Modellparametern) ausgegangen. Damit ist eine gewisse Vergleichbarkeit gewährleistet. Die Szenarien ermöglichen Aussagen zu den Auswirkungen des Umbaus des Gebäudeparks auf die mineralischen Stoffflüsse. Zudem lassen sich neben der Nutzenergie auch die mit dem Umbau des Gebäudeparks verbundene graue Energie abschätzen.

Anteil RC-Material Eine weitere veränderliche Grösse für die Modellierung muss der Anteil von RC-Baustoffen in den eingesetzten Materialien sein. Dieser Anteil sollte im Laufe der Zeit von heute ca. 20 % deutlich zunehmen. Die Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Recyclingbaustofffen im Hoch- und Tiefbau auf den Ressourcenhaushalt der Stadt Zürich wird ebenfalls untersucht. Hier geht es darum, zu zeigen, welche Beiträge aus dem Tief- und Hochbau möglich und sinnvoll sind.

Tiefbau/Infrastrukturen Wie schon beschrieben, befinden sich die Infrastrukturnetze in einem relativ stabilen Zustand (*steady state*). Ihre Wachstumsphase ist weitgehend abgeschlossen und ihr Materialbedarf hängt vorwiegend von den jährlichen Erneuerungs- bzw. Umbauraten ab. Es könnte daher von Interesse sein, zu berechnen, wie sich eine Veränderung der Erneuerungsraten auf den Materialbedarf auswirkt. Daran könnten die damit verbundenen Geldflüsse gekoppelt werden und so die finanziellen Auswirkungen dargestellt werden.

Das Tiefbauamt (TAZ) ist daran interessiert, die Vor- und Nachteile des «koordinierten Bauens» bezüglich Material- und Geldflüssen genauer zu analysieren. Das koordinierte Bauen beschreibt einen orchestrierten Eingriff von verschiedenen Teilnehmern/Werken am selben Strassenabschnitt. Dies bedeutet, dass gewisse Bestandteile der Infrastruktur vor dem Ablauf ihrer Lebensdauer ersetzt werden. Dafür muss die Strasse nur einmal aufgerissen werden. Bis heute sind nur wenige Informationen verfügbar, welche Aussagen liefern, ob sich das koordinierte Bauen finanziell und unter Betrachtung der Stoffströme lohnt. Mittels einer dynamischen Modellierung könnten hier interessante Ergebnisse erzielt werden.

[7]Der regionale ECO_2-Rechner ist ein Online-Bilanzierungs- und Simulationsinstrument für den Energieverbrauch und die CO2-Emissionen von Regionen der Firma Ecospeed SA.

Das in der ersten Projektphase erstellte Ressourcenmodell der mineralischen Baustoffe für das Jahr 2005 kann nun in eine zeitliche Modellierung der Lager und Flüsse überführt werden. Mit den oben aufgeführten Szenarien können mögliche Entwicklungen und Veränderungen des Bauwerks «Stadt Zürich» abgebildet und wichtige Fragestellungen eingehend beleuchtet werden. Das damit verbundene verbesserte Systemverständnis bildet die Grundlage für die Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung des Bauwerkes Stadt Zürich.

Literatur

[BAFU, 2006 a] Bundesamt für Umwelt, Abteilung Abfall und Rohstoffe, 2006. *Abfallmengen und Recycling 2005 im Überblick*. Referenz: F085-0930. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[BAFU, 2006 b] Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), 2006. *Richtlinie für die Verwertungmineralischer Bauabfälle. Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch*. 2. aktualisierte Auflage. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[BAFU, 2007] Bundesamt für Umwelt, 2007. *Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle.* Bundesamt für Umwelt, Bern.

[BFS, 2005] Bundesamt für Statistik, 2005. *Materialflussrechnung der Schweiz. Machbarkeitsstudie*. Bundesamt für Statistik, Neuenburg.

[BFS, 2007] Bundesamt für Statistik, 2007. *Materialflüsse in der Schweiz. Ressourcenverbrauch der Schweizer Wirtschaft zwischen 1990 und 2005*. Bundesamt für Statistik, Neuenburg.

[BUWAL, 2001] BUWAL (Hrsg.), Wüest & Partner, 2001. *Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege*. Band I und II. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

[BUWAL, 2004] Bundesamt für Umwelt, 2004. *Empfehlung. Entsorgung von teerhaltigem Asphalt*. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[BWO, 2006] Frohmut W., 2006. *Die Renovation der Miet- und Eigentümerwohnung in der Schweiz 2001-2003*. Bundesamt für Wohnungswesen (BWO), Bern.

[Kt. Aargau, 1995] Kanton AG (Hrsg.), Wüest & Partner, 1995. *Kantonale Abfallplanung: Perspektive Bauabfälle*. Baudepartement des Kantons Aargau, Aarau.

[Leontief, 1986] Leontief W., 1986. *Input-Output-Economics*. 2. Auflage. Oxford University Press, Oxford.

[Lichtensteiger, 2006] Lichtensteiger. Th. et al., 2006. *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender*. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich.

[Rubli, 2004] S. Rubli, H. Gugerli, 2004. *Qualitätssicherung beim Rückbau.* Umwelt-Focus 6/2004, S.35-38. Zürich

[Rubli, 2006] S. Rubli, H. Gugerli, 2006. *Bewirtschaftungskonzept.* tec21 10/2006, S.4-7. Zürich

[Rubli, 2007] S. Rubli, 2007. *Neubau Stadion Letzigrund. Qualitätssicherung in den Bereichen Aushub und Rückbau* Internerner Bericht für das Amt für Hochbauten (AHB) der Stadt Zürich

[Schneider, 2005] Schneider M., 2005. *Mischabbruch–Recycling. Chancen, Potentiale und Strategien.* Semesterarbeit in Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, ETH Zürich.

