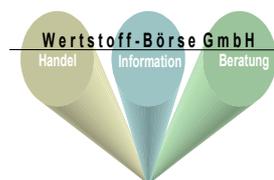


Wertstoff-Börse GmbH
Alter Zürichweg 21
8952 Schlieren
Tel 044 371 40 90
Fax 044 371 40 04
info@wertstoff-boerse.ch
www.wertstoff-boerse.ch



Schlussbericht der Phase II

Ressourcenmodell der mineralischen Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich

Dynamische Modellierung 1995–2050

Ausgearbeitet durch

Martin Schneider und Stefan Rubli
Wertstoff-Börse GmbH

Auftraggeber

Tiefbauamt der Stadt Zürich
Amt für Hochbauten der Stadt Zürich

Schlieren, Januar 2009

Das vorliegende Projekt wurde von den folgenden Personen in der Begleitgruppe unterstützt

Dr. H. Gugerli, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Fachstelle Nachhaltiges Bauen

D. Göbbels, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Werterhaltung

Dr. A. Lalive, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Fachstelle Nachhaltiges Bauen

W. Zuberbühler, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Werterhaltung

M. Horat, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Werterhaltung

B. von Felten, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich, Umweltschutzfachstelle

Toni W. Püntener, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich, Umweltschutzfachstelle

Prof. Dr. H. Wallbaum, ETH, Professur für Nachhaltiges Bauen

R. Wagner, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Kanton Zürich, Abfallwirtschaft

Dr. Th. Lichtensteiger, Eawag, Umweltbeauftragter

Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlich für ihr Engagement gedankt!

Impressum

Titel	Ressourcenmodell der mineralischen Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich. Dynamische Modellierung 1995–2050
Auftraggeber	Tiefbauamt der Stadt Zürich Wererhaltung Werdmühleplatz 3 8023 Zürich Amt für Hochbauten der Stadt Zürich Fachstelle Nachhaltiges Bauen Dr. H. Gugerli Lindenhofstrasse 21 8021 Zürich
Autoren	Martin Schneider, Dr. Stefan Rubli Wertstoff-Börse GmbH Alter Zürichweg 21 8952 Schlieren 044 371 40 90 info@wertstoff-boerse.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Bisherige Arbeiten.....	1
1.2 Ziel der Untersuchung.....	2
2 Methoden.....	4
2.1 Das System Stadt Zürich.....	4
2.2 Das Modell des Gebäudebestandes.....	6
2.3 Grundlagen für die Modellierung.....	15
2.4 Die Berechnung des Gebäudebestandes.....	20
2.5 Die Infrastruktursysteme.....	24
2.6 Die verschiedenen Szenarien.....	26
3 Resultate.....	36
3.1 Resultate von 100 Realisierungen des Modells.....	36
3.2 Das Szenario KONSTANT, Startwerte und Referenz.....	40
3.3 Resultate der Szenarien SANIEREN, ERSETZEN, KOMBINIERT.....	50
3.4 Energieszenarien.....	55
3.5 Einfluss der Szenarien auf den Input von RC-Baustoffen.....	62
3.6 Einfluss der Szenarien im Infrastrukturbereich auf die Materialflüsse.....	68
4 Diskussion der Resultate.....	70
4.1 Materiallager im Gebäudepark und Infrastruktur.....	70
4.2 Materialflüsse.....	72
4.3 Graue Energie und Energiebedarf für den Betrieb der Gebäude.....	80
5 Fazit.....	88
Literaturverzeichnis.....	91
Abbildungsverzeichnis.....	92
Tabellenverzeichnis.....	94
Anhang.....	95

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung und Methoden

Das Amt für Hochbauten (AHB, Fachstelle Nachhaltiges Bauen) und das Tiefbauamt der Stadt Zürich (TAZ, Werterhaltung Strassen) lassen gemeinsam das Potential eines optimierten Ressourcenmanagements in der Stadt Zürich untersuchen. Erstmals wurde dazu eine integrale Sichtweise über die ganze Stadt als Grundlage verwendet, d.h. sämtliche Bereiche des Hoch- und Tiefbaus werden in einem System «Stadt Zürich» berücksichtigt.

Im Jahr 2001 wurde vom BAUF eine erste umfassende Analyse der Bauabfälle aus dem Hoch- und Tiefbau veröffentlicht [BUWAL, 2001]. Diese Studie bildet immer noch die Grundlage für viele wissenschaftliche Arbeiten, die in diesem Bereich in der Schweiz gemacht wurden. Verschiedene Autoren haben die Entwicklung des Wohngebäudebestandes in Modellen erfasst, um Prognosen über deren Wachstum und Veränderung anzugeben [Kost 2006], [BFE 2004], [Koschütz, Pfeiffer 2005], [Lichtensteiger 2006]. Erstmals wurden die mineralischen Baustofflager und -flüsse auf der Ebene einer Schweizer Stadt in diesem Detaillierungsgrad sowohl für den Hochbau (Gebäudepark) als auch für den Tiefbau (Infrastruktursysteme) als Gesamtsystem erfasst und mit einem Modell Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen gemacht.

Das gesamte Projekt wurde in zwei Phasen aufgeteilt. In der Phase I wurde eine Bestandesaufnahme für das Jahr 2005 durchgeführt und die Materiallager und -flüsse im Gebäudepark und den Infrastruktursystemen detailliert erfasst [Schneider, Rubli 2007]. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Phase II. Hier wurde eine dynamische Modellierung durchgeführt, welche das Gesamtsystem Stadt Zürich für die Zeit von 1995–2050 abbildet.

Die politische Grenze der Stadt Zürich bildet die räumliche Systemgrenze des untersuchten Gebietes. Die Lager und Flüsse werden jeweils über ein Jahr bilanziert. Zunächst wird das System in die zwei Hauptprozesse «Bau, Betrieb und Rückbau (BBR) des Gebäudeparks» und «Bau, Betrieb und Rückbau der Infrastruktur» unterteilt und diese dann weiter in die Subprozesse «BBR Einfamilienhäuser» (EFH), «BBR Mehrfamilienhäuser» (MFH), «BBR Dienstleistungsgebäude» (DLG), «BBR Produktionsgebäude (PRG) und die «BBR übrigen Gebäude» (Uebr; Kirchen, Parkhäuser, Landwirtschaftsgebäude etc.) sowie die «BBR Strassen», «BBR Schienen», «BBR Wasser», «BBR Abwasser» und die «BBR Energiesysteme» aufgeteilt.

Kern des dynamischen Modells ist die Beschreibung der zeitlichen Veränderung des Gebäudebestandes in Anhängigkeit von exogenen Entwicklungsfaktoren. Damit lassen sich die entsprechenden Veränderungen der Materialflüsse und der Lager berechnen. Basierend auf dem Gebäudebestandsmodell werden vier Szenarien gerechnet (Tabelle 1), um die Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungs- und Rückbauraten abzubilden. Im Szenario KONSTANT werden die Sanierungs- und Rückbauraten auf dem durchschnittlichen Wert von 2000–2005 über den betrachteten Zeitraum konstant belassen. Für das Szenario SANIEREN werden die Sanierungsraten, für das Szenario ERSETZEN die Rückbauraten jeweils bis ins Jahr

Tabelle 1 Die vier Szenarien für die Entwicklung des Gebäudebestandes und ihr Kurzbeschrieb.

Szenario	Beschreibung
KONSTANT	Sanierungsrate und Rückbaurrate konstant auf dem Stand von 2000-2005
SANIEREN	Sanierungsraten bis ins Jahr 2050 deutlich vergrössern.
ERSETZEN	Rückbauraten bis ins Jahr 2050 deutlich vergrössern.
KOMBINIERT	Sanierungs- und Rückbauraten bis ins Jahr 2050 deutlich vergrössern.

2050 deutlich angehoben. Diese zwei Szenarien sind im Szenario KOMBINIERT zusammengefasst, dort werden die Sanierungs- und Rückbauraten beide erhöht.

Da zu allen Gebäuden auch ihr Energiestandard (konventionell, Minergie, Minergie-P) simuliert wird, können Aussagen über den Endenergiebedarf für die Wärme- und Warmwassernutzung gemacht werden. Mittels zweier weiterer Szenarien wird untersucht, wie sich der forcierte Input der Recyclingmaterialien im Verhältnis zum Primärmaterialfluss verändern könnte und ob die anfallenden RC-Baustoffe zu hundert Prozent wieder in der Stadt Zürich eingesetzt werden könnten. Drei weitere Szenarien befassen sich mit den Veränderungen in der Infrastruktur. Hier sollen die Auswirkung von Änderungen der Leitungs- und Strassenlängen sowie von Erneuerungsraten aufgezeigt werden.

Die Entwicklung des Gebäudebestandes im dynamischen Modell orientiert sich an der zukünftigen Nachfrage nach Wohnraum und Arbeitsplätzen. Diese ist abhängig von der Entwicklung der Wohnbevölkerung, den Beschäftigten so wie vom jeweiligen spezifischen Flächenbedarf pro Person bzw. pro Beschäftigte. Die Funktion der Nachfrageentwicklung basiert auf bestehenden Prognosen [ECO₂, 2007], [Stat. JB 07], welche bis ins Jahr 2035 reichen und mit eigenen Annahmen bis ins Jahr 2050 ergänzt wurden. Damit lässt sich das prognostizierte Gebäudevolumen auf jährlicher Basis berechnen. Im Modell wird der Gebäudebestand ab dem Jahr 1995 virtuell fortgeschrieben, indem ein Angebot an Gebäudevolumen generiert wird, welches die oben beschriebene Nachfrage decken soll. Das Angebot kann durch Ersatzneubeuten oder durch Neubauten gedeckt werden. Im Modell werden die vier Schritte Rückbau, Sanierung, Ersatzneubau und Neubau auf Jahresbasis durchgerechnet. Bei jedem Eingriff in ein Gebäude (Sanierung, Neubau) wird auch dessen Energiestandard mitbestimmt.

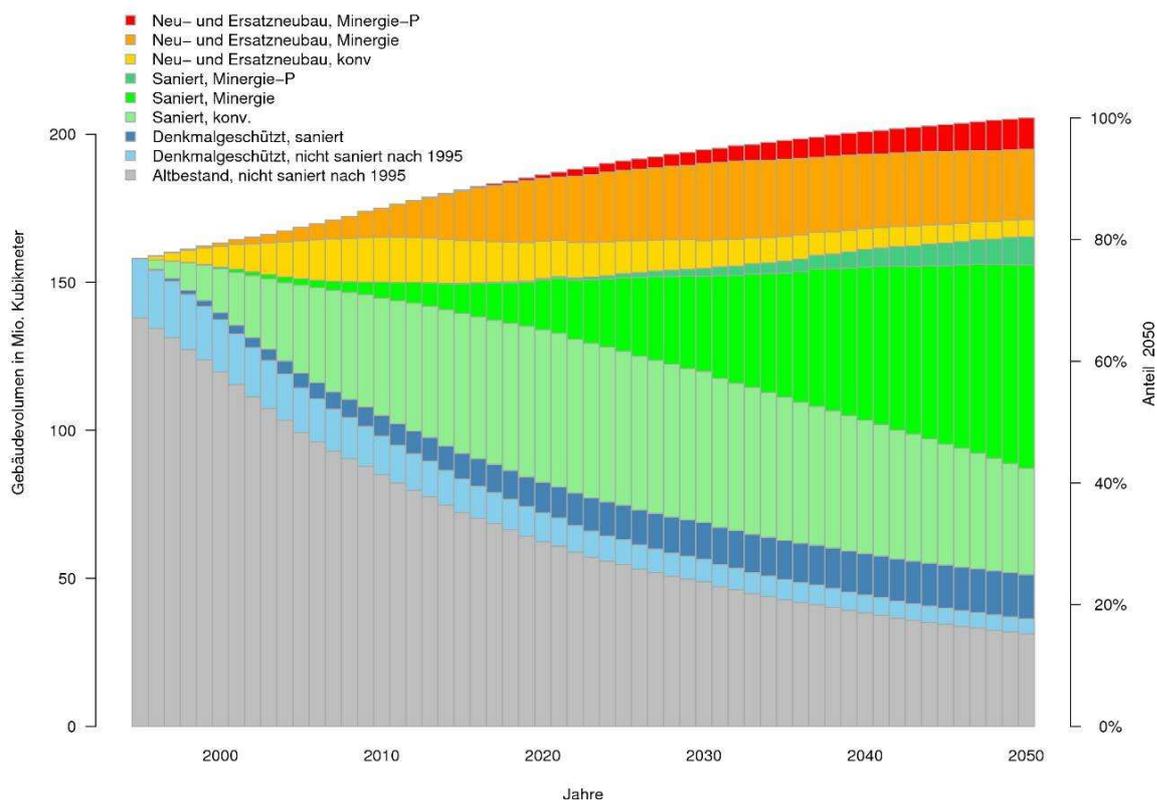
Sind die Veränderungen des Gebäudebestandes bekannt, können die Materiallager und die Materialflüsse berechnet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Gebäude in Abhängigkeit seines Baujahres und seiner Nutzung eine typische Materialisierung aufweist. Die zugrunde liegende Methode wurde in der Phase I ausführlich beschrieben [Schneider, Rubli 2007].

Die Daten zu den Infrastruktursystemen werden vollumfänglich aus der Phase I [Schneider, Rubli 2007] direkt übernommen. Die totale Länge der Strassen, Schienen und Werksleitungen beträgt für das Jahr 2005 rund 7'500 km. Je ca. ein Drittel entfällt auf den Verkehr, das Wasser/die Entwässerung und die Energie. Länge und Verteilung der Infrastruktursysteme werden für die Szenarien des Gebäudebestandes konstant belassen.

Resultate und Diskussion

Gebäudebestand

In der Figur 1 ist die Entwicklung des Gebäudevolumens für das Referenzszenario KONSTANT dargestellt. Grundlage für dieses Szenario bilden die durchschnittlichen Sanierungs- und Rückbauraten der Jahre 2000–2005, welche für die modellierte Zeit konstant belassen wurden. Der Altbestand (grau) wird saniert (grün, dunkelblau) und es wird neu gebaut (rot). Die Neu- und Ersatzneubauten sind für diese Darstellung in der Kategorie Neubau zusammengefasst. Mit den verschiedenen Farbtönen lässt sich für die Sanierungen und Neubauten jeweils der Energiestandard ablesen (konventionell, Minergie oder Minergie-P). Die konventionell erstellten Neubauten ab 1995 werden bis im Jahr 2050 keinen grossen Anteil aufweisen, da dann die meisten Neubauten gemäss den Vorgaben dieses Szenarios den Minergie- oder Minergie-P-Standard aufweisen. Hingegen wird über 20 % des Altbestandes auf konventionelle Weise saniert sein. Zudem bleibt knapp 20 % des Bestandes von 1995 bis ins Jahr 2050 ohne Eingriff bestehen.



Figur 1 Eine detaillierte Darstellung der Veränderung des Gebäudebestandes bezüglich des Energiestandards konventionell, Minergie und Minergie-P. Der Altbestand von 1995 (grau) wird saniert (grün) oder neugebaut (rot). Bei den Neubauten wurde für diese Darstellung Neubau und Ersatzneubau zusammengefasst. Die denkmalgeschützten Gebäude sind blau dargestellt.

Insgesamt werden im Jahr 2050 über 40 % des Bestandes immer noch eine energetisch ungünstige Bauweise aufweisen.

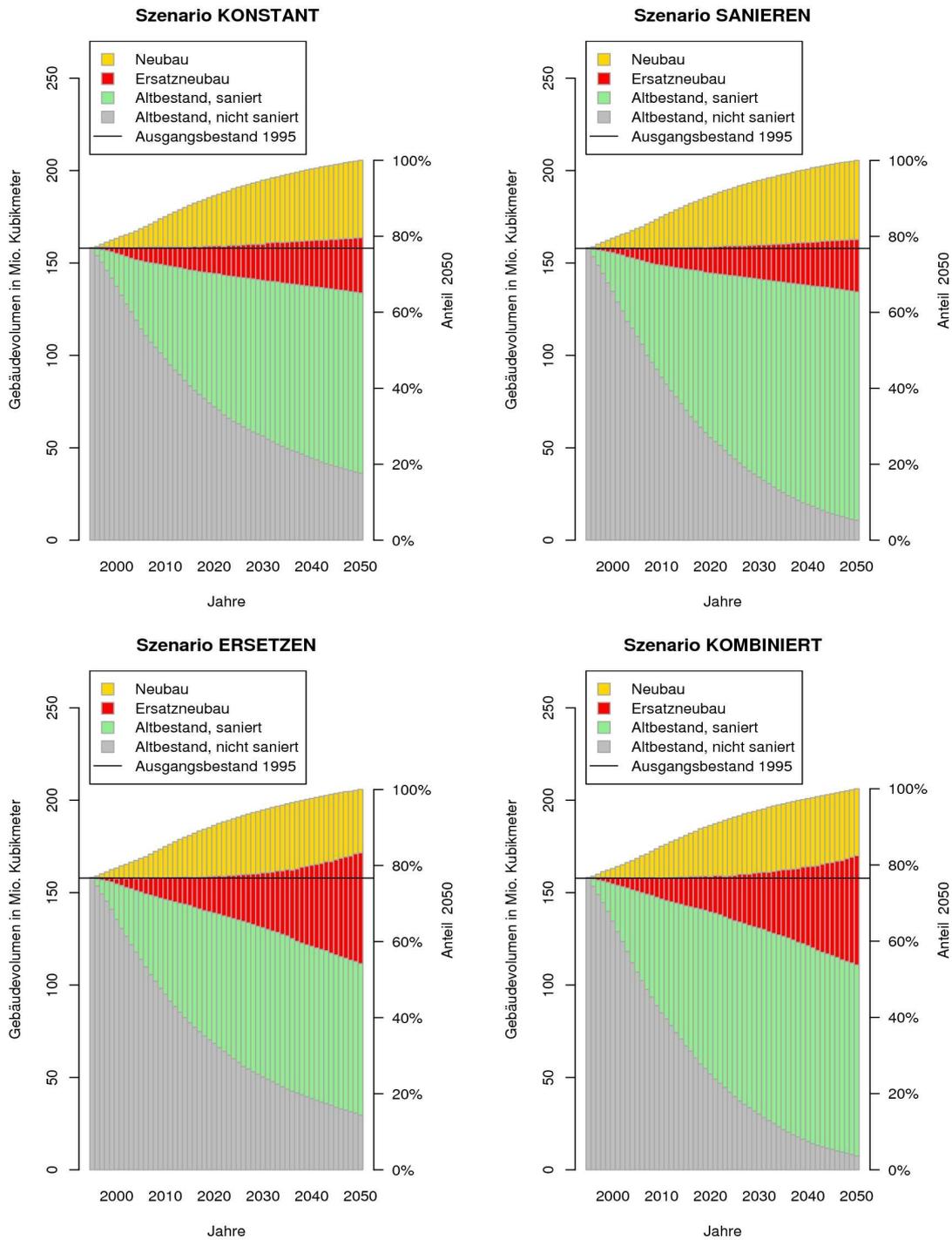
Wenn die entsprechenden Resultate für die vier Szenarien KONSTANT, SANIEREN, ERSETZEN und KOMBINIERT verglichen werden (Figur 2), so zeigt sich, dass im Szenario KOMBINIERT mit deutlich erhöhten Sanierungs- und Rückbauraten bis im Jahr 2050 der Anteil des nicht sanierten Altbestandes auf unter 5 % sinkt (unten rechts). Der Anteil der Ersatzneubauten wird bis 2050 in diesem Szenario über 15 % betragen.