[Schneider, 2002] Schneider J. 2002. *Material- und Abfallbewirtschaftung des Systems Fahrbahn SBB*. Diplomarbeit ETH Zürich.

[Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007] Statistik Stadt Zürich, 2006. *Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 2007*. Präsidialdepartement, Stadt Zürich.

[TBA, 2005] Tiefbauamt der Stadt Zürich, 2005. *Richtlinien Strassenoberbau*. Tiefbauamt der Stadt Zürich.

[TED, 2005] Tiefbau- und Entsorgungsdepartement der Stadt Zürich, 2005. *Normen. Bau von Entwässerungsanlagen und Strassen*. Tiefbau- und Entsorgungsdepartement der Stadt Zürich.

[Wallbaum, 2007] Wallbaum, H. et al., 2007. *Resource intensity analyses of residential buildings of different age categories in Germany.* Building and Environment, in review process.

[Wittmer, 2006] Wittmer D., 2006. *Kupfer im Regionalen Ressourcenhaushalt. Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten*. Diss. ETH Nr. 16'325. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich.

[Wüest & Partner, 2005] Wüest & Partner, 2005. *Immo-Monitoring 2005*. Band I-IV. Verlag Wüest & Partner, Zürich.

Abbildungsverzeichnis

Z-1 Das System für die mineralischen Baustoffe in der Stadt Zürich . . . iv
Z-2 Die Differenzierung des «Bauwerks Stadt Zürich» . . . v
Z-3 Bestand der Infrastrukturnetze . . . vi
Z-4 Materiallager in der Stadt Zürich 2005 . . . vii
Z-5 Die Materialflüsse im Jahr 2005 . . . vii
1-1 Schema der zwei Projektphasen . . . 3
2-1 Darstellung der Trennung von Gebäuden und Infrastruktur . . . 5
2-2 Differenzierung des «Bauwerks Stadt Zürich» . . . 6
2-3 Das System für die Stadt Zürich für das Modell . . . 7
2-4 Materialisierung am Beispiel der Mehrfamilienhäuser . . . 11
2-5 Diagramm des Ablaufes für die Berechnung . . . 12
2-6 Schema für die Berechnung der Materialflüsse . . . 13
2-7 Das Schema für das I-O-Modell . . . 21
2-8 Der Normaufbau eines Strassenkörpers . . . 24
3-1 Gebäudebestand der Stadt Zürich, des Kantons Zürich und der Schweiz . . . 28
3-2 Altersverteilung des Gebäudebestandes der Stadt Zürich . . . 29
3-3 Gebäudebestand der Stadt Zürich nach Baujahr, Nutzung und Volumen . . . 30
3-4 Eigentümer der Gebäude in der Stadt Zürich . . . 31
3-5 Gebäudebestand der Stadt Zürich nach Eigentümer, Nutzung und Volumen . . . 31
3-6 Zeitreihe der Neubauten, Sanierungen und Abbrüche . . . 32
3-7 Bestand der Infrastruktur-Netze . . . 33
3-8 Materiallager in der Stadt Zürich 2005 . . . 34
3-9 Materiallager in Gebäuden und Infrastruktur . . . 35
3-10 Materialmengen aus Neubauten und Abbrüchen, Stadtkreise 5, 6 und 11 . . . 36
3-11 Eine Übersicht der mineralischen Materialflüsse im Jahr 2005. . . . 37
3-12 Die Lager und Materialflüsse 2005 der mineralischen Baustoffe . . . 39
3-13 Die Betonlager und -flüsse im Jahr 2005 . . . 40
3-14 Die Materialflüsse und -lager von Mauerwerk . . . 41
3-15 Die Kies-/Sandflüsse und -lager in der Stadt Zürich . . . 42
3-16 Flüsse und Lager von Belagsmaterial 2005 . . . 43
3-17 Die Lager und Flüsse der Materialien Gips, Keramik und Glas . . . 44
3-18 Die Materialflüsse im Jahr 2005 . . . 45
3-19 Vergleich des Bestandes und der Sanierung-, Neubau- und Rückbauanteile . . . 46
4-1 Jährliches Gebäudevolumenwachstum in der Stadt und dem Kanton Zürich . . . 54
4-2 Indexierte Entwicklung der Gebäudevolumen und Gebäudeanzahl . . . 54
4-3 Vergleich der Input- und Outputmaterialien . . . 55
4-4 Resultat für «Beton» mit 80 % Recycling-Beton (RC-Beton) . . . 57