Materiallager im Gebäudebestand und den Infrastruktursystemen

Die Materiallager der mineralischen Materialien werden in der Stadt Zürich weithin zunehmen, da der Gebäudebestand weiter von 156 Mio. Kubikmetern (1995) auf 205 Mio. Kubikmeter (2050) wachsen wird. Dies entspricht einer Zunahme von über 30 % im Vergleich zum heutigen Bestand. Je nach Szenario, d. h. ob mehr oder weniger Gebäude ersetzt werden, verändert sich dabei die Zusammensetzung des Materiallagers. Bei den Infrastruktursystemen wird das Wachstum eher moderat ausfallen.

Mengenmässig wird der grösste Lagerzuwachs im Gebäudepark durch Beton erfolgen, weil Beton heute der Hauptbaustoff in den Gebäude ist und dies voraussichtlich auch in Zukunft so bleiben wird. Der Anteil von Mauerwerk bleibt tief. Die weiteren mineralischen Baustoffe wie Gips, Keramik, Glas machen bezüglich dem totalen Lager nur einen kleinen Teil der Materialmasse aus. Wenn die Rückbauraten der Gebäude erhöht wird, wächst gleichzeitig deren Ersatzneubaurate. Dadurch werden Gebäude zurückgebaut, die einen grossen Anteil von Mauerwerk haben. Der Ersatzneubau weist einen grösserem Betonanteil und einen kleineren Mauerwerksanteil auf. Dadurch verändern sich das Lager und die Zusammensetzung des Bestandes auch aufgrund der Rückbauraten. Zudem weisen die Ersatzneubauten grössere Gebäudevolumen auf als die zuvor zurückgebauten Gebäude.

Die Lager der mineralischen Materialien pro Einwohner nehmen zwischen den einzelnen Szenarien sehr unterschiedlich zu. Ausgehend von 227 Tonnen pro Einwohner (t/cap) im Jahr 1995 steigen die Lager auf 274 t/cap (KONSTANT) bzw. 305 t/cap (KOMBINIERT), also um 20–30 %.

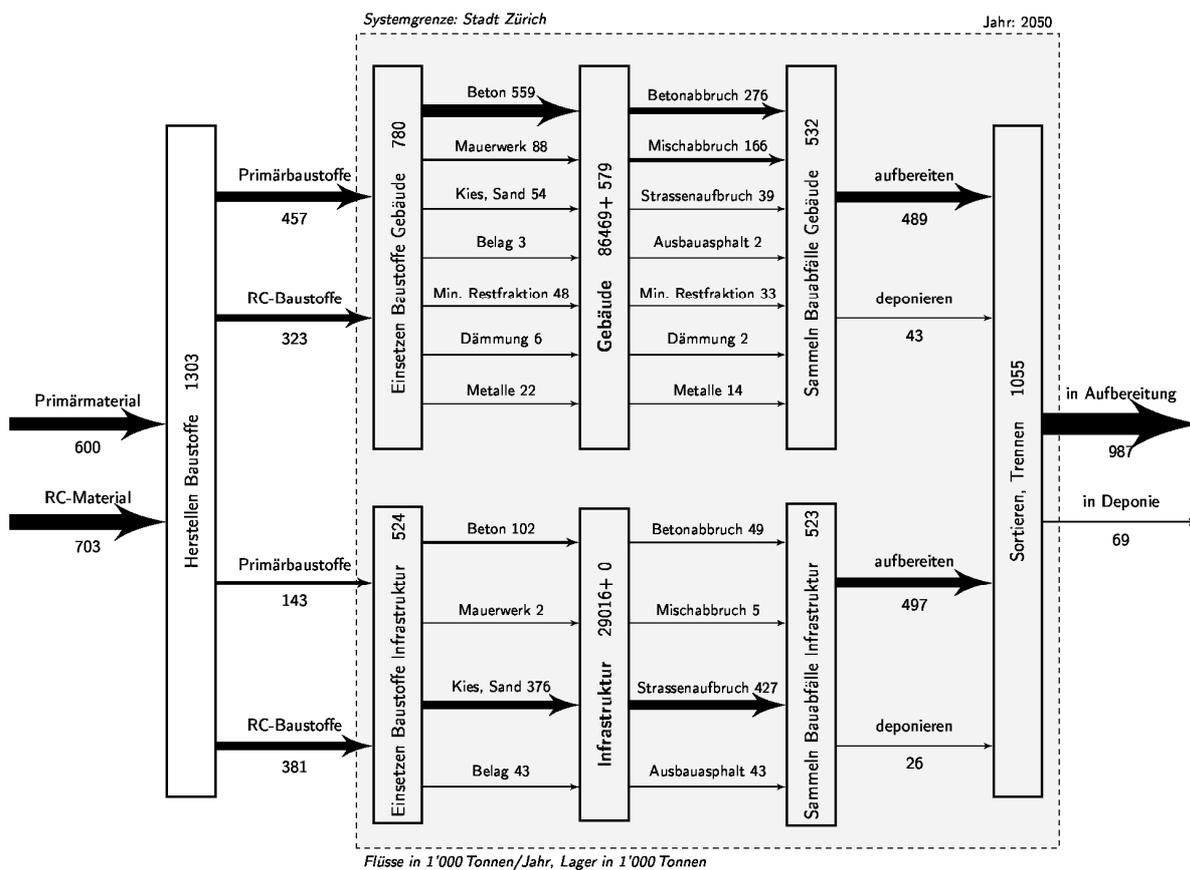


Figur 2 Die Entwicklung des Gebäudebestandes für die vier Szenarien. Im Vergleich zum Referenzszenario KONSTANT (oben links) wird im Szenario KOMBINIERT (unten rechts) der Bestand bis ins Jahr 2050 deutlich stärker verändert. Der Anteil des nicht sanierten Altbestandes sinkt auf unter fünf Prozent.

Materialflüsse von Gebäuden und Infrastruktur

Die Input- und Outputflüsse des Gebäudeparks sind in der Figur 3 illustriert. In den Szenarien KONSTANT und SANIEREN (erhöhte Sanierungsraten) wird der Input in den Gebäudebestand in Zukunft von heute knapp 1 Mio. Tonnen eher sinken, da sich das Wachstum des Bestandes abschwächen wird. Bei erhöhten Rückbauraten, wie dies bei den Szenarien ERSETZTEN und KOMBINIERT vorausgesetzt wurde, würden die Inputflüsse bis auf 1.3 Mio. Tonnen steigen, da viel mehr Ersatzneubauten erstellt würden. Die Outputflüsse werden in jedem Szenario steigen. Das liegt daran, dass der Gebäudebestand in absoluten Zahlen weiter wächst und daher auch bei konstanten Sanierungs- und Rückbauraten die Mengen zunehmen werden. Sollten diese Raten steigen, dann würden auch die damit verbundenen Materialflüsse ansteigen.

Der Beitrag der Infrastrukturwerke zu den totalen Materialflüssen wird relativ konstant bleiben. Input und Output betragen heute rund 0.5 Mio. Tonnen pro Jahr. Sollten die Erneuerungsraten um 20 % zunehmen und die Längen bis 2050 um 20 % wachsen, dann würden diese Flüsse auf über 0.8 Mio. Tonnen ansteigen. Das würde für das Gesamtsystem eine Zunahme von ca. 20 % bedeuten.



Figur 3 Das System Stadt Zürich im Jahr 2050 – dem Ende des betrachteten Zeitraums – nach dem Szenario KONSTANT. Es werden mehr Rückbaumaterialien aufbereitet und deutlich mehr RC-Baustoffe eingesetzt als heute.

Bei den RC-Baustoffen wird eine Zunahme angenommen, die weit über dem Wachstum des Bestandes liegt. Das hängt damit zusammen, dass das Wachstum der RC-Betonflüsse und RC-Kiesflüsse stärker ist als das Wachstum des Bestandes. Gegenüber dem Jahr 2000 könnte sich der Input dieser RC-Baustoffe vervierfachen. Während des gesamten modellierten Zeitraumes ist der Output von Rückbaumaterialien, der in die Aufbereitung für RC-Baustoffe gelangt, unter den vorausgesetzten Bedingungen grösser als der Input von RC-Baustoffen in das System Stadt Zürich. Mit anderen Worten, es besteht auf der Ebene Stadt Zürich ein Überangebot an mineralischen RC-Baustoffen.

Grundsätzlich wird es unter gewissen Bedingungen möglich sein, den grössten Teil der in der Stadt Zürich anfallenden Rückbaustoffe wieder in der Stadt einzusetzen. Allerdings müssen die RC-Baustoffe auf breiter Front eingesetzt werden und die Anteile an RC-Granulaten in RC-Baustoffen müssen deutlich höher sein als heute. Zudem muss ein Materialaustausch zwischen Hoch- und Tiefbau stattfinden, nur so wird es möglich sein das anfallende Rückbaumaterial möglichst vollständig in das System Stadt Zürich zurückzuführen.

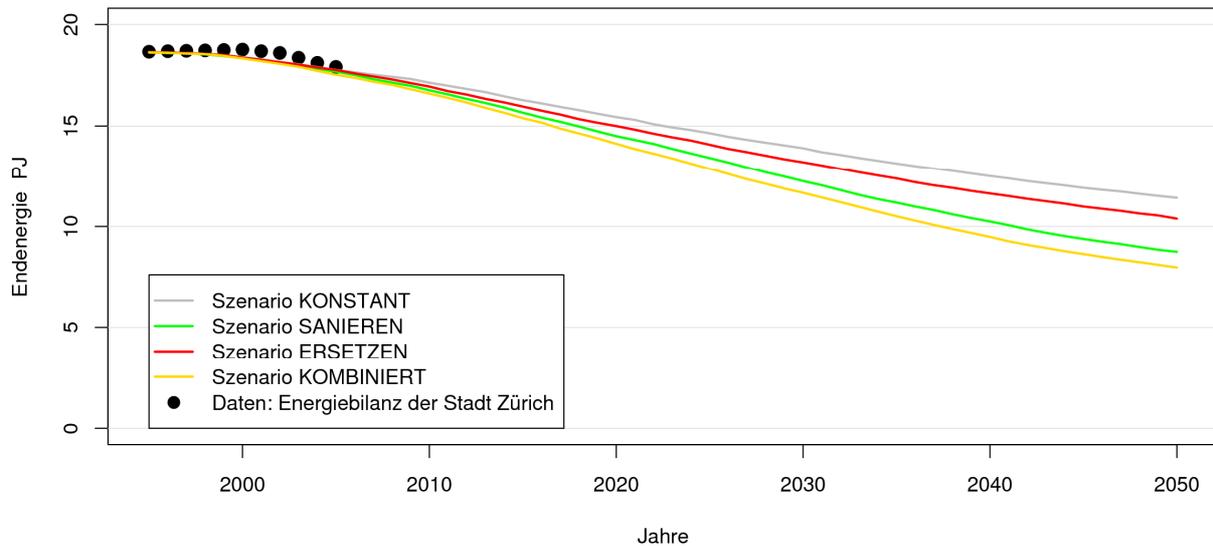
Input von Grauer Energie in den Gebäudepark

Der Eintrag von Grauer Energie in den Gebäudepark verläuft proportional zum Input der Materialien. Diese materialspezifische Berechnung konnte durch pauschale Werte für Sanierung und Neubau ergänzt werden. Sie betragen $1253 \text{ MJ/m}^2 \text{ EBF}$ bei Sanierungen und $4826 \text{ MJ/m}^2 \text{ EBF}$ bei Neubauten. Diese Werte liegen im Bereich von verschiedenen Literaturangaben [Koschütz, Pfeiffer 2005].

Werden die Resultate des Inputs von Grauer Energie bei den vier Szenarien des Gebäudeparks verglichen, dann wird sofort deutlich, dass mit verstärktem Ersatzneubau auch ein hoher Eintrag von Grauer Energie erfolgt. Das ist nicht weiter erstaunlich, da bei einer Sanierung der grösste Teil der Bausubstanz eines Gebäudes erhalten bleibt. Hingegen wird ein Ersatzneubau vollständig neu erstellt.

Endenergie für Raumwärme und Warmwasser

Aus der Veränderung des Gebäudebestandes kann auf Grund der Bauweise konventionell, Minergie und Minergie-P der Energiebedarf des Gebäudebestandes abgeschätzt werden. Die benötigte Endenergie für Raumwärme und Warmwasser des Bestandes beträgt für die Stadt Zürich um die Jahrtausendwende rund $18.5 \text{ Petajoule pro Jahr (PJ/a)}$ (vgl. Figur 4). Die modellierten Werte stimmen hier gut mit den bekannten Daten für die Stadt Zürich überein (Energiestatistik der Stadt Zürich). Im Szenario KONSTANT sinkt der Bedarf von Endenergie bis ins Jahr 2050 auf 11.4 PJ/a , im Szenario KOMBINIERT, dem wirkungsvollsten Szenario, sinkt er sogar bis auf 8.0 PJ/a . Das heisst, dass eine Halbierung des Endenergiebedarfs im Gebäudebereich bis ins Jahr 2050 mit vermehrten Sanierungen und Ersatzneubauten erreicht werden könnte. Der Unterschied an Energiebedarf zwischen den Szenarien beträgt somit bezüglich des Szenarios KONSTANT über 30 %.



Figur 4 Der Endenergiebedarf des Gebäudeparks für Raumwärme und Warmwasser. Er wird in allen Szenarien deutlich abnehmen. Das Szenario KOMBINIERT zeigt am meisten Wirkung. Quelle der Daten: Energiebilanz der Stadt Zürich.

Fazit

Das entwickelte dynamisch Modell ermöglicht die Berechnung der zeitlichen Veränderung der Materiallager sowie der Input- und Outputflüsse in Abhängigkeit von exogenen Faktoren. Zudem können weitere Aspekte wie beispielsweise die mit den Materialflüssen verbundene Graue Energie oder der Endenergieverbrauch bei der Nutzung des Gebäudeparks mit einbezogen werden. Dazu wurden verschiedene Szenarien dynamisch modelliert, um die Auswirkung von intensivierten Sanierungs- und Rückbautätigkeit auf das System Stadt Zürich aufzuzeigen. Ebenso wurde ein höherer Input von Recycling-Baustoffen sowie von geänderten Erneuerungsraten der Infrastruktursysteme simuliert. Aus den verschiedenen Szenarien konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden.

Materiallager und -flüsse

- Der Gebäudepark in der Stadt Zürich befindet sich noch immer in einer Wachstumsphase.
- Gemäss den Annahmen im Gebäudebestandsmodell wird das Gebäudevolumen bis zum Jahr 2050 um über 30 % von 158 Mio. m³ auf 203 Mio. m³ zunehmen. Dementsprechend wird auch das Materiallager anwachsen, wobei sich die Zusammensetzung der Materialien in Abhängigkeit des gewählten Szenarios verändern wird; der Betonanteil wird auf Kosten des Mauerwerks steigen.
- Auch wenn die Längen der Infrastruktursysteme leicht zunehmen werden, ist ihr Wachstum im Vergleich zum Gebäudepark eher gering.

- Bleiben die Sanierungs- und Rückbauraten auf dem Niveau von 2000–2005, dann nehmen die totalen Inputflüsse langsam ab, da sich das Wachstum des Gebäudebestandes verlangsamt. Die totalen Outputflüsse nehmen aber trotzdem zu, da der Gebäudebestand in absoluten Zahlen anwächst. Erhöhen sich die Sanierungs- und Rückbauraten (bzw. Ersatzneubauraten) jedoch bis im Jahr 2050, wie dies die Szenarien SANIEREN, ERSETZEN und KOMBINIERT voraussetzen, dann wachsen die Input- und Outputflüsse stark an.

Einsatz von Recycling-Baustoffen

- Das Potential für den Einsatz von RC-Baustoffen wird nicht genügend ausgeschöpft. Der Anteil von RC-Beton und RC-Kies muss stark erhöht werden, um die Materialflüsse in Richtung Fließgleichgewicht zu bringen.
- In allen modellierten Szenarien übertrifft der Output der Rückbaumaterialien, welche zu RC-Baustoffen aufbereitet werden, den entsprechenden Input in das System Stadt Zürich.
- Es gilt, den Anteil von RC-Beton in gebundener Form für den Bau der Gebäude so wie den Input von RC-Kies für die Überdeckung der Werkleitungen und die Foundation der Strassen weiter zu steigern, um das System in Richtung Fließgleichgewicht zu bringen.

Bei jeder Anwendung in der Stadt Zürich sollte der Anteil von RC-Baustoffen so hoch wie technisch möglich gewählt werden. **In Zukunft sollten deshalb das Amt für Hochbauten und das Tiefbauamt gemeinsam intern und extern thematisieren und kommunizieren, dass der Einsatz von RC-Baustoffen weiter erhöht werden soll.** Nur so wird es möglich sein, ein aktives und vorausschauendes Materialmanagement zu entwickeln, welches von sämtlichen beteiligten Akteuren mitgetragen wird.

Energetische Aspekte

- Die Graue Energie, die in den Gebäudepark der Stadt Zürich gelangt, ist abhängig vom natürlichen Wachstum des Bestandes sowie von den Sanierungs- und Rückbauraten (siehe Szenarien). Der Input von Grauer Energie in den Gebäudebestand ist bei Sanierungen um eine Grössenordnung geringer als bei Ersatzneubauten.
- Bis ins Jahr 2050 wird sich die Endenergie zur Nutzung des Gebäudeparks weiter reduzieren. Je nach Szenario wird die Reduktion stärker oder weniger stark ausfallen bzw. die Reduktion wird schneller oder weniger schnell erreicht.
- Da die Sanierungsrate um einen Faktor 10 grösser ist als die Rückbaurate, bewirkt eine Erhöhung der Sanierungsrate einen grösseren Effekt als die proportionale

Erhöhung der Rückbaurrate, obwohl die Ersatzneubauten tendenziell eine energetisch bessere Bauweise aufweisen als sanierte Altbauten.

- **Um eine Halbierung des Primärenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser bis ins Jahr 2050 zu erreichen, müssen sowohl die Sanierungs- als auch die Rückbauraten erhöht werden.**

Neu- und Ersatzneubauten mit Baujahr ab heute weisen bereits einen guten Energiestandard auf. Ihr Anteil wird aber bis im Jahr 2050 je nach Szenario erst 35–45 % des Bestandes ausmachen. Das heisst, dass auch im ambitiösesten Szenario der Bestand zu mehr als der Hälfte aus Gebäuden bestehen wird, deren Baujahr vor 1995 liegt. Es gilt also, die Sanierungsrate zu erhöhen und den Energiestandard bei Sanierungen deutlich zu verbessern, um den Energieverbrauch des gesamten Gebäudebestandes wirksam zu senken.

Bedeutung des Ressourcenmanagements

Das erarbeitete Modell und die Resultate aus der dynamischen Modellierung von verschiedenen Szenarien stellen wichtige Grundlagen dar, um ein nachhaltiges Ressourcenmanagement in der Stadt Zürich zu betreiben. Es bildet die Grundlage für eine umfassende Betrachtung eines komplexen Systems. Die gleichzeitige Modellierung der mineralischen Baustoffflüsse, der Grauen Energie und der Endenergie aus der Nutzung des Gebäudeparks auf der Ebene einer Stadt und mit dem zugrunde gelegten Detaillierungsgrad ist zum jetzigen Zeitpunkt wohl einzigartig. Anhand der Szenarien lassen sich die Auswirkungen von verschiedenen Strategien, hier insbesondere der Umbaustrategien, im vornhinein quantifizieren. Damit kann einerseits verhindert werden, dass falsche Anreize geschaffen werden, andererseits wird es möglich, eingeschlagene Strategien zu optimieren. Das Modell kann von der Stadt Zürich als Ressourcenmanagementtool verwendet werden, mit dem sich die eingeschlagenen Ressourcenstrategien überprüfen und weiterentwickeln lassen. Damit wird ein umfassendes und nachhaltiges Energie- und Ressourcenmanagement möglich.

1 EINLEITUNG

Das Amt für Hochbauten (AHB, Fachstelle Nachhaltiges Bauen) und das Tiefbauamt der Stadt Zürich (TAZ, Werterhaltung Strassen) lassen gemeinsam das Potential eines optimierten Ressourcenmanagements in der Stadt Zürich untersuchen. Erstmals wurde dazu eine integrale Sichtweise über die ganze Stadt als Grundlage verwendet, d.h. Hoch- und Tiefbau sind beide im Gesamtsystem Stadt Zürich zusammen analysiert worden.

Ist die flächenmässige Ausdehnung einer Stadt durch ihre geografische Lage oder politische Grenzen beschränkt, führt dies im Laufe der Zeit zu einer Verknappung des Baulandes und parallel dazu werden sich die Preise für Bauland erhöhen. Eine Konsequenz dieser Entwicklung ist, dass der bestehenden Gebäudepark verstärkt umgenutzt und umgebaut wird (d. h. alte Gebäude werden durch grössere Bauten ersetzt). Das Fehlen von Bauland wird demnach durch eine Verdichtung des Gebäudeparks kompensiert. Dies hat wiederum Einfluss auf die Materialflüsse im Hoch- und Tiefbau. Einerseits nimmt der absolute Bedarf für Baustoffe ab, da weniger Gebäude neu auf der Grünen Wiese gebaut werden, andererseits nehmen die Mengen der Rückbaumaterialien aus Rückbauten und Sanierungen zu. Der Einsatz von Recyclingbaustoffen wird zu einer Notwendigkeit, wenn die Deponierung von Rückbaumaterialien vermieden werden soll.

Für die Modellierung des Systems Stadt Zürich über den Zeitraum von 1995 bis 2050 ist die Abschätzung der Entwicklung des Gebäudebestandes das Kernstück, um die damit verbundenen Materialflüsse bestimmen zu können. In dieser Arbeit wurden dazu verschiedene Entwicklungsszenarien mit unterschiedlichen Sanierungs- und Rückbauraten untersucht. Daraus lassen sich Aussagen über die erwartete Entwicklung der Materialflüsse ableiten. Andererseits wurde auch die bauliche Veränderung des Gebäudebestandes im Hinblick auf die 2000-W-Gesellschaft abgebildet. Damit können Aussagen über die benötigte Graue Energie für die Erstellung der Gebäude sowie die Betriebsenergie (Endenergie) für Wärme und Warmwasser gemacht werden.

1.1 Bisherige Arbeiten

Im Jahr 2001 wurde vom BAFU eine erste umfassende Analyse der Bauabfälle aus dem Hoch- und Tiefbau veröffentlicht [BUWAL, 2001]. In dieser Studie mit dem Titel «Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege» wurden die Bauabfälle in den einzelnen Kantonen abgeschätzt. Grundlage dazu ist ein Gebäudebestandsmodell, welches den Gebäudepark nach einer typischen Bauweise in Abhängigkeit des Baujahres und der Nutzung materialisiert. Die Infrastruktursysteme wurden mit ihren Längen erhoben und aufgrund der Erneuerungsraten die entsprechenden Bauabfälle bestimmt. Diese Studie bildet immer noch die Grundlage für viele wissenschaftliche Arbeiten, die in diesem Bereich durchgeführt wurden.

Verschiedene Autoren haben versucht, die Entwicklung der Wohngebäude in Modellen zu erfassen und Prognosen über deren Wachstum und Veränderung zu erstellen. So wurde im Rahmen einer Dissertation ein detailliertes Modell der Wohngebäude in der Schweiz erarbeitet

[Kost, 2006], um damit Aussagen über die langfristigen Energieverbrauchs- und CO₂-Reduktionspotentiale im Wohngebäudebereich zu machen. Das Modell kann zu jedem Zeitpunkt des betrachteten Zeitraums (ab 2000 bis 2050) den Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser und die zugehörigen CO₂-Emissionen bestimmen. Zudem können die Energie- und die Investitionskosten für Neubauten bzw. Sanierungen berechnet werden. Allerdings wird weder der dazugehörige Materialaufwand erfasst, noch wird die entsprechende Infrastruktur berücksichtigt.

In [Lichtensteiger 2006] finden sich verschiedene Aspekte zum Thema gelagerte Ressourcen im Gebäudepark der Schweiz. So wurde nicht nur das Lager der gesamten Baustoffe in den Gebäuden abgeschätzt, sondern auch dynamische Modelle für einzelne Materialien entwickelt. Ihre Methode zur Berechnung der Materiallager konnte in der Phase I dieses Projektes für die Validierung der Resultate verwendet werden.

Das Bundesamt für Energie (BFE) hat 2004 in der Publikation «Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen, Perspektiven bis 2035» mögliche Entwicklungen des Gebäudebestandes der Schweiz bis ins Jahr 2035 anhand der Energiebezugsflächen prognostiziert [BFE 2004]. Dieses Modell verwendet eine umfangreiche Datenbank der bestehenden Gebäude als Grundlage für die Fortschreibung der Gebäudeflächen. Zusätzlich werden auch die Bauinvestitionen so wie die Renovationstätigkeit berücksichtigt. Diese Studie liefert plausible Resultate für die Schweiz, welche allerdings nicht direkt auf die Stadt Zürich übertragbar sind.

Im Buch «Potential Wohngebäude» [Koschütz, Pfeiffer 2005] werden die verschiedenen Aspekte der Energie- und Gebäudetechnik für die 2000-Watt-Gesellschaft für den Bereich «Wohnen» untersucht. Dort sind verschiedene bestehende Untersuchungen zum Gebäudepark der Schweiz zusammengestellt. Die meisten Daten beziehen sich allerdings auf die Wohngebäude.

1.2 Ziel der Untersuchung

Das hier beschriebene Projekt wurde in zwei Phasen aufgeteilt. In der Phase I wurde eine Bestandsaufnahme für das Jahr 2005 durchgeführt und die Materiallager und -flüsse im Gebäudepark und den Infrastruktursystemen detailliert erfasst. Die Resultate dieser Phase sind in einem eigenen Bericht zusammengetragen [Schneider, Rubli 2007].

In der Phase II wurde nun eine dynamische Modellierung durchgeführt, welche das Gesamtsystem Stadt Zürich für die Zeit von 1995-2050 abbildet. Kern des dynamischen Modells ist die Beschreibung der Veränderung des Gebäudebestandes in Anhängigkeit von exogenen Entwicklungsfaktoren. Damit lassen sich die damit einhergehenden Veränderungen der Materialflüsse und -lager berechnen.

Basierend auf dem Gebäudebestandsmodell werden vier Szenarien untersucht, um die Auswirkungen veränderter Sanierungs- und Rückbauraten abzubilden. Diese vier verschiedenen Entwicklungen des Gebäudebestandes dienen als Grundlage für die Berechnung der

Materialflüsse. Da zu allen Gebäuden auch ihr Energiestandard (konventionell, Minergie, Minergie-P) simuliert wird, können Aussagen über die Betriebsenergie für Wärme und Warmwasser gemacht werden (Endenergiebedarf).

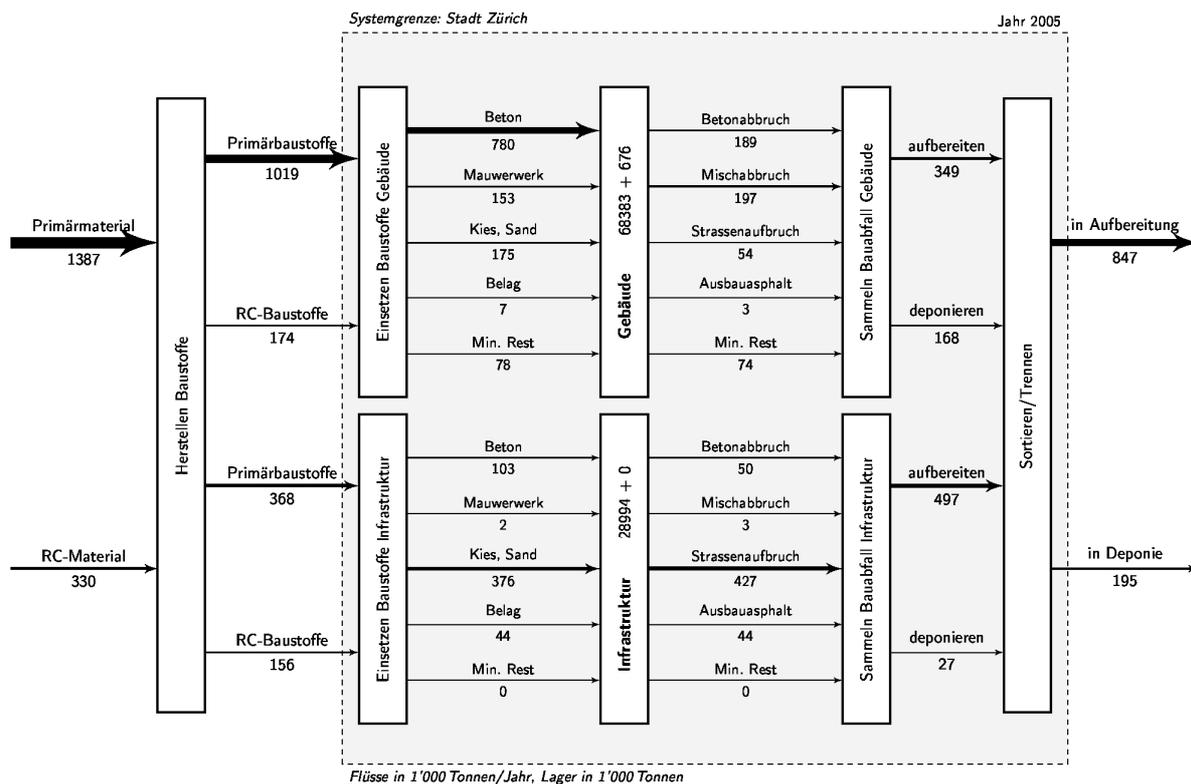
Mittels zweier weiterer Szenarien wird untersucht, wie sich der Input der Recyclingmaterialien im Verhältnis zum Primärmaterialfluss verändern könnte und ob die anfallenden RC-Baustoffe vollumfänglich wieder in der Stadt Zürich eingesetzt werden könnten. Für die Infrastruktursysteme werden drei weitere Szenarien untersucht, um die Auswirkungen von Änderungen der Leitungs- und Strassenlängen sowie der Erneuerungsraten aufzuzeigen.

Zusätzlich wird speziell für die Infrastruktursysteme das «koordinierte Bauen» genauer untersucht. Dazu werden die drei Grössen Material-, Finanz- und Zeitaufwand bei koordinierten Projekten mit dem Aufwand verglichen, wie er bei einzeln durchgeführten Projekten entstehen könnte. Dieses Teilprojekt ist in einem separaten Bericht beschrieben [Koordiniertes Bauen, 2008].

2 METHODEN

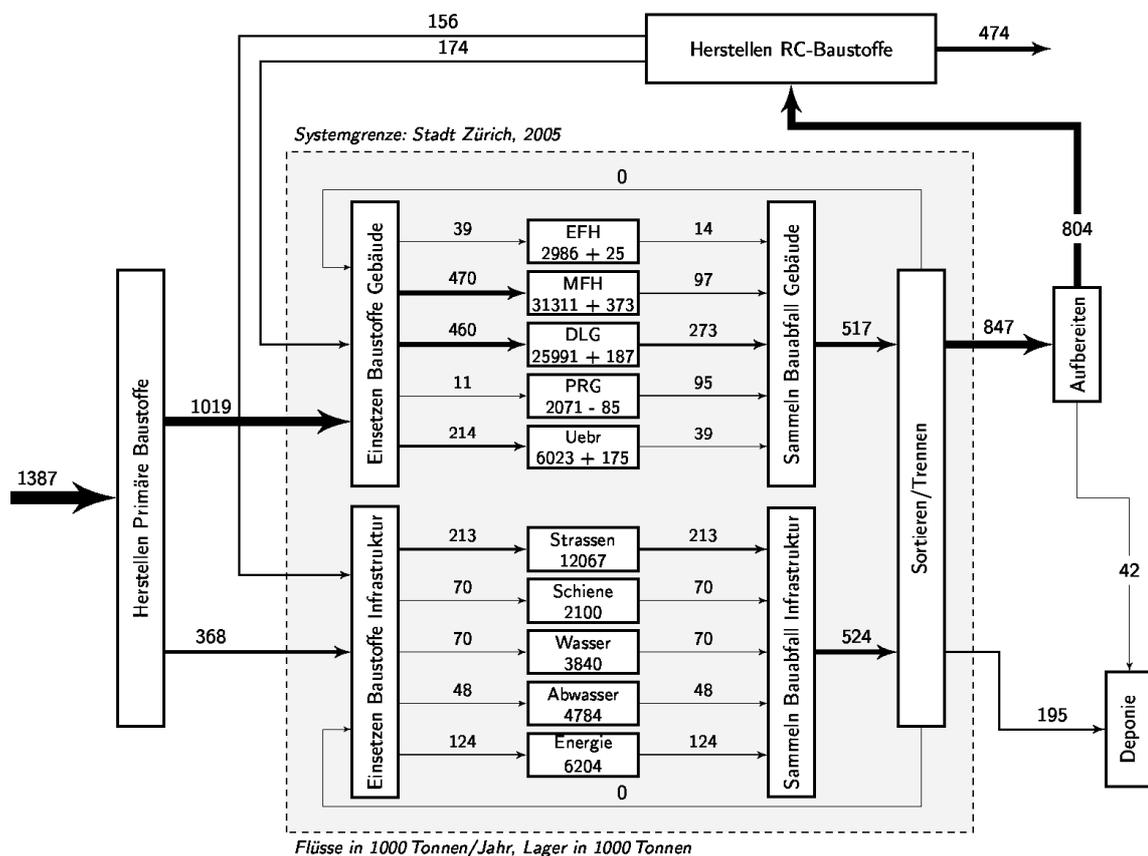
2.1 Das System Stadt Zürich

Für die Untersuchung wird die Stadt Zürich in die zwei Bereiche Gebäude und Infrastruktur aufgeteilt. Die politische Grenze der Stadt Zürich bildet die räumliche Systemgrenze des untersuchten Systems. Die Lager und Flüsse werden jeweils über ein Jahr bilanziert. In der Phase I konnten für das Bezugsjahr 2005 die Lager und Flüsse der mineralischen Materialien bestimmt werden. Diese sind in der Figur 5 dargestellt. Der Input in die Gebäude (1.2 Mio. Tonnen) ist rund doppelt so gross, wie der Input in die Infrastruktur (0.5 Mio. Tonnen). Hingegen ist der Output aus den beiden Bereichen beinahe gleich gross (0.5 Mio. Tonnen). Dies bedeutet, dass das Materiallager im Gebäudebestand weiterhin wächst (+0.7 Mio. Tonnen). Bei den Infrastrukturbauten wurde angenommen, dass diese kein Wachstum aufweisen. Es werden vorwiegend Primärbaustoffe verbaut, obwohl der grösste Teil der Rückbaumaterialien in die Aufbereitung zu Recycling-Baustoffen gelangt.