Tabellenverzeichnis

2-1 Die untersuchten mineralischen Baustoffe . . . 9
2-2 Die Typologisierung der Gebäude in der Stadt Zürich . . . 10
2-3 Zusammensetzung der mineralischen Rückbaustoffe . . . 16
2-4 Deponierte Anteile der Rückbaustoffe . . . 16
2-5 Begleitete Umbauprojekte . . . 17
2-6 Vergleich des Modelles mit bekannten Projekten . . . 18
2-7 Vergleich mit dem ARK-Projekt . . . 19
2-8 Input-Output-Analyse: Ein einfaches Beispiel . . . 20
2-9 Die Verkehrslastklassen der Strassen . . . 25
2-10 Quellen der Daten der Infrastruktur . . . 26
2-11 Geschätzte Unsicherheiten des Modelles . . . 27
3-1 Die verschiedenen Verkehrsflächen in der Stadt Zürich . . . 33
3-2 Die Input- und Outputflüsse als Rate in Prozent des Lagers. . . . 46
3-3 Die Input- und Outputflüsse der Gebäude . . . 47
3-4 Kennzahlen zu den Materiallagern und den Input- und Outputflüssen . . . 48
4-1 Vergleich der Materiallager und -flüsse der Gebäude . . . 49
4-2 Vergleich der Materiallager- und -flüsse der Infrastruktur . . . 50
4-3 Vergleich der Verkehrsflächen und Infrastrukturnetzlängen . . . 51
4-4 Vergleich der Resultate mit verschiedenen Publikationen . . . 53
4-5 Vergleich der Abbrüche von Wohngebäuden . . . 55
4-6 Beton-Input in die Stadt Zürich . . . 56
A-1 Attribute der Gebäudedaten . . . 67
A-2 Aggregation der Nutzungs-Typen . . . 68
A-3 Gebäudebestand Stadt Zürich und der Schweiz . . . 70
A-4 Daten zu den Infrastrukturnetzen . . . 71
A-5 Volumen der Gebäude in der Stadt Zürich nach Nutzung und Alter . . . 71
A-6 Volumen der Gebäude in der Stadt Zürich nach Nutzung und Eigentümer . . . 72
A-7 Die Sanierungsraten bezüglich dem Bestand . . . 72
A-8 Resultat Bestand der Stadt Zürich 2005: Die mineralischen Baustoffe . . . 73
A-9 Die Längen der Infrastruktur-Netze . . . 74
A-10 Bestand und Neubau der Nutzung «Übrige Gebäude» . . . 74
A-11 Veränderung Bestand Parkhäuser . . . 74
A-12 Verteilung der mineralischen Bauabfälle (Aufbereitung und Deponie) . . . 75
A-13 Bevölkerung 2005 (Schweiz, Kanton Zürich, Stadt Zürich) . . . 75
A-14 Die Verteilung der Materialien auf Aufbereitung und Deponie . . . 76
A-15 Zusammenfassung der Input- und Outputflüsse für das Jahr 2005 . . . 77
A-16 Die verwendeten Dichten (Umrechnung von Volumen auf Massen) . . . 78

Glossar

Quellen: [BAFU, 2007], [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007], eigene Definitionen

Asphaltgranulat Der auf Stückgrösse von maximal 32 mm zerkleinerte Asphalt (Strassenbelag)

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

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

Bauabfälle Alle Abfälle, die bei Bautätigkeiten anfallen → *Rückbaumaterialien*

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

Betongranulat Durch Aufbereiten von Betonabbruch hergestellter Recyclingbaustoff.

Bruttogeschossfläche Summe aller über- und unterirdischen Geschossflächen einschliesslich Mauern und Wandquerschnitten.

Dienstleistungsgebäude → *Nutzbau* für Dienstleistungsbetriebe, öffentliche Verwaltung, Bildungs- und Gesundheitswesen, Sport- und Freizeitanlagen.

Einfamilienhaus Reines Wohnhaus mit nur einer Wohnung

Eingriffstiefe Bei einer Sanierung werden gewisse Materialien eines Gebäudes ersetzt. Das Verhältnis ersetzte Materialien zum totalen Gebäudematerial wird als Eingriffstiefe definiert.

Ersatzneubau Wenn nach dem → *Rückbau* eines Gebäudes auf der gleichen Parzelle ein neues Gebäude errichtet wird, so wird dieser Neubau als Ersatzneubau bezeichnet. Form und Volumen des neuen Hauses müssen dabei nicht identisch sein mit dem zuvor abgebrochenen.

Gebäude Ein freistehendes oder durch Brandmauern von einem anderen getrenntes Bauwerk. Bei Doppel-, Gruppen- und Reihenhäusern zählt jedes einzelne Bauwerk, welches vom anderen durch mindestens vom Erdgeschoss bis zum Dach reichende Trennmauser geschieden ist, als selbstständiges Gebäude.

Gebäudestatistik «Statistik Stadt Zürich» wertet auf Grund von Beschlüssen der Bausektion des Stadtrates der Stadt Zürich die Vollzugsmeldungen über die Bautätigkeit aus (Neu- und Umbauten, Zweckänderungen, ...), die von Architekturbüros, Eigentümern und Verwaltungen eingehen. Die Daten über Abbruch, Rauminhalt und Versicherungswert von Gebäuden beruhen auf einer Auswertung von Angaben der kantonalen Gebäudeversicherung.

Konstruktionsvolumen Das Konstruktionsvolumen beschreibt den Volumen*anteil* eines Gebäudes, der für die Konstruktion nötig ist. Es kann auch als Volumen der Baumaterialien bezeichnet werden.

Mehrfamilienhaus Reines Wohnhaus mit zwei oder mehr Wohnungen

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

Mischabbruchgranulat Der durch Aufbereiten des Mischabbruchs hergestellte Recyclingbaustoff.

Neubau Als Neubau werden ausschliesslich die neu gebauten Gebäude auf «grüner Wiese» verstanden. Ein Neubau ist demnach ein Gebäude, welches auf einer erstmals bebauten Parzelle zu stehen kommt. Dies im Gegensatz zu einem → *Ersatzneubau*

Nutzbau Ein Gebäude mit einem Wohnungsanteil von weniger als 50 %

Produktionsgebäude → *Nutzbau* für Industrie oder Gewerbe.

RC-B, RC-M Beton mit Zuschlagstoff aus → *Betongranulat* (RC-B) oder mit Zuschlagstoff aus → *Mischabbruchgranulat* (RC-M). Beton mit Zuschlagstoffen aus der Aufbereitung von Rückbaumaterialien wird als Recycling-Beton (RC-Beton) bezeichnet.

Recyclingbaustoffe Die aus Rückbaumaterialien hergestellten und zu Bauzwecken eingesetzten Materialien, welche die ökologischen und bautechnischen Anforderungen erfüllen. Bei der Aufbereitung der vier Bauabfallkategorien entstehen sechs mineralische Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe).