Figur 5 Die Lager und Flüsse der mineralischen Materialien im System Stadt Zürich für das Jahr 2005, wie es als Resultat der Phase I erhoben wurde. Der Input in die Gebäude ist rund doppelt so gross wie der Input in die Infrastruktur. Hingegen ist der Output aus den beiden Bereichen beinahe gleich gross. Es werden vorwiegend Baustoffe primärer Herkunft verbaut, obwohl der grösste Teil der Rückbaumaterialien in die Aufbereitung zu Recycling-Baustoffen gelangt.

Das System wurde zunächst in die zwei Hauptprozesse «Bau, Betrieb und Rückbau (BBR) des Gebäudeparks» und «BBR Infrastruktur» unterteilt. Diese wurden dann weiter in die Subprozesse «BBR Einfamilienhäuser» (EFH), «BBR Mehrfamilienhäuser» (MFH), «BBR Dienstleistungsgebäude» (DLG), «BBR Produktionsgebäude» (PRG) und die «BBR übrigen Gebäude» (Uebr; Kirchen, Parkhäuser, Landwirtschaftsgebäude etc.) sowie die «BBR Strassen», «BBR Schienen», «BBR Wasser», «BBR Abwasser» und die «BBR Energiesysteme» aufgeteilt. In der Figur 6 sind dazu die Materiallager und -flüsse in diesem System abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sämtliche Rückbaumaterialien in die Aufbereitungsanlagen im Umland exportiert werden. Nur knapp die Hälfte der hergestellten Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe) gelangt wieder zurück in der Stadt Zürich. Die restlichen Rückbaumaterialien verbleiben (0.47 Mio. Tonnen) im Umland. Knapp 20 % des Outputs aus dem Gebäudepark und der Infrastruktur gelangen in die Deponie.



Figur 6 Die totalen Lager und Flüsse der mineralischen Materialien im System Stadt Zürich für das Jahr 2005 aufgeteilt nach den einzelnen Bereiche. EFH: Einfamilienhäuser, MFH: Mehrfamilienhäuser, DLG: Dienstleistungsgebäude, PRG: Produktionsgebäude, Uebr: Übrige Gebäude (Kirchen, Parkhäuser, Landwirtschaftsgebäude etc). Aus der Herstellung RC-Baustoffe (Recycling-Baustoffe) bleibt über die Hälfte im Umland und wird nicht wieder in der Stadt Zürich eingesetzt.

2.2 Das Modell des Gebäudebestandes

Bevor die Entwicklung der Lager und Flüsse der mineralischen Materialien für die Jahre 1995–2050 berechnet werden können, muss die Veränderung des Gebäudebestandes modelliert werden. Dabei sind die folgenden Fragen zu beantworten:

- Wie viele Gebäude werden jährlich saniert?
- Welche Gebäude werden rückgebaut und an deren Stelle Ersatzneubauten erstellt?
- Wie viele Gebäude werden im Minergie-Standard erstellt und saniert?

Ist die Veränderung des Gebäudebestandes innerhalb eines Jahres bekannt, lassen sich daraus die drei Variablen «Materiallager im Bestand», «Inputflüsse» und «Outputflüsse» berechnen. Das Gebäudebestandsmodell bildet damit die Basis zur Berechnung der langfristigen Entwicklung der Materialflüsse.

Das Modell für die Entwicklung des Gebäudebestandes orientiert sich an der zukünftigen Nachfrage nach Wohnraum und Arbeitsplätzen. Die zugrunde liegenden Entwicklungsprognosen wurden zum Teil vom Projekt ECO₂-Rechner, welches ebenfalls von der Stadt Zürich getragen wird, übernommen [ECO₂, 2007]. Damit ist ein Vergleich von Resultaten dieser beiden Projekte in gewissen Bereichen möglich. Um Aussagen zu möglichen Entwicklungen des Gebäudeparks der Stadt Zürich machen zu können, wurden vier verschiedene Szenarien für die Entwicklung des Gebäudebestandes gerechnet. Diese vier Szenarien unterscheiden sich bei den verwendeten Sanierungs- und Rückbauraten.

Bei jedem Eingriff in den Bestand (Sanierung, Ersatzneubau) wird im Modell auch der Energiestandard eines Gebäudes bestimmt. Diese Bauweise beschreibt, ob ein Gebäude konventionell, d.h. nach den jeweiligen gesetzlichen Vorschriften gebaut oder saniert wird oder dem Minergie-Standard oder Minergie-P-Standard entspricht. Damit können Aussagen zum Energiebedarf des Gebäudebestandes berechnet werden.

2.2.1 Die Nachfrage nach Gebäudevolumen in Zürich bis 2050

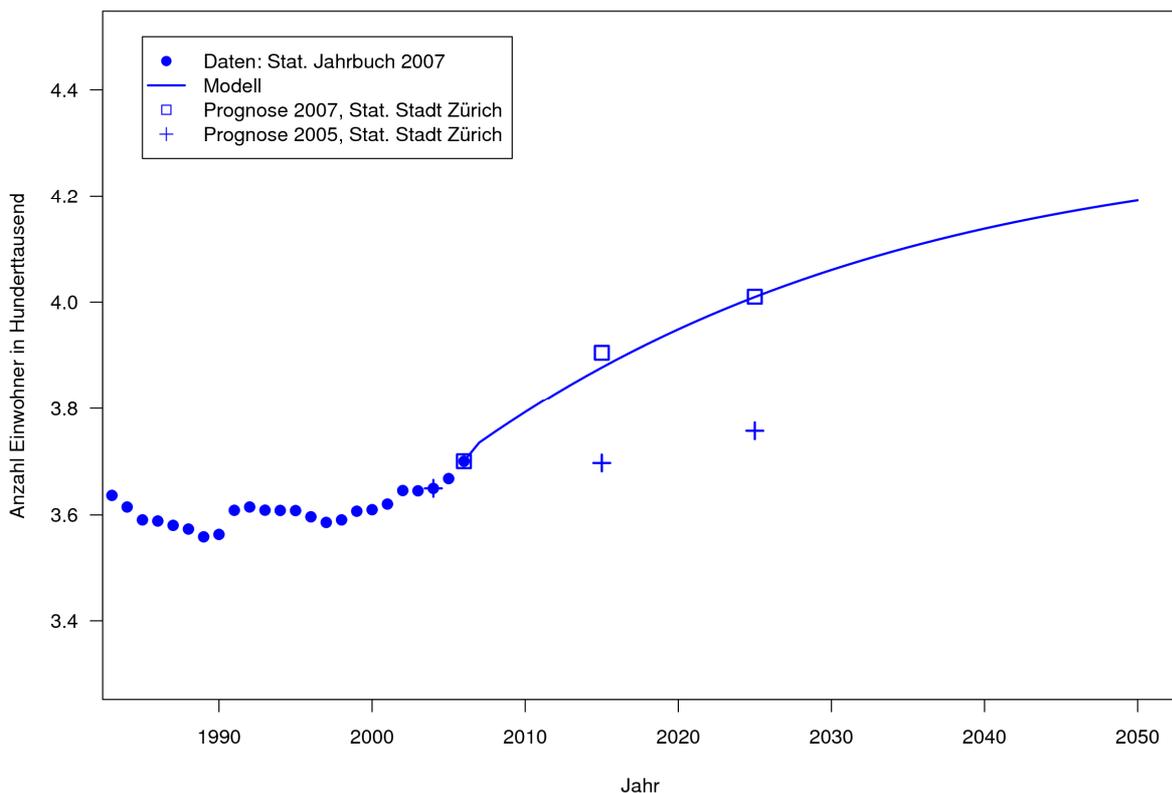
Die Entwicklung des Gebäudeparks der Stadt Zürich ist abhängig von der Entwicklung der Einwohnerzahl und der Anzahl der Beschäftigten und ihrem jeweiligen spezifischen Flächenbedarf für «Wohnen» und «Arbeiten». Aus diesem Flächenbedarf kann mittels verschiedener Faktoren das zugehörige Gebäudevolumen ermittelt werden. Dieser Prozess soll ausführlich beschrieben werden.

Die Berechnung der Energiebezugsfläche (EBF)

Für die Stadt Zürich für die Berechnung der Energiebezugsfläche (EBF) zwischen den Bereichen «Wohnen» und «Nichtwohnen» differenziert. Für den Bereich «Wohnen» muss die Entwicklung der Einwohnerzahl und des Flächenbedarfes pro Einwohner berücksichtigt werden. Für den Bereich «Nichtwohnen» sind es die Faktoren «Anzahl Beschäftigte» und «Flächenbedarf pro Beschäftigten». Damit lässt sich die Nachfrage nach EBF – und anschliessend nach Gebäudevolumen – berechnen.

Entwicklung der Wohnbevölkerung in der Stadt Zürich

Für die Entwicklung der Bevölkerung in der Stadt Zürich kann auf die Prognose von Statistik Stadt Zürich [Statistik Stadt Zürich, 2007] für die Jahre 2010–2025 zurückgegriffen werden. Die Entwicklung für die Jahre 2025–2050 basiert auf eigenen Annahmen. Die Figur 7 zeigt die statistisch erhobenen Werte der Bevölkerungszahl in der Stadt Zürich [Stat. JB07] (Punkte) und die modellierte Entwicklung bis ins Jahr 2050 (Linie). Zusätzlich sind die Werte der Prognosen von Statistik Stadt Zürich aus dem Jahr 2005 (Kreuze) und 2007 (Quadrate) eingetragen. Es ist deutlich zu sehen, wie sich die Prognose von Statistik Stadt Zürich innerhalb von zwei Jahren stark nach oben verändert hat. Im Modell wird mit Hilfe einer logistischen Funktion eine Kurve an Werte der Prognose von Statistik Stadt Zürich aus dem Jahr 2007 gelegt. Auch wenn die Zunahme auf knapp 420'000 Einwohner im Jahr 2050 hoch scheinen mag, kann daran erinnert werden, dass im Jahr 1962 die Bevölkerung der Stadt Zürich über 440'000 Menschen umfasste. Damals war der Flächenbedarf pro Person noch viel tiefer als heute. Die entsprechenden Werte sind im Anhang aufgeführt (Tabelle 13).

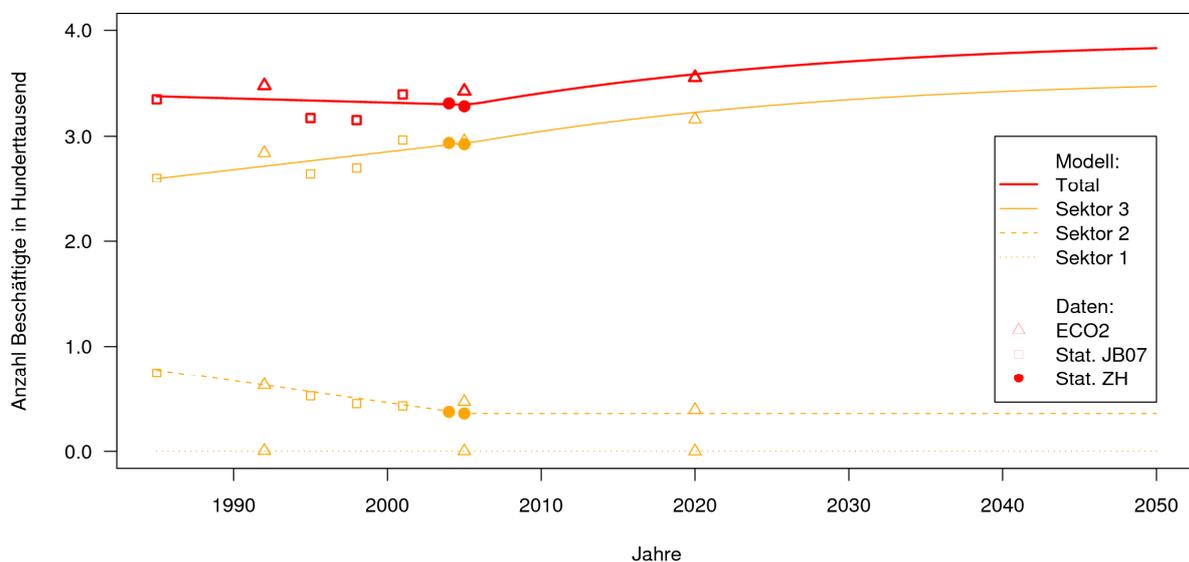


Figur 7 Die Entwicklung der Einwohnerzahl der Stadt Zürich, Punkte, Werte aus Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich, 2007) und Modellwerte (Linie). Zusätzlich sind die Prognosen von Statistik Stadt Zürich aus den Jahren 2005 (Kreuze) und 2007 (Quadrate) für 2015 und 2025 eingetragen. Das Modell folgt einer logistischen Funktion. Quelle: [Statistik Stadt Zürich, 2007], [Stat. JB07]

Die Entwicklung der Beschäftigten in der Stadt Zürich

Die Abbildung der Entwicklung der Beschäftigten in der Stadt Zürich basiert auf Vorarbeiten des ECO₂-Projektes [ECO₂, 2007], in dem die Entwicklung der Beschäftigten bis ins Jahr 2020 abgeschätzt wurde. Für die Jahre 2020–2050 werden eigene Annahmen getroffen. Auch hier werden logistische Funktionen eingesetzt, um eine kontinuierliche Entwicklung abzubilden. Die Differenzierung umfasst Angaben zum ersten, zweiten und dritten Wirtschaftssektor. Diese sind in der Figur 8 dargestellt. In der Stadt Zürich dominiert der dritte Sektor (Dienstleistungssektor) mit über 80 % der insgesamt 340'000 Beschäftigten. Der erste Sektor (Landwirtschaft) beschäftigt nur wenige Personen, auf den zweiten Sektor (Industrie und verarbeitendes Gewerbe) fallen knapp 20 % der beschäftigten Personen.

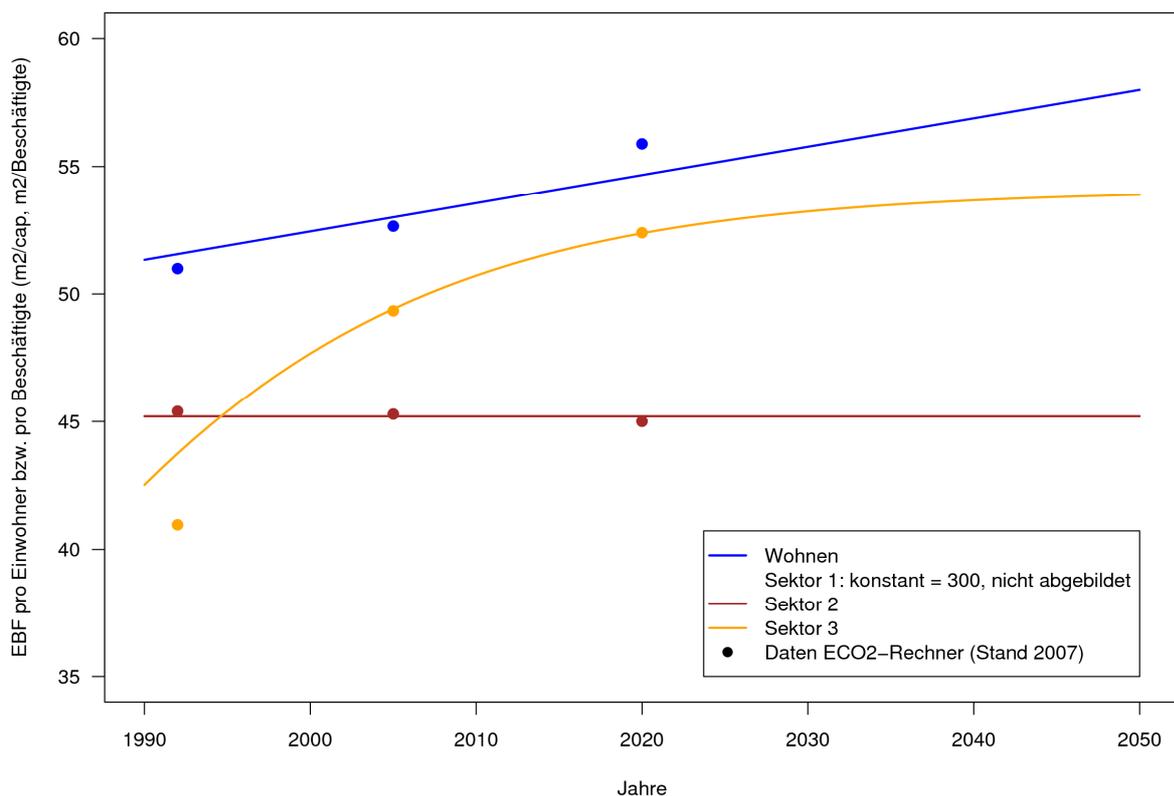
Im ersten Sektor bleibt die Zahl der Beschäftigten während des betrachteten Zeitraumes um 200 auf tiefem Niveau konstant. Im zweiten Sektor reduziert sich zunächst die Zahl der Beschäftigten zwischen 1995 und 2005 linear, anschliessend wird mit einer konstanten Zahl von rund 40'000 gerechnet, was dem Stand von 2005 entspricht. Die Begründung hierfür lautet, dass ein gewisser Teil des verarbeitenden Gewerbes in der Stadt erhalten bleibt. Für die Entwicklung des dritten Sektors wird eine logistische Funktion an die Werte der Jahre 2005 und 2020 gelegt. Für das Modell wird für die Entwicklung der Arbeitsplätze im Zeitraum von 2025–2050 mit einem abgeschwächten Wachstum gerechnet. Zwischen 1995 und 2005 werden die bestehenden Daten linearisiert. In der Tabelle 15 im Anhang sind die Werte aus der Modellierung, die statistischen Werte und die Werte aus den Prognosen zum Vergleich aufgeführt.



Figur 8 Daten verschiedener Quellen (einzelne Punkte) und die modellierte Entwicklung der Beschäftigtenzahl (Linien) für die drei Wirtschaftssektoren sowie das Total. Die Prognose für das Jahr 2020 konnte von ECO₂-Rechner übernommen werden. Quellen: [ECO₂, 2007], [Stat. JB07] und verschiedene Statistiken von Statistik Stadt Zürich, welche online verfügbar sind.

Der spezifische Flächenbedarf für «Wohnen» und «Nichtwohnen»

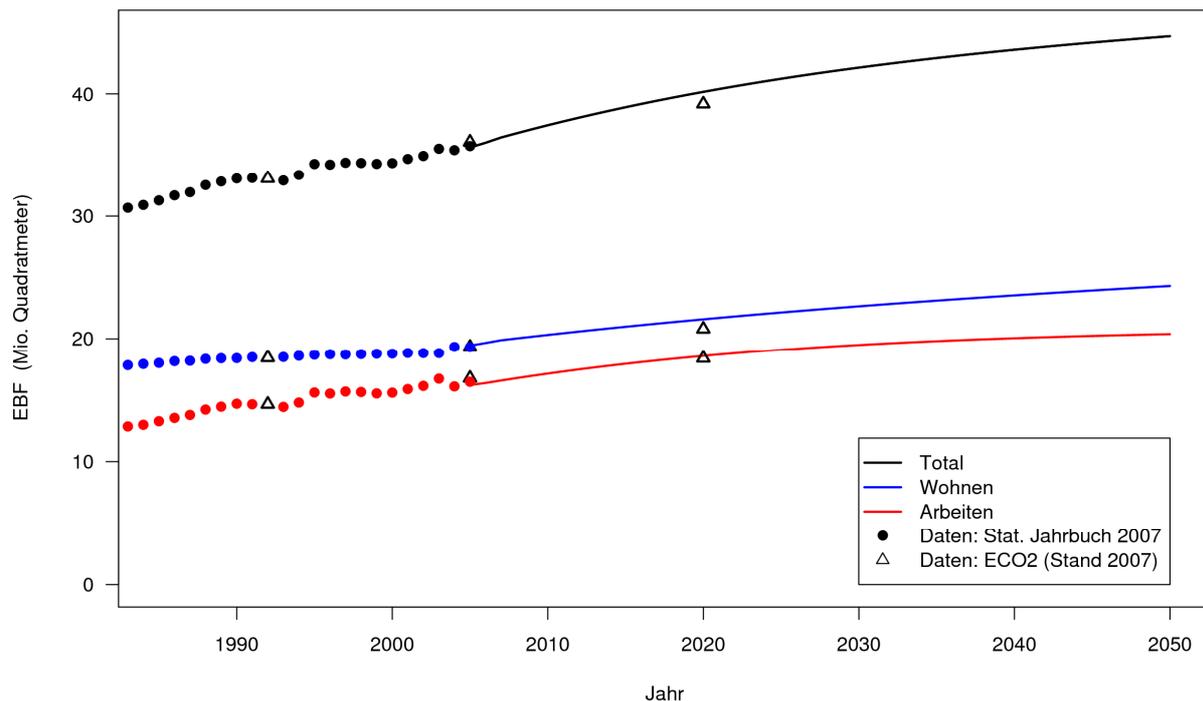
Für die Berechnung der Nachfragen nach EBF muss neben der Anzahl Einwohner und Beschäftigten auch deren spezifischer Flächenbedarf bestimmt werden. Für das Modell wurden die Werte des ECO₂-Rechners der Jahre 1992, 2005 und 2020 übernommen und die Jahre dazwischen linear («Wohnen», Sektor 2) oder logistisch (Sektor 3) interpoliert. Die Entwicklung bis ins Jahr 2050 ist somit eine eigene Annahme. Der Verlauf dieser Werte ist in der Figur 9 dargestellt. In der Abbildung ist die Entwicklung der Arbeitsplätze im Sektor 1 nicht aufgeführt. Dort wird mit einem konstanten Flächenbedarf von 300 m² EBF/Beschäftigte gerechnet. Die Werte vom ECO₂-Rechner sind in der Tabelle 14 im Anhang aufgeführt.



Figur 9 Die spezifische Energiebezugsfläche (EBF) pro Einwohner und pro Beschäftigten der Sektoren 2 und 3, wie sie zur Berechnung der Nachfrage nach EBF im Modell eingesetzt werden. Der Wert für den Sektor 1 beträgt konstant 300 m² EBF/Beschäftigte (ausserhalb der Grafik). Die Punkte geben die Werte des ECO₂-Rechners an, welche als Grundlage verwendet wurden.

Bis hier her beruht die Berechnung der Nachfrage nach EBF auf der Differenzierung zwischen «Wohnen» und «Arbeiten». Diese Nachfrage ist in der Figur 10 abgebildet. In der Phase I des Projektes sind jedoch fünf verschiedene Nutzungen der Gebäude berücksichtigt worden. Dabei handelt es sich um die Einfamilienhäuser (EFH), Mehrfamilienhäuser (MFH), Dienstleistungsgebäude (DLG), Produktionsgebäude (PRG) und Übrige Gebäude (Uebr).

Aus dem Total der modellierten EBF für die ganze Stadt kann nun mit entsprechenden Faktoren der jeweilige Anteil der einzelnen Nutzungen bestimmt werden. Anschliessend wird die EBF mittels nutzungsspezifischer Faktoren in die Bruttogeschosshöhe (BGF) umgerechnet. Damit ergibt sich die jeweilige BGF der einzelnen Nutzungen. Schliesslich kann die BGF mit einem weiteren Faktor für die nutzungsspezifische Geschosshöhe der Gebäude multipliziert werden, womit das Gebäudevolumen für jede Nutzungsart resultiert. In der Tabelle 2 sind die entsprechenden Faktoren für diese Umrechnung aufgeführt. Die Höhe wurde aus dem in der Datenbank erfassten Bestand aus dem Jahr 2005 auf der Basis Einzelgebäude aus dem Verhältnis Gebäudevolumen zu BGF berechnet.



Figur 10 Die Energiebezugsflächen (EBF) für «Wohnen» und «Arbeiten», wie sie für das Modell eingesetzt werden. Die Punkte zeigen bekannte Daten aus dem Statistischen Jahrbuch 2007 [Stat JB07], die Dreiecke entsprechen den Werten, welche auch im ECO₂-Rechner eingesetzt werden (Stand 2007). Die Differenz zum ECO₂-Rechner beruht auf den geänderten Bevölkerungsprognosen; diese wurden in der Zwischenzeit beim ECO₂-Rechner angepasst.

Tabelle 2 Nutzungsspezifische Faktoren zur Berechnung der Bruttogeschossfläche (BGF) aus der EBF.

Nutzung	Geschosshöhen	Anteil an Gebäudevolumen 1995	Faktor EBF/BGF
	Meter	Prozent	[-]
EFH	2.49	4.50	0.61
MFH	2.75	48.40	0.65
DLG	3.64	37.00	0.79
PRG	4.42	6.35	0.72
Uebr	3.09	2.56	0.29
Quelle	a)	b)	c)

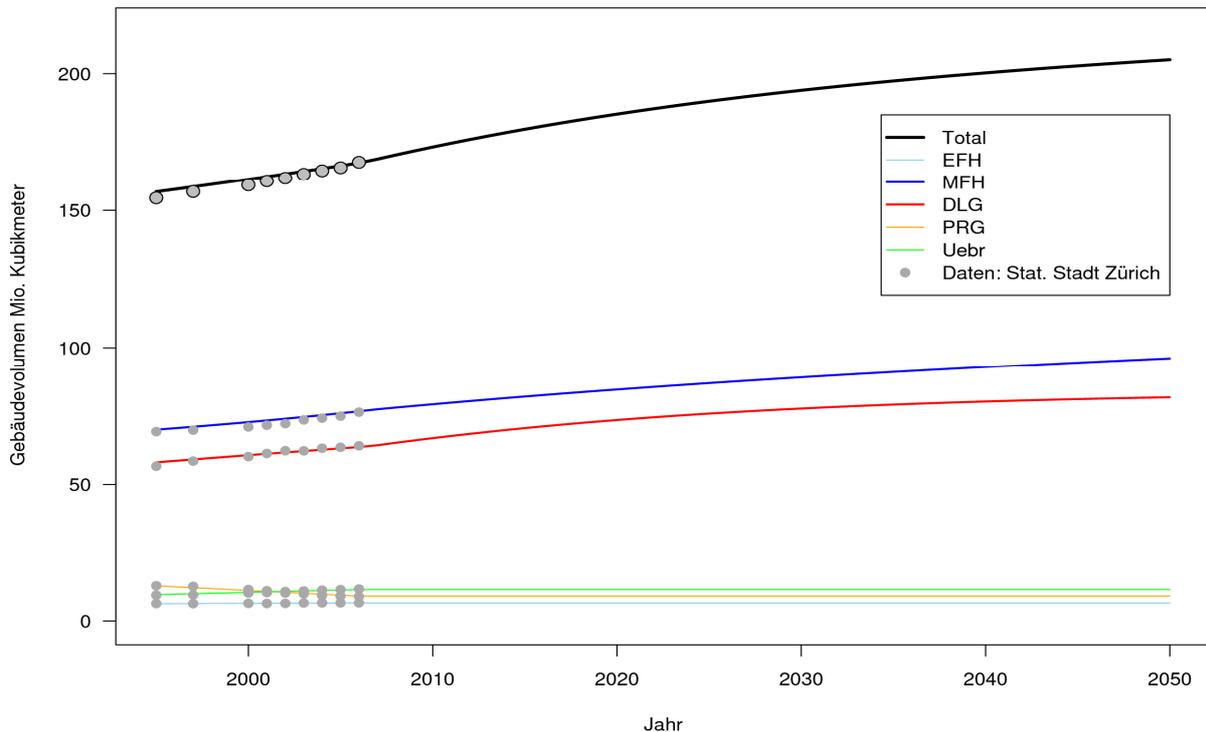
Quellen

- a) Bestand 2005, Statistik Stadt Zürich. Die Höhe entspricht dem Verhältnis Gebäudevolumen/Bruttogeschossfläche
- b) Bestand 1995, Statistik Stadt Zürich
- c) Stat. Jahrbuch 2007, ECO₂-Rechner, SIA

Die Nachfrage nach Gebäudevolumen

In der Figur 11 sind die resultierenden Gebäudevolumina für die einzelnen Nutzungsarten dargestellt. Wie zu erwarten, dominieren die Mehrfamilienhäuser (blau) und die Dienstleistungsgebäude (rot) den Gebäudebestand in der Stadt Zürich. Die drei weiteren Nutzungen Einfamilienhäuser, Produktionsgebäude und Übrige haben zusammen ein Gebäudevolumen von ca. 15 % des totalen Bestandes. Insgesamt wird das Gebäudevolumen bis ins Jahr 2050 gemäss dem Modell um 22 % (bezüglich 2005) von rund 165 Mio. Kubikmetern auf gut 200 Mio. Kubikmeter zunehmen. Dabei sind es nur die MFH (+28 %) und die DLG (+26 %), welche im Modell eine Steigerung erfahren, die anderen Nutzungen bleiben ab 2005 konstant. Diese Annahme wird getroffen, weil der Einfluss einer Veränderung von EFH, PRG und Uebr auf den gesamten Bestand gering ist und davon ausgegangen werden kann, dass bei diesen Nutzungsarten kein wesentliches Wachstum zu erwarten ist. Die Werte für die Nachfrage nach Gebäudevolumen, wie sie als Basis für das Gebäudebestandsmodell dienen, sind in der Tabelle 16 im Anhang aufgeführt.

Damit ist die Grundlage für das Gebäudebestandsmodell gegeben. Die modellierte Nachfrage der Zukunft muss nun von einem Angebot an virtuellen Gebäuden befriedigt werden. Die Modellierung des Angebots wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.



Figur 11 Die Entwicklung der Nachfrage nach Gebäudevolumen, wie sie als Grundlage für das Gebäudebestandsmodell dient (Linien). Gleichzeitig sind auch die bekannten Werte ab 1995 als graue Punkte eingetragen. Quelle: Statistik Stadt Zürich.

2.2.2 Das Angebot von Gebäudevolumen in Zürich von 1995 bis 2050

Der Gebäudebestand ändert sich von Jahr zu Jahr durch Eingriffe in seine Substanz. Dabei kann einerseits das Volumen des Bestandes verändert werden (Neubau, Rückbau, Ersatzneubau) oder es kann die Qualität des Bestandes verändert werden (Sanierung). Für die Sanierung und den (Ersatz-) Neubau sind im Modell drei verschiedene Bauweisen integriert, welche entsprechend getroffenen Annahmen verteilt werden (konventionell, Minergie und Minergie-P). Das Modell berechnet, wie das Angebot von Gebäudevolumen gemäss der oben formulierten Nachfrage bereitgestellt werden könnte. Das Angebot orientiert sich somit an der Nachfrage und hält diese ein. In der Folge werden die einzelnen Eingriffsmöglichkeiten beschrieben.

Neubau

Ein Neubau ist im Modell als «Bauen auf grüner Wiese» definiert. Es handelt sich also um ein Gebäude, welches zusätzlich zum Bestand hinzukommt. Über Neubauten wird die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage ausgeglichen, falls der Bestand kleiner als die Nachfrage ist.

Rückbau, Ersatzneubau

Rückbau und Ersatzneubau sind für das Modell als ein Prozess zu verstehen. Es ist wenig wahrscheinlich, dass in der Stadt ein Gebäude zurückgebaut wird und die entstehende Brache über einen langen Zeitraum unbebaut bleibt. Daher wird im Modell für jedes zurückgebaute Gebäude an seiner Stelle ein neues Gebäude errichtet. Dieses kann grösser sein als das ursprüngliche. Für die Modellierung ist die Gebäudegrösse aber nicht von Bedeutung, da sich das Modell an der totalen Nachfrage nach Volumen orientiert. Diese kann durch wenige grosse oder durch viele kleine Gebäude befriedigt werden.

Sanierung

Unter Sanierung wird ein grosser Eingriff in die Substanz eines Gebäudes verstanden, der weiter reicht als eine «Pinselrenovation». Dabei wird für das Modell davon ausgegangen, dass bei einer Sanierung rund 10 % des Materials des Gebäudes ersetzt wird. Die Grundlagen für diese Annahme sind im Bericht zur Phase I beschrieben [Schneider, Rubli 2007].

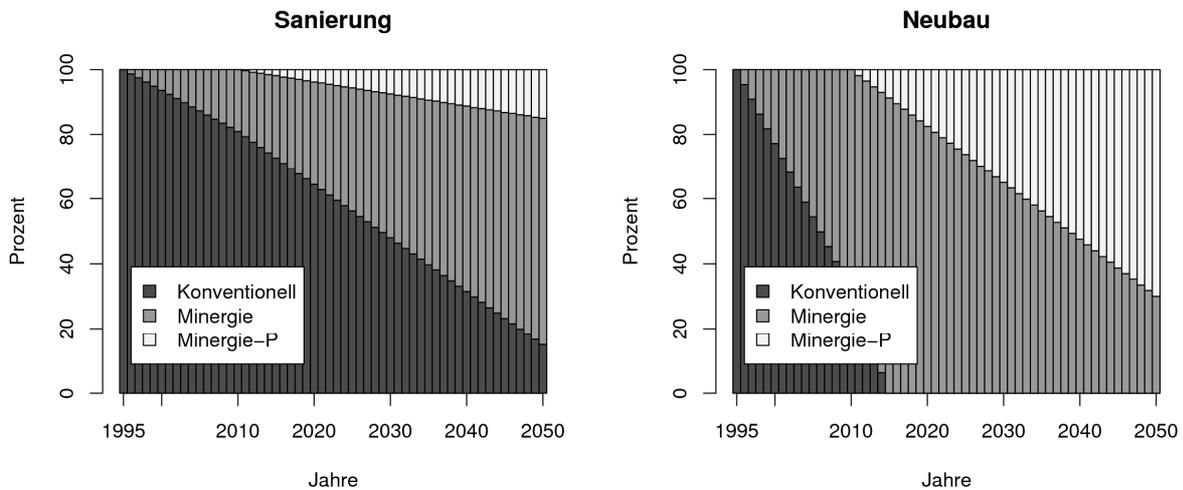
Energiestandard

Die Bauweise des Energiestandards gliedert sich in die drei Klassen konventionell, Minergie und Minergie-P. Mit der Bauweise unterscheiden sich die Gebäude bezüglich Wärmedämmung und Haustechnik. Die Klasse konventionell ist dabei nicht fix definiert, sondern sie entspricht den jeweils gültigen gesetzlichen Vorgaben zur Wärmedämmung und Haustechnik. Der restliche Aufbau des Gebäudes (Materialisierung) bleibt bei allen Bauweisen identisch, d. h. für das Modell ändern sich bei den verschiedenen Bauweisen nur die Dicke der Wärmedämmung und der Anteil der Metalle für die Haustechnik.