Recycling-Kiessand P, A, B Der durch Aufbereiten von → *Strassenaufbruch* aus nicht gebundenen Fundationsschichten hergestellte Recyclingbaustoff. Im Hinblick auf die Verwertung wird zwischen drei Qualitäten unterschieden: Recycling- Kiessand P, Recycling-Kiessand A, Recycling-Kiessand B.

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

Rückbaumaterialien Alle bei einem Rückbau anfallenden → *Bauabfälle*.

Sanierung Eine Sanierung ist ein Eingriff in ein Gebäude, bei dem ein gewisser Teil der Gebäudestruktur ersetzt wird.

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

Übrige Gebäude Die übrigen Gebäude umfassen Parkhäuser, Landwirtschaftsgebäude sowie andere verschieden Bauten, die nicht anderswo zugeteilt werden können.

Umbau Ein Umbau dient in erster Linie dem Werterhalt eines Gebäudes; er kann durchaus auch als Sanierung mit geringer → *Eingriffstiefe* verstanden werden.

Umland Alles was ausserhalb der Systemgrenze «Stadt Zürich» liegt wird im Modell mit Umland bezeichnet.

Einige Kennwerte für die Stadt Zürich für das Jahr 2005.
Quelle: Eigene Berechnungen, [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007]

Bruttogeschossfläche	53'079'000 m^2
Rauminhalt (Gebäudevolumen)	165'630'000 m^3
Einwohner	366'800 cap
Arbeitsplätze	273'000 Anzahl
Gebäude	55'400 Anzahl
Strassenlänge (ca.)	1'000 km
Materiallager in Gebäuden	71'599'000 Tonnen
Materiallager in Infrastruktur	28'994'000 Tonnen
Materiallager Total	100'593'000 Tonnen

Anhang

Tabelle A-1: Liste der Attribute der Gebäudedaten.

Feldname	Beispiel	Kommentar
Verarbeitungs_Jahr	2004	Bezeichnet das Jahr für das die Jahresendauswertung erstellt wurde.
Stadtquartier	111	Für «Kreis» geteilt durch 10 und abrunden zB. abrunden(11/10) = 1
EGID	302016316	Abgleich EGID wurde am 19.7.2006 gemacht
Gebäudeschlüssel_EAG	010-0233-00	
Ost_Gebäude_Koordinaten_EAG	680455	Ostwert der Landeskoordinaten
Nord_Gebäude_Koordinaten_EAG	241765	Nordwert der Landeskoordinaten
Gebäude_Adresse_Primär	Blaufahnenstrasse 0006a	
Eigentümerart	Stockwerkeigentum	
Eigentümerart_Code	4	
Eigentümerart_Gruppiert_3	Natürliche Personen	
Baujahr	1955	
Umbaujahr	2001	Die Umbauten wurden erst ab 2000 systematisch erfasst.
Geschosse_unterirdisch	2	
Geschosse_oberirdisch	4	
Gebäudegrundfläche	150	Gemeint ist die Gebäudegrundfläche über Niveau. Quelle ist die GeoZ.
Rauminhalt	500	GVZ ermittelt im Rahmen der Gebäudeschätzung auch den Rauminhalt auf Versicherungsnummer-Ebene.
Dachform	Zinne	wird erst seit 2003 systematisch erfasst: Zinne, Flachdach, Steildach, unbekannt
Gebäudeart	Geschäfts-, Gewerbehaus	
Gebäudeart_Code	541	
Gebäudeart_Gruppiert_2	Handel und Gewerbe	
Total_Wohnungen	3	
Anzahl_Zimmer_in_Wohnung	5	
Anzahl_übrige_Zimmer	2	
Bruttogeschossfläche_AfS	100	
Wohnfläche_AfS	25	

Tabelle A-2: Aggregation der Nutzungstypen.

Gebäudeart	Nutzung	Rauminhalt	%
Einfamilienhaus	EFH	6'582'534	4.0%
Alterswohnhaus/-heim mit Wohnungen	MFH	1'263'501	0.8%
Alterswohnhaus/-heim ohne Wohnungen	MFH	318'026	0.2%
Mehrfamilienhaus	MFH	45'770'146	27.6%
Personalhaus mit Wohnungen	MFH	244'481	0.1%
Personalhaus ohne Wohnungen	MFH	150'797	0.1%
Schwestern- und Studentenhaus mit Wohnungen	MFH	154'097	0.1%
Schwestern- und Studentenhaus ohne Wohnungen	MFH	137'828	0.1%
Wohnhaus mit Geschäftsräumen	MFH	26'896'992	16.2%
Amtshaus, Verwaltungsgebäude, Bürohaus	DLG	1'516'967	0.9%
Amtshaus, Verwaltungsgebäude, Bürohaus mit Wohnungen	DLG	618'503	0.4%
Ateliergebäude	DLG	84'944	0.1%
Ateliergebäude mit Wohnungen	DLG	22'813	0.0%
Ausstellungsgebäude	DLG	548'078	0.3%
Ausstellungsgebäude mit Wohnungen	DLG	16'241	0.0%
Bibliothek	DLG	89'247	0.1%
Bibliothek mit Wohnungen	DLG	9'530	0.0%
Bürohaus, Verwaltungsgebäude	DLG	11'844'105	7.2%
Bürohaus, Verwaltungsgebäude mit Wohnungen	DLG	2'627'383	1.6%
Feuerwehrgebäude	DLG	37'450	0.0%
Feuerwehrgebäude mit Wohnungen	DLG	4'327	0.0%
Garderobengebäude	DLG	125'562	0.1%
Garderobengebäude mit Wohnungen	DLG	16'752	0.0%
Gebäude für Radio und Fernsehen	DLG	401'084	0.2%
Geschäftshaus, Gewerbehaus	DLG	14'704'083	8.9%
Geschäftshaus, Gewerbehaus mit Wohnungen	DLG	5'901'420	3.6%
Hochschulgebäude	DLG	3'521'053	2.1%
Hochschulgebäude mit Wohnungen	DLG	469'697	0.3%
Hotel	DLG	1'207'045	0.7%
Hotel mit Wohnungen	DLG	321'547	0.2%
Kantinengebäude	DLG	308'542	0.2%
Kantinengebäude mit Wohnungen	DLG	1'470	0.0%
Kindergarten	DLG	253'249	0.2%
Kindergarten,Wohnugen	DLG	77'983	0.0%
Kino	DLG	69'182	0.0%
Kiosk	DLG	15'759	0.0%
Klinik	DLG	236'167	0.1%
Klinik mit Wohnungen	DLG	170'675	0.1%
Kranken- und Pflegeheim	DLG	483'680	0.3%
Kranken- und Pflegeheim mit Wohnungen	DLG	295'256	0.2%
Ladengebäude, Messegebäude, Ausstellungsgebäude	DLG	661'499	0.4%
Ladengebäude, Messegebäude, Ausstellungsgebäude mit Wohnungen	DLG	131'925	0.1%
Militär, Luftschutz- und Polizeigebäude	DLG	423'072	0.3%
Museum, Sammlung	DLG	260'287	0.2%
Museum, Sammlung mit Wohnungen	DLG	28'530	0.0%
Pension, Jugendherberge	DLG	36'497	0.0%
Pension, Jugendherberge mit Wohnungen	DLG	9'374	0.0%