Die Verteilung der Bauweise im Gebäudebestand lässt Aussagen über den entsprechenden Wärmebedarf zu. Die Annahmen über die Entwicklung der Bauweise wurden im Konsens in der Begleitgruppe erarbeitet und getroffen (Figur 12). Bis ins Jahr 1995, dem Beginn der Modellierung, wurde ausschliesslich konventionell gebaut. Ab 1995 kommen Minergie-Bauten hinzu, ab 2010 auch Minergie-P-Bauten. Dabei kann die Bauweise Minergie oder Minergie-P sowohl bei Neu- und Ersatzneubauten als auch durch Sanierung erreicht werden. Bis im Jahr 2015 wird es keine konventionellen Neubauten mehr geben, da sich die minimalen gesetzlichen Vorschriften dem Minergie-Standard soweit angenähert haben, dass ab 2015 die Bauweise konventionell dem Minergie-Standard entspricht.

Im Jahr 2050 werden nur noch 15 % der Sanierungen konventionell ausgeführt, 70 % in Minergie und 15 % in Minergie-P. Bei den Neu- und Ersatzneubauten werden im Jahr 2050 70 % in Minergie und 30 % in Minergie-P gebaut sein.

Für das Modell sind diese Werte als Wahrscheinlichkeitsverteilung implementiert. Bei einem Eingriff (Sanierung, Ersatz- oder Neubau) wird der Energiestandard des Gebäudes zufällig gewählt, so dass bei einer grossen Zahl von Gebäuden die Verteilung der Bauweise den obengenannten Anteilen entspricht.



Figur 12 Die Annahmen über die Verteilung des Energiestands bei Eingriffen in den Bestand für die Jahre 1995–2050. Im Jahr 1995 werden 100 % der Sanierungen konventionell durchgeführt, im Jahr 2050 werden 15 % der Sanierungen Minergie-P-Standard aufweisen. Konventionelle Neubauten werden ab 2015 dem Minergie-Standard gleichgestellt.

Denkmalgeschützte Gebäude

Die denkmalgeschützten Gebäude werden für das Modell separat behandelt. Sie können saniert aber nicht zurückgebaut werden, d. h. sie bleiben im Bestand bestehen. Auf Wunsch der Auftraggeber wurden dazu nicht nur die effektiv denkmalgeschützten Gebäude, sondern auch die inventarisierten Gebäude in diese Berechnung integriert. Inventarisierte Gebäude sind aktuell nicht geschützt, werden aber im Inventar der schützenswerten Gebäude der Denkmalpflege aufgeführt. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Gebäude bei einem Eingriff den Status «geschützt» erhalten ist relativ gross. Daher sind im Modell die inventarisierten Gebäude den geschützten gleichgestellt. Zusammen machen die geschützten und inventarisierten Gebäude rund 11 % des Gebäudevolumens aus (2005). Die Anzahl der geschützten und inventarisierten Gebäude wurde für die Dauer der Modellierung konstant gelassen.

Die denkmalgeschützten Gebäude können im Modell nur saniert, aber nicht zurückgebaut werden. Ihr Energiestandard bleibt konventionell, d. h. sie werden nie Minergie oder Minergie-P Standard aufweisen.

Die Angaben wurden vom Amt für Städtebau, GIS-Kompetenzzentrum HBD, freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

2.3 Grundlagen für die Modellierung

2.3.1 Software

Die Modellierung des Gebäudebestandes, die Berechnung der Materiallager und Materialflüsse sowie alle statistischen Auswertungen (inkl. Grafiken und Figuren) wurden mit der Software R gemacht [R]. R ist eine Programmiersprache und Umgebung für statistische Berechnungen mit grafischer Auswertung, welche *open source*, d. h. frei verfügbar ist. Sie wird unter anderem am Statistischen Seminar der ETH Zürich mitentwickelt [SfS, R].

Die Daten des Gebäudebestandes wurden in einer Datenbank abgelegt (MS Access). Die Wahl von Access erwies sich als ungünstig, da die maximale Speichergrösse von MS Access 2000 (2 GB) in unserem Fall rasch überschritten wurde. Es wäre wohl einfacher gewesen, mit MySQL zu arbeiten.

Für die Kommunikation zwischen R und MS Access konnte das Paket RODBC [RODBC] eingesetzt werden. Damit ist es möglich, Daten aus MS Access mittels Datenbankabfragen in R einzulesen, dort zu bearbeiten und anschliessend wieder in MS Access abzuspeichern.

2.3.2 Daten

Grundlage des Modells ist der Gebäudebestand von Ende 1994 auf der Basis Einzelobjekt. Diese Daten sind aus der Phase I des Projektes vorhanden, sie konnten bei Statistik Stadt Zürich beschafft werden. Für die Berechnung werden die folgenden Grössen aus der Datenbank eingelesen:

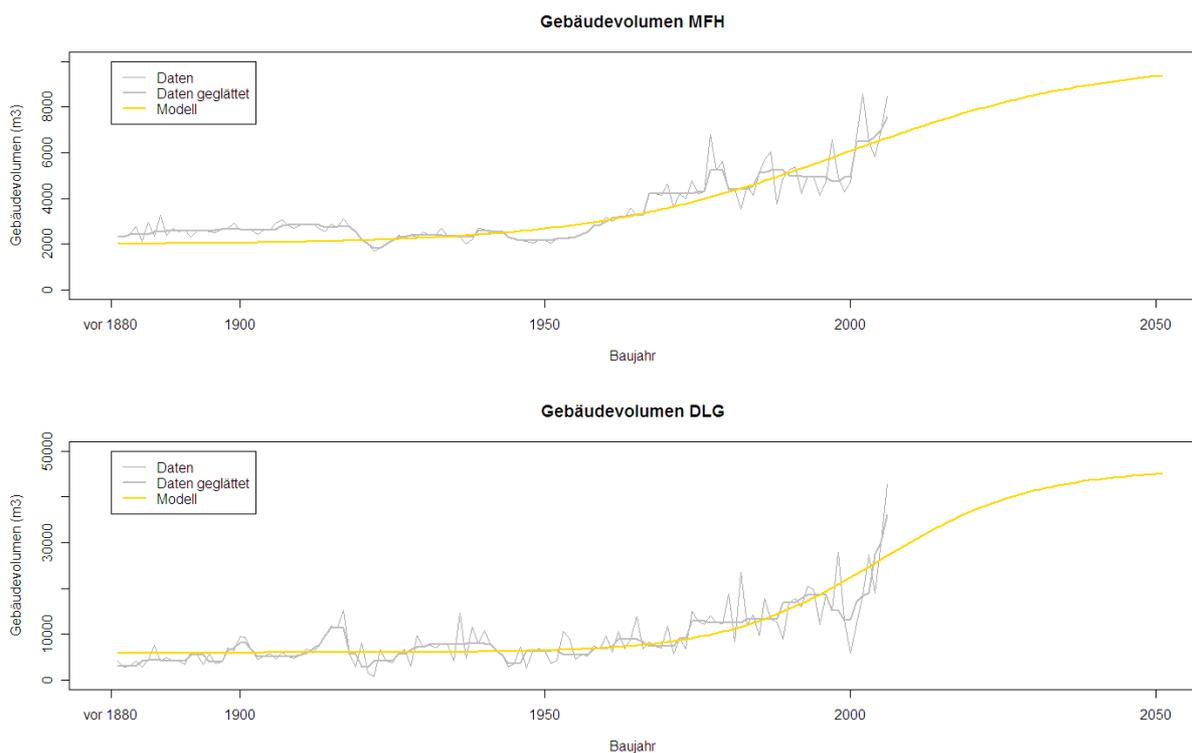
- Objektnummer, eine fortlaufende Zahl (Zeilennummer der Tabelle in MS Access, entspricht *nicht* dem EGID des Gebäudes)
- Das Baujahr des Gebäudes.
- Das Gebäudevolumen («Rauminhalt»).
- Die Nutzung, aggregiert auf die fünf Klassen EFH, MFH, DLG, PRG, Uebr.

Die Auswertungen erfolgen alle auf Basis der aggregierten Nutzung für die gesamte Stadt, es werden keine Angaben zu Einzelobjekten benutzt oder veröffentlicht. Der Gebäudebestand von Ende 1994 umfasst 51'729 Gebäude. Die Analyse des Gebäudebestandes in der Stadt Zürich wurde in [Schneider, Rubli 2007, S. 28 ff] für das Jahr 2005 ausführlich beschrieben.

2.3.3 Neubaurate, Grösse der Gebäude

Das Modell ist, wie oben beschrieben, nachfrageorientiert. Dadurch entfällt eine Neubaurate. Neubauten werden erstellt, wenn Ende Jahr die Nachfrage nach Gebäudevolumen grösser ist als das aktuelle Angebot. Falls umgekehrt das Angebot (d. h. der Bestand) grösser ist als die Nachfrage, dann bleibt ein Leerstand bestehen.

Ein Neubau im Modell erhält eine «typische» Grösse (Gebäudevolumen). Diese Grösse wurde empirisch aus den Daten des Bestandes von 2005 ermittelt, indem für jedes Baujahr die Summe des Rauminhaltes durch die Summe der Bruttogeschossfläche dividiert wurde. Die Entwicklung wurde bis zum Jahr 2050 nach eigenen Annahmen weitergeführt. Das einzelne Gebäudevolumen ist für das Modell nicht von grosser Bedeutung, da sich das Angebot an der totalen Nachfrage nach Gebäudevolumen orientiert. Dieses gesamte Volumen kann durch mehrere kleine oder durch wenige grosse Gebäude realisiert werden. Die Figur 13 zeigt die verwendete Grössen der MFH und der DLG. Die entsprechenden Grössen für die EFH, PRG und Uebr wurden ab dem Jahr 1995 jeweils konstant gelassen, die Werte wurden ebenfalls aus dem Bestand von 2005 ermittelt (EFH: 979 m³, PRG: 4241 m³, Uebr: 2500 m³, siehe Figur 59 im Anhang).

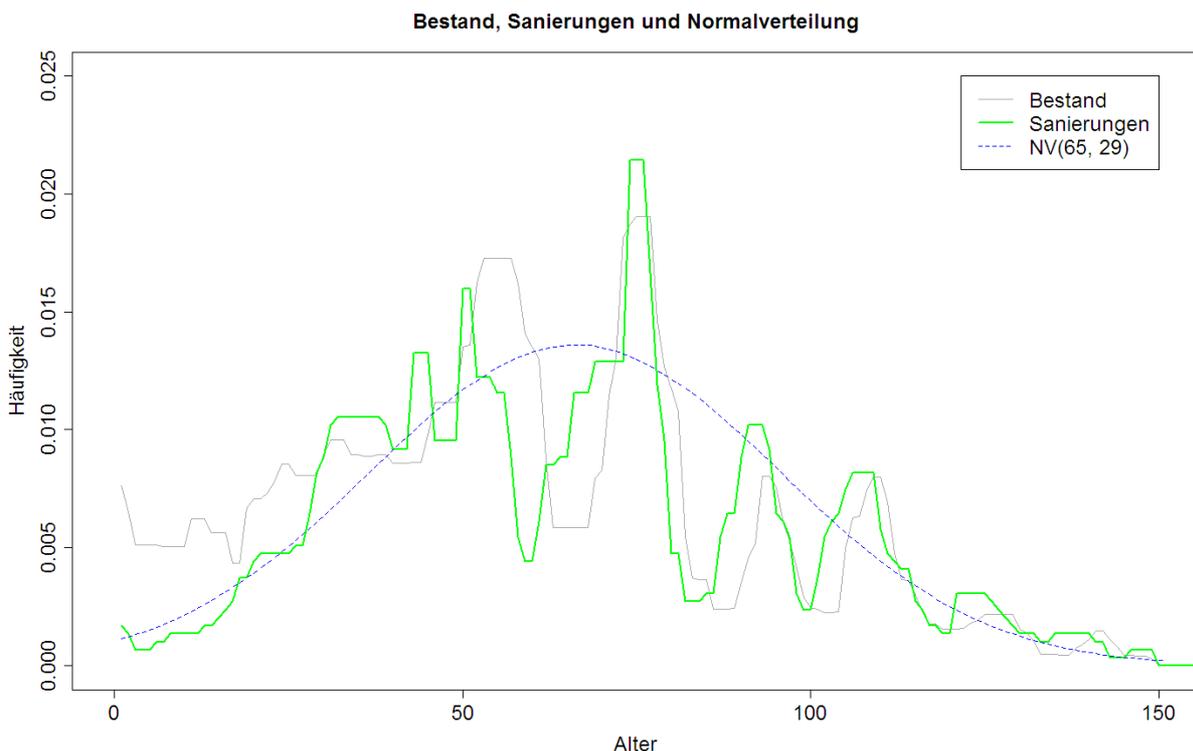


Figur 13 Das Gebäudevolumen, wie es aus dem Bestand von 2005 ermittelt werden kann (grau) und die Weiterführung der «typischen» Gebäudegrösse bis ins Jahr 2050 für das Modell (gelb).

2.3.4 Sanierungen und Rückbauten allgemein

Für das Modell mussten Annahmen zu den Sanierungs- und Rückbauraten getroffen werden. Sie bestimmen, wieviele Gebäude jährlich saniert und wieviele zurückgebaut werden. Aus Daten von Statistik Stadt Zürich lassen sich für die vergangenen Jahre gewisse Raten herausarbeiten.

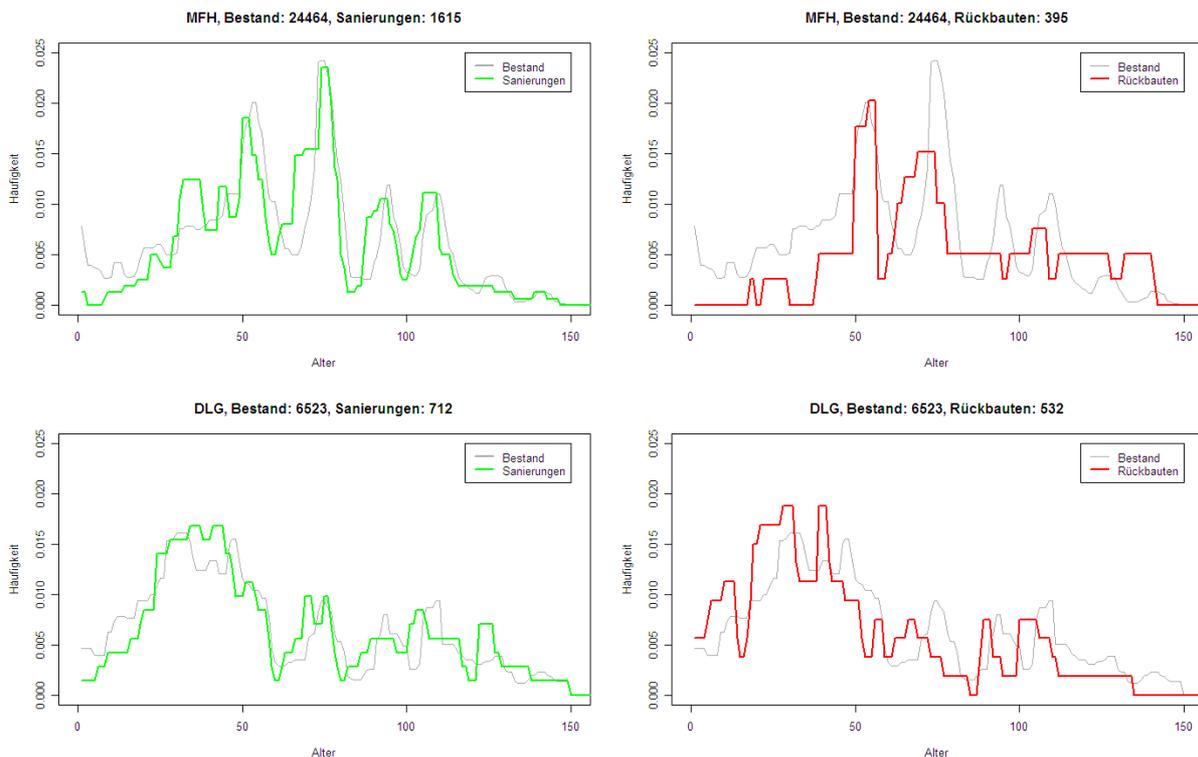
Im Allgemeinen wird für Sanierungen und Abbrüche mit Zyklen gearbeitet, welche um die theoretische Lebensdauer eines Gebäudes normalverteilt schwanken. Das heisst, ein Gebäude hat eine Lebenserwartung von z. B. 80 Jahren, anschliessend wird es abgebrochen. Sanierungszyklen dauern entsprechend kürzer. Bei der Analyse der Daten für die Sanierungen (für die Jahre von 2000–2005) und Abbrüche (für die Jahre 1993–2005) zeigt es sich aber, dass die Annahme der Normalverteilung für das Alter nicht unbedingt sinnvoll ist. Dazu ist in der Figur 14 die Altersverteilung des Bestandes (grau) und die Altersverteilung der in den Jahren 2000–2005 sanierten Gebäude (grün) dargestellt. Beide Altersverteilungen sind auf 1 normiert, damit sie vergleichbar sind. Zusätzlich ist in der Grafik eine Normalverteilung eingezeichnet (blau). Sie hat den Mittelwert von 65 Jahren, was dem Mittelwert des Alters der sanierten Gebäude entspricht und eine Standardabweichung von 29 Jahren aufweist.