Tabelle A-2: Aggregation der Nutzungstypen (Fortsetzung)

Gebäudeart	Nutzung	Rauminhalt	%
Restaurant	DLG	217'503	0.1%
Restaurant mit Wohnugnen	DLG	136'358	0.1%
Schulhaus	DLG	1'947'434	1.2%
Schulhaus mit Wohnungen	DLG	1'891'276	1.1%
Spital	DLG	1'911'237	1.2%
Spital mit Wohnungen	DLG	18'999	0.0%
Sporthalle, Hallenbad	DLG	557'661	0.3%
Sporthalle, Hallenbad mit Wohnungen	DLG	60'457	0.0%
Strafvollzugs- und Untersuchungshaftanstalt	DLG	5'866	0.0%
Strafvollzugs- und Untersuchungshaftanstalt mit Wohnung	DLG	3'288	0.0%
Theatergebäude	DLG	222'850	0.1%
Theatergebäude mit Wohnungen	DLG	97'264	0.1%
Toilletengebäude	DLG	11'730	0.0%
Transformator, Pumpstation	DLG	475'350	0.3%
Transformator, Pumpstation mit Wohnungen	DLG	1'490	0.0%
Tribünengebäude	DLG	32'201	0.0%
Tribünengebäude mit Wohnungen	DLG	3'210	0.0%
Turnhalle	DLG	602'520	0.4%
Turnhalle mit Wohnungen	DLG	126'705	0.1%
Ueb. Gebäude + Klubhaus für Sport,Baden + Freizeit	DLG	249'903	0.2%
Ueb. Gebäude + Klubhaus für Sport,Baden + Freizeit mit Wohnung	DLG	140'630	0.1%
Uebrige Verkehrsbetriebe	DLG	1'333'457	0.8%
Uebrige Verkehrsbetriebe mit Wohnungen	DLG	558'758	0.3%
Uebriges Gebäude des Gastgewerbes, Kegelbahn	DLG	39'147	0.0%
Uebriges Gebäude des Gastgewerbes, Kegelbahn mit Wohnungen	DLG	19'258	0.0%
Uebriges Gebäude des Gesundheitswesens	DLG	110'672	0.1%
Uebriges Gebäude des Gesundheitswesens mit Wohnungen	DLG	74'858	0.0%
Uebriges Gebäude für Schulzweck	DLG	259'572	0.2%
Uebriges Gebäude für Schulzweck Wohnungen	DLG	42'051	0.0%
Verkehrsbetriebe d. Stadt ZH mit Wohnungen	DLG	7'668	0.0%
Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich	DLG	1'133'450	0.7%
Versammlungsgebäude	DLG	196'311	0.1%
Versammlungsgebäude mit Wohnungen	DLG	1'836	0.0%
Warenhaus, Einkaufszentrum	DLG	296'643	0.2%
Werk, Betrieb	DLG	2'657'451	1.6%
Werk, Betrieb mit Wohnungen	DLG	91'440	0.1%
Zimmervermietung	DLG	125'308	0.1%
Zimmervermietung mit Wohnungen	DLG	86'319	0.1%
Zoo	DLG	274'500	0.2%
Zoo mit Wohnungen	DLG	15'175	0.0%
Fabrik	PRG	1'667'848	1.0%
Fabrik mit Wohnungen	PRG	691'188	0.4%
Laborgebäude	PRG	334'923	0.2%
Laborgebäude mit Wohnungen	PRG	17'338	0.0%
Lager- und Magazingebäude, Silo	PRG	3'605'745	2.2%
Lager- und Magazingebäude, Silo mit Wohnungen	PRG	106'850	0.1%
Montagehalle	PRG	170'376	0.1%

Tabelle A-2: Aggregation der Nutzungstypen (Fortsetzung)