Figur 14 Die Altersverteilung des Bestandes, die Altersverteilung der sanierten Mehrfamilienhäuser von 2000–2005 und als Vergleich eine Normalverteilung mit dem Mittelwert des Alters bei Sanierung (65 Jahre) und deren Standardabweichung (29 Jahre). Die Verteilungen sind auf 1 normiert und beziehen sich auf die Anzahl Gebäude. Eine Gleichverteilung des Sanierungsalters beschreibt die beobachteten Daten besser als die Normalverteilung.

Wenn die Kurven verglichen werden, fällt auf, dass das Alter eines Gebäudes eine untergeordnete Rolle beim Sanierungsentscheid spielt. Vielmehr scheint es so zu sein, dass auf der Gebäudeparksebene die Gebäude proportional zum Bestand saniert werden. Damit entspricht die Auswahl eher einer Gleichverteilung über den Bestand. Allerdings dauert es einige Jahre, bis die ersten Gebäude saniert werden (ca. 20 Jahre). Diese Dauer wurde als sogenannte «Schonfrist» im Modell implementiert (s. später).

Die Figur 15 zeigt für die MFH (oben) und DLG (unten) die entsprechenden Werte für die Sanierungen (links, grün) und die Rückbauten (rechts, rot). Bei den Sanierungen stimmt die oben formulierte Annahme, dass die Sanierungen proportional dem Bestand erfolgen, sowohl bei den MFH wie auch bei den DLG optisch recht gut überein. Ein Grund für die gute Übereinstimmung ist die relative grosse Stichprobenanzahl (MFH: 1615, DLG: 712). Bei den Rückbauten hingegen sind es für die MFH nur 395 und für die DLG 532 Objekte, welche aus den Daten bekannt sind. Daher beeinflussen einzelne Rückbauobjekte die Verteilung über das betrachtete Alter relativ stark. Bei den DLG ist die Übereinstimmung zwischen dem Bestand und der Altersverteilung der zurückgebauten Gebäude bereits besser.



Figur 15 Die Figur zeigt die Altersverteilungen des Bestandes (grau), die Altersverteilung der sanierten Gebäude (grün) und diejenige der rückgebauten Gebäude (rot) für die MFH (oben) und die DLG (unten). Grundlage ist jeweils die Anzahl der Gebäude. Die Angabe über den Bestand bezieht sich auf das Jahr 2005. Die Verteilungen sind auf 1 normiert und geglättet.

Implementation in das Modell

Für das Modell wurde aus diesen Erkenntnissen die Auswahl der Gebäude für die Sanierungen und Rückbauten jeweils gleichverteilt – zufällig – aus dem Bestand gewählt. Dies geschieht folgendermassen:

Ein Gebäude, welches vor dem aktuellen Berechnungsjahr neu gebaut oder saniert wurde, erhält eine «Schonfrist», während der es keine weiteren Eingriffe erfährt. Diese Fristen sind aus den oben erwähnten Daten gewonnen und anschliessend mit Experten diskutiert und festgehalten worden. Sie sind in der Tabelle 3 aufgeführt.

Entsprechend der aktuellen Sanierungs- oder Rückbauraten wird die Anzahl Gebäude bezüglich des Gesamtbestands bestimmt. Das heisst, es wird berechnet, wieviele Gebäude in diesem Jahr saniert oder abgebrochen werden. Diese Raten sind nach der jeweiligen Nutzung differenziert. Aus dem Bestand werden nun alle Gebäude ausgewählt, welche sich nicht innerhalb der «Schonfrist» befinden. Aus dieser Auswahl wird anschliessend die vorher berechnete Anzahl der zu sanierenden oder rückzubauenden Gebäude zufällig gleichverteilt bestimmt.

Tabelle 3 Die Fristen, während der ein Gebäude nach einem Eingriff nicht wieder saniert oder rückgebaut werden kann.

	EFH	MFH	DLG	PRG	Uebr
Sanierung ist möglich ab ...					
... Jahre nach Sanierung oder Neubau	20	15	5	10	10
Rückbau ist möglich ab ...					
... Jahre nach Sanierung	20	15	5	10	10
... Jahre nach Neubau	30	30	10	10	10

Die Sanierung und der Rückbau beziehen sich somit im Modell auf die *Anzahl* Gebäude. Dies hat zur Folge, dass das zugehörige Gebäudevolumen je nach Wahl schwanken kann. So werden z. B. ungefähr 30 DLG pro Jahr zurückgebaut. Das Volumen der einzelnen DLG in der Stadt Zürich liegt aber zwischen 25 und 176'800 Kubikmetern pro Gebäude. Das heisst, dass die Summe dieser zurückgebauten 30 DLG um einige Grössenordnungen schwanken kann.

Aus diesem Grund wurden für das Gebäudebestandsmodell 100 verschiedene Realisierungen gerechnet und die Resultate miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass wohl eine einzelne Realisierung in einzelnen Jahren stark vom Mittelwert abweichen kann. Insgesamt wird aber die Tendenz gut beschrieben.

2.4 Die Berechnung des Gebäudebestandes

Bevor die effektive Berechnung startet, werden die Modellparameter eingelesen. Diese sind auf die «globalen Konstanten» und die Modell-Parameter der Szenarien aufgeteilt. Bei den «globalen Konstanten» handelt es sich um Parameter, welche für alle Berechnungen, d. h. unabhängig von der Wahl des Szenarios, verwendet werden. Sie werden weiter unten beschrieben.

Nach dem Einlesen der Konstanten und szenario-spezifischen Angaben werden die Daten des Bestandes 1994 (Objektnummer, Baujahr, Gebäudevolumen, Nutzung) eingelesen und die folgenden weiteren Attribute hinzugefügt.

Umbaujahr: Das Umbaujahr ist der Jahrgang der Sanierung. Da diese Information für den Bestand von 1994 nicht bekannt ist, wird jedem Gebäude ein virtuelles Umbaujahr zugeschrieben. Dazu wird mit einer Normalverteilung (Mittelwert = 67 Jahre, Standardabweichung = 28 Jahre) für jedes Gebäude eine Zahl x gewählt und von 1994 subtrahiert; damit wurde dieses Gebäude für das Modell vor x Jahren saniert.

Umbaujahr.alt: Das Jahr der vorletzten Sanierung. Der Startwert liegt hier bei Null. Wenn das Gebäude während der Berechnung eine weitere Sanierung erfährt, dann wird das letzte Sanierungsjahr zum «Umbaujahr.alt» und das «Umbaujahr» erhält den aktuellen Jahrgang der Berechnung.

Rückbaujahr: Der Jahrgang des Rückbaus des Gebäudes. Der Standardwert für das Rückbaujahr ist 0. Falls das Rückbaujahr > 0 ist, gilt es als in diesem Jahr abgebrochen, bleibt aber weiterhin im Bestandesmodell erhalten.

Bauweise: Die Bauweise gibt an, ob das Gebäude konventionell (k), in Minergie- (m) oder Minergie-P-Standard (p) gebaut ist. Zudem sind die denkmalgeschützten und inventarisierten Gebäude mit der Bauweise d hier aufgeführt.

Bauweise.alt: Die Bauweise vor der aktuellen Sanierung. Der Standardwert ist konventionell, da bis ins Jahr 1995 nur konventionell gebaut wurde. «Bauweise.alt» und «Umbaujahr.alt» sind wichtig für die Berechnung der Materialflüsse für die Wärmedämmung und Haustechnik. So spielt es eine Rolle, ob das Gebäude vor der aktuellen Sanierung bereits in Minergie oder aber konventionell gebaut wurde.

Damit umfassen die Gebäude für die Berechnung die folgenden neun Attribute, welche in der Folge verändert werden können:

ID	Objektnummer (fortlaufend)
Baujahr	Baujahr des Gebäudes
Umbaujahr	Jahrgang der Sanierung
Rückbaujahr	Jahrgang des Rückbaus, Startwert 0
Nutzung	Nutzung (EFH, MFH, DLG, PRG, Uebr)

GebVol	Rauminhalt, Gebäudevolumen
Bauweise	konventionell, Minergie, Minergie-P, denkmalgeschützt
Bauweise.alt	konventionell
Umbaujahr.alt	Startwert 0

Nachdem der Bestand von 1994 eingelesen und für die Modellierung angepasst worden ist, kann mit der Veränderung des Bestandes begonnen werden. Alle im folgenden ausgeführten vier Schritte werden differenziert nach den fünf Nutzungen EFH, MFH, DLG, PRG, Uebr durchgeführt. Sie werden für jedes einzelne Jahr von 1995–2050 durchgerechnet. Für die Beschreibung der Berechnung bedeutet der Ausdruck «Jahrgang» oder «aktueller Jahrgang» jeweils das aktuelle Jahr der Berechnung.

2.4.1 Schritt 1: Rückbau

Aufgrund der Rückbaurate ist die Anzahl der Gebäude bekannt, die in diesem Jahr zurückgebaut werden. Gemäss dem oben beschriebenen Vorgehen werden aus dem Bestand die potenziell rückbaubaren Gebäude ausgewählt. Es handelt sich dabei um alle Gebäude, bei welchen die letzte Sanierung oder das Baujahr grösser ist als die entsprechende «Schonfrist». Aus dieser Auswahl wird die entsprechende Anzahl der Gebäude zufällig (gleichverteilt) bestimmt und ihr Attribut «Rückbaujahr» erhält den aktuellen Jahrgang. Damit gelten diese Gebäude als in diesem Jahr zurückgebaut.

2.4.2 Schritt 2: Sanierungen

Wie für den Rückbau werden diejenigen Gebäude aus dem Bestand gewählt, welche sich ausserhalb der «Schonfrist» befinden. Aus dieser Auswahl wird entsprechend den Sanierungsraten die Anzahl Gebäude zufällig gewählt, welche innerhalb des zu berechnenden Jahres saniert werden. Diese Gebäude erhalten als «Umbaujahr» den aktuellen Jahrgang. Anschliessend muss die Bauweise der Sanierung festgelegt werden. Diese wird dem einzelnen Gebäude zufällig zugewiesen, so dass die prozentuale Verteilung aller Sanierungen der Bauweisen konventionell, Minergie und Minergie-P in diesem Jahr der Vorgabe entspricht. Die Bauweise vor der Sanierung wird in «Bauweise.alt» eingetragen, ebenso wird das Jahr der früheren Sanierung neu zum «Umbaujahr.alt».

Ausnahme: Die denkmalgeschützten Gebäude können nur nach der Bauweise konventionell saniert werden.

2.4.3 Schritt 3: Ersatzneubau

Die im Schritt 1 (Rückbau) abgebrochenen Gebäude werden aus der Datenbank ausgelesen und mit einem «Vergrößerungsfaktor» dem Bestand mit einer neuen Objekt Nummer hinzugefügt. Das Gebäudevolumen nimmt dabei für die MFH und die DLG um 20 % zu; der Vergrößerungsfaktor für EFH, PRG und Uebr ist gleich 1, d. h. diese Gebäude haben das selbe Volumen wie ihre Vorgänger-Gebäude.

Die Bauweise dieser einzelnen Gebäude wird anschliessend zufällig festgesetzt. Die Verteilung der Bauweise auf konventionell, Minergie und Minergie-P ist durch die Wahl der entsprechenden Parameter festgelegt.

2.4.4 Schritt 4: Neubau

Nun folgt der Vergleich des aktuellen Bestandes mit der Nachfrage nach EBF für dieses Jahr. Falls der aktuelle Bestand kleiner ist, als die geforderte Nachfrage, werden Neubauten mit einer durchschnittlichen Grösse «hinzugebaut» – d.h. dem Bestand hinzugefügt – so dass die Nachfrage gedeckt wird. Ist die aktuelle Nachfrage kleiner als der aktuelle Bestand, ergibt sich ein Leerstand. Von diesem Leerstand wird 1/5 gemäss dem Schritt «Rückbau» abgebrochen. Es gibt drei Gründe, warum nur 1/5 des Leerstandes abgebrochen wird:

Der Gebäudebestand reagiert im Allgemeinen relativ träge auf Veränderungen der Nachfrage. So können gewisse Büroflächen über mehrere Jahre leer stehen, ehe sie wieder vermietet werden. Ein Gebäude wird nicht abgebrochen, nur weil es während einem Jahr nicht vermietet ist.

Da möglicherweise die Nachfrage nach Gebäudevolumen im nächsten Jahr wieder grösser ist, müsste der in diesem Jahr abgebrochene Leerstand im nächsten Jahr wieder neu aufgebaut werden. Das ist nicht realistisch.

Falls die Differenz jeweils korrekt modelliert würde, dann würden zu hohe und nicht realistische Materialflüsse berechnet (sowohl Output als auch Input).

Nachdem diese vier Schritte abgearbeitet wurden, ist die Bestandsveränderung für ein Jahr durchgerechnet und der aktuelle Bestand wird als «Bestand_xx» (xx = aktuelles Berechnungsjahr) in der Datenbank abgespeichert. Der Bestand Ende Jahr ist damit der Ausgangsbestand für die Berechnung des nächsten Jahres. Diese vier Schritte werden iterativ bis zum Jahr 2050 wiederholt.

2.4.5 Materiallager und -flüsse

Die Materialisierung der Gebäude und der entsprechenden Lager und -flüsse erfolgt analog der Methoden, wie sie in der Phase I mit der «typischen Bauweise pro Baujahr und Nutzung»

durchgeführt wurde. Diese Methode ist im Bericht der Phase I ausführlich erläutert [Schneider, Rubli 2007, Abschnitt 2.3]. Das Prinzip wird hier nochmals kurz zusammengefasst.

Es wird davon ausgegangen, dass ein Gebäude einen «typischen Aufbau» (Materialanteil pro Kubikmeter Gebäudevolumen, Materialzusammensetzung) in Funktion seines Baujahres und seiner Nutzung hat. Die Grundlagen dazu finden sich in [Kt. Aargau, 1995]. Dies bedeutet, dass für ein Gebäude das Baujahr, seine Nutzung und das Gebäudevolumen bekannt sein müssen, um die Baumaterialienmengen (Volumen/Masse und Zusammensetzung) quantifizieren zu können. Wird diese Methode auf der Ebene Einzelgebäude verwendet, kann das Materiallager des gesamten Gebäudebestandes hochgerechnet werden.

Die entsprechenden Materialflüsse lassen sich dann aus der jährlichen Veränderung des Gebäudebestandes berechnen. Dabei wird jedes neu gebaute, zurückgebaute oder sanierte Gebäude entsprechend «materialisiert» und die anfallenden Input- und Outputflüsse berechnet.

Berechnung der Materiallager

Die Berechnung der Materiallager erfolgt nach Abschluss der Modellierung des Gebäudebestandes, indem für jedes Jahr der modellierten Zeit der aktuelle Gebäudebestand nach der oben beschriebenen Methode «materialisiert» wird. Das Resultat, bzw. die Materiallager der Jahre 1995–2050 wird in einer Tabelle in der Datenbank gespeichert.

Für das Modell wurden die folgenden Materialien berücksichtigt und quantifiziert: Beton, Mauerwerk, Kies-Sand, Belag, mineralische Restfraktion (Gips, Glas, Keramik etc), Dämmung und Metalle.

Zunächst wird jeweils das Materialvolumen berechnet. Anschliessen erfolgt die Berechnung der Massen über die entsprechenden Dichten. Die Dichten der Materialien sind im Anhang angegeben (Tabelle 19 im Anhang)

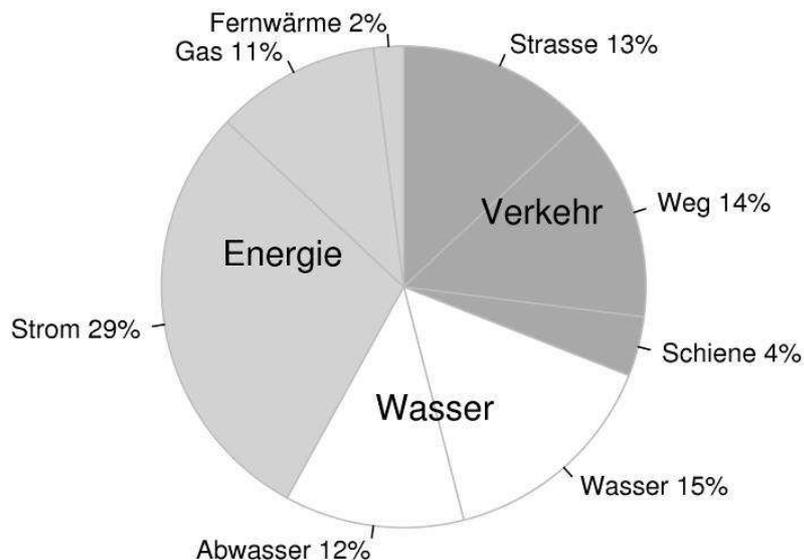
Berechnung der Materialflüsse

Die Quantifizierung der Materialflüsse erfolgt jeweils für ein Jahr. Dazu werden für jedes Jahr die sanierten, die zurückgebauten und die neugebauten Gebäude (inklusive Ersatzneubauten) aus den Daten des Bestandes ausgelesen und nach Baujahr und Nutzung materialisiert. Bei einer Sanierungen wird angenommen, dass 10 % des Gebäudematerials ersetzt wird (siehe dazu der Bericht der Phase I, Seite 14 ff.). Bei den Neubauten fallen bei der Bautätigkeit 3 % des Materials zusätzlich als Bauabfall an. Bei den Rückbauten werden die anfallenden Materialien vollständig als Rückbaumaterialien erfasst. Die Materialflüsse werden in zwei Tabellen «Input» und «Output» in der Datenbank gespeichert und für weitere Berechnungen benutzt.