Gebäudeart	Nutzung	Rauminhalt	%
Servicegebäude, Tankstelle	PRG	117'718	0.1%
Servicegebäude, Tankstelle mit Wohnungen	PRG	9'012	0.0%
Uebriges Gebäude für Industrie	PRG	363'774	0.2%
Uebriges Gebäude für Industrie mit Wohnungen	PRG	69'902	0.0%
Werkstattgebäude	PRG	1'745'959	1.1%
Werkstattgebäude mit Wohnungen	PRG	177'381	0.1%
Einstellhalle, Parkhaus (mehr als 10 Autos)	Uebr	6'816'959	4.1%
Garagengebäude (1 - 9 Autos)	Uebr	1'101'960	0.7%
Garagengebäude (1 - 9 Autos) mit Wohnungen	Uebr	9'724	0.0%
Garten-,Weekendhaus,Klubhütte,Unterkunftsbaracke	Uebr	44'292	0.0%
Garten-,Weekendhaus,Klubhütte,Unterkunftsbaracke mit Wohnungen	Uebr	1'291	0.0%
Kirche, Moschee, Synagoge	Uebr	688'699	0.4%
Kirche, Moschee, Synagoge mit Wohnungen	Uebr	98'479	0.1%
Kirchgemeindehaus	Uebr	105'514	0.1%
Kirchgemeindehaus mit Wohnungen	Uebr	209'614	0.1%
Landwirtschafts-, Gärtnerei- und Oekonomiegebäude	Uebr	421'611	0.3%
Landwirtschafts-, Gärtnerei- und Oekonomiegebäude mit Wohnunge	Uebr	95'756	0.1%
Ueb. kl. Geb.,Unterst.,Velost.,Schopf,Schuppen ...mit Wohnunge	Uebr	9'702	0.0%
Ueb. kl. Geb.,Unterst.,Velost.,Schopf,Schuppen,...	Uebr	1'350'217	0.8%
Uebriges Kultusgebäude	Uebr	213'872	0.1%
Uebriges Kultusgebäude mit Wohnungen	Uebr	126'957	0.1%
Vereins- und Gemeinschaftszentrum, Mehrzweckhalle	Uebr	113'070	0.1%
Vereins- und Gemeinschaftszentrum,Mehrzweckhalle mit Wohnungen	Uebr	37'729	0.0%
Total		**165'630'646**	**100%**

Tabelle A-3: Die Zahlen zu der Abbildung 3-1.
Quellen: [Stat. Jahrbuch Stadt Zürich, 2007], Statistisches Amt des Kantons Zürich, [Lichtensteiger, 2006]

	Stadt Zürich	Kanton Zürich	Schweiz
EFH	4 %	12 %	15 %
MFH	45 %	39 %	32 %
DLG	38 %	14 %	12 %
PRG	5 %	19 %	20 %
Uebr	7 %	16 %	21 %
Total	166 Mio. m^3	647 Mio. m^3	3'740 Mio. m^3

Tabelle A-4: Daten zu den Infrastrukturnetzen. Die Erneuerungsraten sind gemittelt (gewichtet) nach den verschiedenen Materialien, bezüglich dem Volumen.

	Länge m	**Fläche** m^2	**Mineral. Volumen** m^3	**Erneuerungs-rate in** % pro Jahr	**Jährliche Flüsse** m^3/Jahr
Verkehr					
Strassen, Stadt und Kanton (ohne private)					
T1		2'853'788	1'569'583	1.6 %	25'581
T2		174'495	95'972	2.1 %	2'010
T3		513'842	323'720	2.1 %	6'857
T4		1'491'757	999'477	2.5 %	25'101
T5		687'635	563'861	2.5 %	14'236
T6		24'416	21'242	2.6 %	544
Weg, befestigt		2'460'000	1'131'600	1.3 %	14'711
Parkplätze, öffentl.		341'667	187'917	1.6 %	3'063
Weg unbefestigt		190'000	104'500	1.3 %	1'359
Autobahn					
T5		132'150	108'650	2.5 %	2'743
Schiene					
VBZ	83'000		267'260	3.3 %	8'909
SBB, SZU	318'492		923'174	3.3 %	30'772
Kunstbauten					-
Stadt und Kanton		382'157	746'398	1.6 %	11'583
Autobahn		117'850	230'175	1.5 %	3'592
Schiene		142'500	702'000	1.4 %	10'140
Wasser, Abwasser					
Wasser (WVZ)	1'118'932		2'265'656	1.9 %	42'628
Abwasser (ERZ)	927'000		2'756'348	1.0 %	27'563
Energie					
EWZ	2'130'000		2'555'293	2.2 %	56'728
Gasversorgung	798'834		784'718	1.5 %	11'771
Fernwärme	132'000		435'226	1.5 %	6'528
Total	**5'508'258**	**9'512'257**	**16'772'770**	**1.8 %**	**306'419**

Tabelle A-5: Volumen der Gebäude in der Stadt Zürich nach Nutzung und Alter in Mio. m^3. *Quelle: Statistik Stadt Zürich*

	EFH	**MFH**	**DLG**	**PRG**	**Uebr**	**Total**
vor 1900	0.37	9.79	7.75	1.48	0.54	**19.93**
1900 - 1925	1.29	9.42	4.89	1.18	0.45	**17.23**
1926 - 1945	2.71	14.72	5.24	1.06	0.61	**24.34**
1946 - 1965	1.46	16.53	11.30	2.27	1.59	**33.16**
1966 - 1985	0.32	14.40	20.89	2.19	5.22	**43.04**
1986 - 2005	0.43	10.08	13.51	0.89	3.03	**27.94**
Total	**6.58**	**74.94**	**63.59**	**9.08**	**11.45**	**165.63**

Tabelle A-6: Volumen der Gebäude in der Stadt Zürich nach Nutzung und Eigentümer in Mio. m^3. *Quelle: Statistik Stadt Zürich*

	EFH	MFH	DLG	PRG	Uebr	Total
Privat	4.75	37.72	7.25	1.07	2.53	**53.32**
Genossenschaft	1.35	11.60	2.38	0.21	1.06	**16.61**
Institution	0.08	16.07	29.11	6.04	3.19	**54.49**
Stadt Zürich	0.24	4.94	10.68	0.71	1.55	**18.12**
Verschiedene	0.16	4.60	14.17	1.05	3.11	**23.10**
Total	**6.58**	**74.94**	**63.59**	**9.08**	**11.45**	**165.63**

Tabelle A-7: Die Sanierungsraten bezüglich dem Bestand. Sie gelten für alle Nutzungstypen. Die Statistiken weisen die totalen Abfälle aus. Darum werden hier auch alle anderen Abfälle in die Berechnung miteinbezogen. *Quelle: [BWO, 2006], [Kt. Aargau, 1995]*

	Sanierungsrate
Beton	0.10 %
Mauerwerk	0.20 %
Mineralisch	0.60 %
Brennbar (KVA)	2.00 %
Holz	1.00 %
Metall	1.00 %
Rest	0.10 %
Aushub	0.00 %
Kies, Sand, Belag	0.10 %

Tabelle A-8: Resultat Bestand 2005: Die mineralischen Baustoffe, in Tonnen bzw. Masseprozent.

Gebäude	EFH	MFH	DLG	PRG	Uebr	Total
Beton	933'294	12'319'871	14'827'504	1'120'019	3'366'995	**32'567'683**
Mauerwerk	1'237'040	12'294'698	4'924'628	360'200	826'356	**19'642'921**
Mineralisch	229'188	2'606'448	1'694'889	89'528	295'048	**4'915'101**
Kies, Sand	516'243	3'449'370	2'997'544	399'408	1'503'960	**8'866'525**
Belag	32'952	220'173	191'333	25'494	95'997	**565'948**
Total	**2'948'716**	**30'890'559**	**24'635'897**	**1'994'649**	**6'088'356**	**66'558'179**
Anteil	*4 %*	*46 %*	*37 %*	*3 %*	*9 %*	*100 %*
Beton	32 %	40 %	60 %	56 %	55 %	**49 %**
Mauerwerk	42 %	40 %	20 %	18 %	14 %	**30 %**
Mineralisch	8 %	8 %	7 %	4 %	5 %	**7 %**
Kies, Sand	18 %	11 %	12 %	20 %	25 %	**13 %**
Belag	1 %	1 %	1 %	1 %	2 %	**1 %**
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	**100 %**

Infrastruktur	Strasse	Schiene	Wasser	Abwasser	Energie	Total
Beton	3'664'125	585'648	644'310	1'121'300	490'843	**6'506'226**
Mauerwerk	163'195	-	-	-	-	**163'195**
Mineralisch	-	-	-	-	-	**-**
Kies, Sand	6'696'012	1'477'078	3'195'510	3'662'623	5'713'151	**20'744'373**
Belag	1'697'476	37'184	-	-	-	**1'734'660**
Total	**12'220'808**	**2'099'910**	**3'839'820**	**4'783'923**	**6'203'994**	**29'148'454**
Anteil	*42 %*	*7 %*	*13 %*	*16 %*	*21 %*	*100 %*
Beton	30 %	28 %	17 %	23 %	8 %	**22 %**
Mauerwerk	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %	**1 %**
Mineralisch	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	**0 %**
Kies, Sand	55 %	70 %	83 %	77 %	92 %	**71 %**
Belag	14 %	2 %	0 %	0 %	0 %	**6 %**
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	**100 %**

Stadt Zürich	Gebäude	Infrastruktur	Total	Gebäude	Infrastruktur	Total
Beton	32'567'683	6'506'226	**39'073'909**	83 %	17 %	100 %
Mauerwerk	19'642'921	163'195	**19'806'117**	99 %	1 %	100 %
Mineralisch	4'915'101	-	**4'915'101**	100 %	0 %	100 %
Kies, Sand	8'866'525	20'744'373	**29'610'898**	30 %	70 %	100 %
Belag	565'948	1'734'660	**2'300'608**	25 %	75 %	100 %
Total	**66'558'179**	**29'148'454**	**95'706'633**	**70 %**	**30 %**	**100 %**

Tabelle A-9: Die Längen der Infrastrukturnetze in der Stadt Zürich.
Quelle: Angaben der Netzbetreiber

	Länge km	**Anteil** %
Wasser (WVZ)	1'119	22 %
Abwasser (ERZ)	927	18 %
Strom (EWZ)	2'130	42 %
Gasversorgung	799	16 %
Fernwärme	132	3 %
Total	5'107	100 %

Tabelle A-10: Der Bestand und die Neubauten der Nutzungskategorie «Übrige Gebäude» (Volumen). Für die Neubauten wurde der Mittelwert der Jahre 2002-2005 genommen.
Quelle: Statistik Stadt Zürich

	Bestand 2005	Neubau (MW 02-05)	
	m^3	m^3/a	%
Einstellhalle, Parkhaus (mehr als 10 Autos)	6'816'959	129'367	1.9 %
Garagengebäude (1-9 Autos)	1'111'684	4'557	0.4 %
Garten-, Weekendhaus, Klubhütte, Baracke	45'583	108	0.2 %
Landwirtschafts-, Gärtnereigebäude	517'367	2'775	0.5 %
Ueb. kl. Geb., Unterstand, Schopf, Schuppen	1'359'919	16'025	1.2 %
Uebriges Kultusgebäude	340'829	15	0.0 %
Gemeinschaftszentrum, Mehrzweckhalle	150'799	920	0.6 %
Kirche, Moschee, Synagoge, Kirchgemeindehaus	1'102'306	-	0.0 %
Total	11'445'446	153'767	1.3%

Tabelle A-11: Die Veränderung im Bestand der Parkhäuser in der Stadt Zürich von 2002-2005.
Quelle: Statistik Stadt Zürich

Jahr	Einstellhalle, Parkhaus (mehr als 10 Autos) m^3	Garagengebäude (1 - 9 Autos) m^3	Total m^3	Zunahme zum Vorjahr %
2001	6'249'060	1'079'141	7'328'201	
2002	6'251'521	1'089'995	7'341'516	0.18 %
2003	6'453'068	1'097'498	7'550'566	2.85 %
2004	6'635'002	1'107'825	7'742'827	2.55 %
2005	6'816'959	1'101'960	7'918'919	2.27 %

Tabelle A-12: Verteilung der mineralischen Bauabfälle aus der Stadt Zürich auf Aufbereitung und Deponie für das Jahr 2005

	Aus Sanierung und Neubau Tonnen	**Aus Rückbau** Tonnen	**Aus Infrastruktur** Tonnen	**Total** Tonnen
Baufälle Total				
Betonabbruch	53'595	135'353	49'886	238'835
Mischabbruch	99'143	97'751	3'264	200'158
Strassenaufbruch	15'886	37'809	430'068	483'763
Ausbauasphalt	1'014	2'413	45'126	48'553
Mineralisch	32'825	41'643	-	74'467
Total	202'463	314'969	528'344	1'045'776
Flüsse in Deponie				
Betonabbruch	16'079	6'768	2'494	25'341
Mischabbruch	49'572	14'663	490	64'724
Strassenaufbruch	4'766	1'890	21'503	28'160
Ausbauasphalt	304	121	2'256	2'681
Mineralisch	32'825	41'643	-	74'467
Total	103'545	65'084	26'744	195'373
Flüsse in Aufbereitung				
Betonabbruch	37'517	128'586	47'392	213'494
Mischabbruch	49'572	83'088	2'774	135'434
Strassenaufbruch	11'120	35'918	408'565	455'603
Ausbauasphalt	710	2'293	42'869	45'872
Mineralisch	-	-	-	0
Total	98'918	249'885	501'600	850'403
in % vom Total **= Verwertungsquote**	49 %	79 %	95 %	81 %

Tabelle A-13: Bevölkerung in der Schweiz 2005 für die gesamte Schweiz, den Kanton Zürich und die Stadt Zürich.

Einwohner 2005	Anzahl	Quelle
Schweiz	7'459'100	Bundesamt für Statistik (BFS)
Kanton Zürich	1'264'141	Statistisches Amt des Kantons Zürich
Stadt Zürich	366'809	Statistik Stadt Zürich

Tabelle A-14: Die Verteilung der Materialien (nicht Bauabfälle!) auf Aufbereitung und Deponie für das Jahr 2005.

	Gebäude Tonnen	Infrastruktur Tonnen	Total Tonnen
Outputflüsse (total)			
Beton	276'382	103'036	379'418
Mauerwerk	109'460	1'632	111'092
Kies, Sand	53'694	378'550	432'245
Belag	3'427	45'126	48'553
Mineralisch	74'467	-	74'467
Total	517'432	528'344	1'045'776
Flüsse in Deponie			
Beton	54'720	5'315	60'035
Mauerwerk	32'361	245	32'606
Kies, Sand	6'656	18'928	25'584
Belag	425	2'256	2'681
Mineralisch	74'467	-	74'467
Total	168'629	26'744	195'373
Flüsse in Aufbereitung			
Beton	221'662	97'721	319'384
Mauerwerk	77'100	1'387	78'487
Kies, Sand	47'038	359'623	406'661
Belag	3'002	42'869	45'872
Mineralisch	-	-	-
Total	348'803	501'600	850'403
in % vom Total	67 %	95 %	81 %

Tabelle A-15: Zusammenfassung der Input- und Outputflüsse für das Jahr 2005.

Gebäude

	Inputfluss		Lager		Rate
	Tonnen	%	1'000 Tonnen	%	Fluss/Lager in %
EFH	38'994	3%	2'986	4%	1.31%
MFH	469'749	39%	31'312	46%	1.50%
DLG	459'991	39%	25'991	38%	1.77%
PRG	10'540	1%	2'071	3%	0.51%
Uebr	214'174	18%	6'023	9%	3.56%
Total	1'193'448	100%	68'383	100%	1.75%

	Outputfluss		Lager		Rate
	Tonnen	%	1'000 Tonnen	%	Fluss/Lager in %
EFH	13'938	3%	2'986	4%	0.47%
MFH	97'004	19%	31'312	46%	0.31%
DLG	272'629	53%	25'991	38%	1.05%
PRG	95'105	18%	2'071	3%	4.59%
Uebr	38'757	7%	6'023	9%	0.64%
Total	517'433	100%	68'383	100%	0.76%

Infrastruktur

	Input = Output		Lager		Rate
	Tonnen	%	1'000 Tonnen	%	Fluss/Lager in %
Strasse	216'480	41%	12'220	42%	1.77%
Schiene	69'997	13%	2'100	7%	3.33%
Wasser	70'353	13%	3'840	13%	1.83%
Abwasser	47'839	9%	4'784	16%	1.00%
Energie	123'675	23%	6'204	21%	1.99%
Total	528'344	100%	29'148	100%	1.81%

Tabelle A-16: Die in der Studie verwendeten Dichten für die Umrechnung von Volumen auf Massen. Die Werte wurden aus [Kt. Aargau, 1995] berechnet.

Material	**Dichte** Tonnen/m^3
Beton	2.40
Mauerwerk	1.50
Miner. Fraktion	1.71
Rest vermischt	1.58
Strassenaufbruch	1.60
Aushub	1.60
Metall	7.00
Holz	0.48
Brennbares (KVA)	0.10
Alle (gemittelt, ohne Aushub)	1.65