2.5 Die Infrastruktursysteme

Die Daten zu den Infrastruktursystemen werden vollumfänglich aus der Phase I [Schneider, Rubli 2007] direkt übernommen. Die Figur 16 zeigt die Verteilung der Infrastrukturnetze in der Stadt Zürich. Die totale Länge beträgt rund 7'500 km. Je ca. ein Drittel entfällt auf Verkehr, Wasser/Entwässerung und Energie.

Die Materiallager und Materialflüsse der Infrastrukturbauten werden für jedes Jahr separat berechnet und in separaten Tabellen in der Datenbank gespeichert. Für die Auswertung können diese Werte wahlweise abgerufen werden. Die Berechnung erfolgt analog der Phase I. Dazu wird für jedes Infrastruktursystem ein «typischer Querschnitt» angenommen. Dieser Querschnitt wird mit der inventarisierten Länge multipliziert. Das Resultat ist das Volumen der mineralischen Baustoffe, welches für dieses System verbaut wird. Nun können mit den entsprechenden Mächtigkeiten der Materialien die Materiallager berechnet werden. Aus jährlichen Erneuerungsraten folgen dann die jährlichen Input- und Outputflüsse (Tabelle 4).



Figur 16 Der Bestand der Infrastrukturnetze in der Stadt Zürich, relativ zu ihrer Länge dargestellt. Die totale Länge beträgt 7'500 km. Die Abbildung stammt aus dem Bericht der Phase I [Schneider, Rubli 2007, S. 33].

Tabelle 4 Die Dimensionen der Infrastruktursysteme in der Stadt Zürich. Die Angaben stammen aus dem Bericht der Phase I [Schneider, Rubli 2007]. Das Volumen in der mittleren Spalte bezieht sich auf das Volumen der mineralischen Baustoffe, d. h. das Rohrvolumen ist nicht inbegriffen. Bei Strasse und Schiene entspricht es dem Volumen des Strassen-, bzw. Schienenkörpers. Die Erneuerungsrate gibt an, welche Mengenanteile pro Jahr ersetzt werden. Das heisst, sie bestimmt die Input- und Outputflüsse der bestehenden Infrastrukturbauten.

	Länge	Volumen*	Erneuerungsrate
	km	Mio. m ³	% pro Jahr
Verkehr			
Strasse			
Stadt und Kanton (ohne Privatstrassen)	766	3.57	2.1%
Autobahn	15	0.11	2.5%
Weg, befestigt	984	1.13	1.3%
Weg unbefestigt	95	0.10	1.3%
Schiene			
VBZ	83	0.27	3.3%
SBB, SZU	211	0.92	3.3%
Kunstabauten			
Stadt und Kanton	76	0.75	1.6%
Autobahn	13	0.23	1.5%
Schiene	29	0.70	1.4%
Wasser, Abwasser			
Trinkwasser (WVZ)	1'119	2.27	1.9%
Entwässerung (ERZ)	927	2.76	1.0%
Energie			
Strom (EWZ)	2'130	2.56	2.2%
Gasversorgung	799	0.78	1.5%
Fernwärme	132	0.44	1.5%

* Das Volumen bezieht sich auf das Volumen der mineralischen Baustoffe

2.6 Die verschiedenen Szenarien

Um die Auswirkungen von verschiedenen Entwicklungen aufzeigen zu können, wurden in Absprache mit der Begleitgruppe 10 Szenarien definiert. Diese betreffen zum Teil ausschliesslich die Entwicklung des Gebäudebestandes. Andere verändern Parameter des gesamten Systems (Hoch- und Tiefbau) oder nur Werte der Infrastruktur. In der Tabelle 5 sind die Szenarien mit ihrem Namen und einer kurzen Beschreibung zusammengefasst. In der Folge werden sie ausführlich dargestellt.

Tabelle 5 Beschreibung aller Szenarien mit Nummer, Name und Erläuterung.

Nr.	Name	Beschreibung
0.0	KONSTANT	Die Startwerte von 1995 bzw. 2005 werden konstant gehalten
1.1	SANIEREN	Die Sanierungsraten werden um einen bestimmten Faktor für das Jahr 2050 erhöht.*
1.2	ERSETZEN	Die Rückbauraten (= Ersatzneubauraten) werden um einen bestimmten Faktor für das Jahr 2050 erhöht.*
1.3	KOMBINIERT	Sanierungs- und Rückbauraten werden erhöht auf Werte von Sz. SANIEREN und Sz. ERSETZEN
2.1	RC+ bei SANIEREN	Der Anteil RC-Materialien im Input wird gegenüber Szenario SANIEREN erhöht
2.2	RC+ bei ERSETZEN	Der Anteil RC-Materialien im Input wird gegenüber Szenario ERSETZEN erhöht
3.1	ER hoch	Die Erneuerungsrate der Infrastruktur wird ab 1995 um einen Faktor erhöht; bzgl. Szenario KONSTANT
3.2	ER tief	Die Erneuerungsrate der Infrastruktur wird ab 1995 um einen Faktor gesenkt; bzgl. Szenario KONSTANT
3.3	Netz länger	Die Längen der Infrastrukturnetze wachsen bis 2050 um einen gewissen Faktor*; bzgl. Szenario KONSTANT
4.1	MAXIMAL	Kombination der Szenarien, die einen erhöhten Materialumsatz zur Folge haben (1.3, RC+, 3.1, 3.3)

*lineares Wachstum von 1995 bis 2050

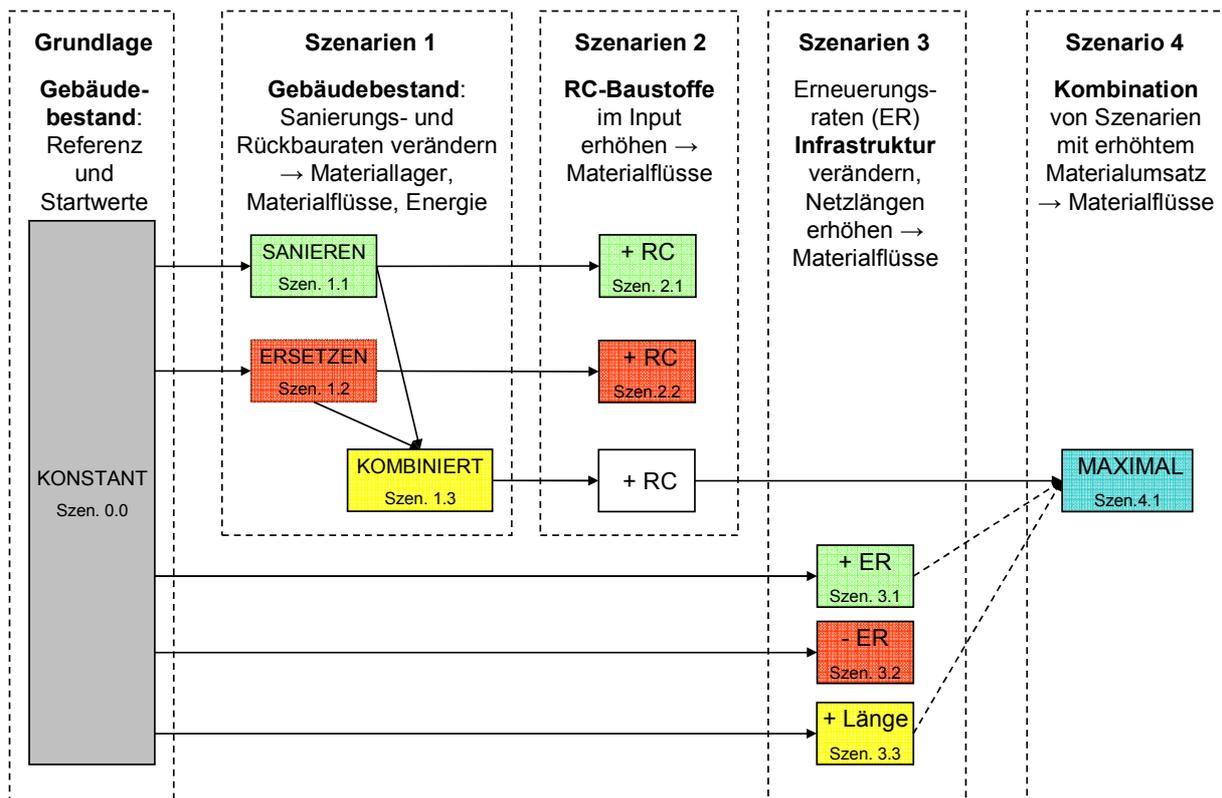
Grundlage für die Entwicklung des Gebäudebestandes bildet das Szenario KONSTANT (Nummer 0.0). Es liefert die Startwerte für alle anderen Szenarien. Die Szenarien 1.1–1.3 umfassen die Szenarien zum Gebäudebestand (SANIEREN, ERSETZEN, KOMBINIERT). Daraus werden einerseits die Materiallager und -flüsse berechnet, andererseits aber auch der Energiebedarf der Gebäude aufgrund ihrer Bauweise (konventionell, Minergie, Minergie-P). Auch die Analyse für die Graue Energie beim Input in den Gebäudepark erfolgt aus diesen Szenarien.

Die zwei Szenarien 2.1 und 2.2 werden direkt aus den Szenarien SANIEREN und ERSETZEN abgeleitet. Bei beiden Szenarien wird der Einsatz von RC-Baustoffen im Input erhöht (RC+). Hier soll die Frage beantwortet werden, ob und in welchem Ausmass sich die Input- und Outputflüsse annähern, wenn vermehrt RC-Baustoffe eingesetzt würden.

In den Szenarien 3.1–3.3 wird der Einfluss der Erneuerungsraten (ER) und der Längen in den Infrastruktursystemen auf die Input- und Outputflüsse des Gesamtsystems untersucht. Der Gebäudebestand entwickelt sich dabei in allen drei Szenarien nach dem Szenario KONSTANT. Mit diesen Szenarien soll der Einfluss der Infrastruktursysteme auf das Gesamtsystem Stadt Zürich bezüglich der Materialflüsse aufgezeigt werden.

Das Szenario 4.1 fasst verschiedene Faktoren zusammen, welche einen erhöhten Materialumsatz zur Folge haben, es wird daher MAXIMAL genannt. Als Resultat werden die Materialflüsse untersucht. Es wird vor allem als Vergleichsszenario in der Diskussion verwendet werden.

In der Figur 17 ist diese Verknüpfung der einzelnen Szenarien schematisch dargestellt.



Figur 17 Das Schema der verschiedenen Szenarien und deren Verknüpfungen untereinander.

KONSTANT: Grundlage und Startwerte aller Szenarien. SANIEREN: Sanierungsrate erhöhen. ERSETZEN: Rückbauraten erhöhen. KOMBINIERT: Sanierungs- und Rückbauraten erhöhen. RC-Baustoffe erhöhen gegenüber SANIEREN und ERSETZEN (RC+). Erneuerungsraten (ER) der Infrastruktursysteme und die Länge der Infrastruktursysteme verändern. MAXIMAL: Kombination der Szenarien mit erhöhtem Materialumsatz.

2.6.1 Die Szenarien zur Entwicklung des Gebäudebestandes

Als Grundlage für die Untersuchung der verschiedenen Fragestellungen sollen mögliche Entwicklungen des Gebäudebestandes berechnet werden, um anschließend die weiteren Szenarien darauf aufzubauen. Diese Entwicklungen unterscheiden sich bezüglich den Sanierungs- und Rückbauraten. Als Referenzszenario dient dazu das Szenario KONSTANT. Wie der Name sagt, werden dabei die Sanierungs- und Rückbauraten auf dem Stand des

Mittelwertes der Jahre 2000–2005 konstant belassen. Diese Werte sind zugleich die Startwerte für die weiteren Szenarien.

Um den Einfluss einer verstärkten Sanierungstätigkeit abzubilden, wird im Szenario SANIEREN die Sanierungsrate ab dem Jahr 1995 linear bis ins Jahr 2050 erhöht. Die Rückbaurrate bleibt dabei konstant auf dem Startwert.

Im Szenario ERSETZEN wird die Rückbaurrate vom Start ab 1995 linear erhöht, bis sie im Jahr 2050 um einen festgelegten Faktor grösser ist. Dabei wird die Sanierungsrate konstant gelassen.

Schliesslich werden im Szenario KOMBINIERT sowohl die Sanierungs- als auch die Rückbaurrate um die entsprechenden Werte der Szenarien SANIEREN und ERSETZEN erhöht. Dieses Szenario ist somit eine Kombination der zwei Szenarien und entspricht einer sehr intensiven Bewirtschaftung des Gebäudebestandes.

Die Tabelle 5 zeigt die Faktoren, welche für die hier beschriebenen Szenarien verwendet wurden. In der Spalte «Startwerte» sind die Sanierungs- und Rückbauraten für die zwei Bereiche «Wohnen» und «Nichtwohnen» angegeben. Die entsprechenden Werte wurden so gewählt, dass die erhaltene Rate mit den bekannten Daten für die Jahre 2000–2005 übereinstimmt. Die weiteren Spalten («Endwerte») geben den Faktor an, um den der Startwert bis ins Jahr 2050 vergrössert wird. So beträgt z. B. die Sanierungsrate für «Wohnen» im Szenario SANIEREN im Jahr 2050 das Dreifache des Startwertes (Faktor 3.0), die Sanierungsrate für «Nichtwohnen» das eineinhalbfache (Faktor 1.5).

Tabelle 6 Die Werte der Szenarien, welche die verschiedenen Entwicklungen des Gebäudebestandes beschreiben. Die Startwerte sind für alle Szenarien die gleichen, sie entsprechen dem Mittelwert der Jahre 2000–2005. Die Endwerte werden bis ins Jahr 2050 linear auf den entsprechenden Faktor erhöht. So beträgt z. B. die Sanierungsrate für Wohnbauten im Szenario SANIEREN im Jahr 2050 das Dreifache des Startwertes (Faktor 3.0), die Sanierungsrate für «Nichtwohnen» das Eineinhalbfache (Faktor 1.5).

	Startwerte 1995	Endwerte 2050	Endwerte 2050	Endwerte 2050	Endwerte 2050
für alle Szenarien		Szenario 0.0 KONSTANT	Szenario 1.1 SANIEREN	Szenario 1.2 ERSETZEN	Szenario 1.3 KOMBINIERT
	Rate in %	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor
Sanierung					
Wohnen	1.390	1.0	3.0	1.0	3.0
Nichtwohnen	4.395	1.0	1.5	1.0	1.5
Rückbau					
Wohnen	0.125	1.0	1.0	4.0	4.0
Nichtwohnen	0.497	1.0	1.0	3.0	3.0

Die Wahl der Endwerte zur Definition der Szenarien basiert auf den folgenden Vorgaben: Einerseits sollen die Raten so hoch wie möglich sein, um ihren Einfluss auf das zu untersuchende System aufzuzeigen. Gleichzeitig sollen sie sich aber in einem realistischen Bereich bewegen, um die Resultate erklären zu können. So bewegen sich die heutigen Sanierungsraten bei den Wohnbauten beispielsweise auf einem tiefen Niveau (1.39). Diese Rate entspricht einem Gebäudealter bei Sanierung von 71 Jahren (Mittelwert der Daten von 2000–2005). Dieser Wert kann nicht beliebig verkleinert werden. Es wird unrealistisch, wenn die Sanierungsrate mehr als verdreifacht wird, da dies bedeuten würde, dass ein Gebäude nach weniger als 23 Jahren bereits wieder saniert werden müsste. Für die Rückbauraten gilt analog dasselbe. Zudem müsste auch aus ökonomischer Sicht überlegt werden, ob eine weitere Erhöhung überhaupt realistisch wäre.

Da die Sanierungs- und Rückbauraten nur nach «Wohnen» und «Nichtwohnen» differenziert sind, werden für die Berechnung die Sanierungs- und Rückbauraten der einzelnen Nutzungen Anpassungen vorgenommen. Da der Bestand der Gebäude in der Stadt Zürich von den MFH und DLG dominiert wird (85 %), entsprechen die Sanierungs- und Rückbauraten von «Wohnen» und «Nichtwohnen» denjenigen der MFH und DLG. Für die weiteren Nutzungen werden diese Raten mit Faktoren differenziert. Die Tabelle 7 zeigt, wie die Raten mittels Faktoren differenziert werden. So wird z.B. die Sanierungsrate für die EFH folgendermassen berechnet: Die Sanierungsrate für «Wohnen» (1.39) wird mit dem entsprechenden Faktor der EFH (0.70) multipliziert, was 0.97 als Resultat ergibt. Das heisst, die EFH haben eine Sanierungsrate von 0.97 Prozent pro Jahr, die MFH eine solche von 1.39 Prozent pro Jahr. Diese Werte wurden aus bekannten Daten der Sanierungen und Rückbauten aus den Beständen von 1995–2005 abgeleitet.

Tabelle 7 Die Werte für Sanierung und Rückbau (Prozent pro Jahr), differenziert auf die fünf Nutzungen. Beispiel Sanierung EFH: Die Rate für «Wohnen» (1.39) wird mit dem entsprechenden Faktor (0.70) multipliziert um den Wert für die EFH zu erhalten (0.97). Das bedeutet, die Sanierungsrate beträgt für die EFH 0.97 Prozent pro Jahr, für die MFH 1.39 Prozent pro Jahr.

	Sanierung		Rückbau	
	Faktor	Rate in Prozent	Faktor	Rate in Prozent
Wohnen		1.39		0.13
EFH	0.70	0.97	2.00	0.25
MFH	1.00	1.39	1.00	0.13
Nichtwohnen		4.40		0.50
DLG	1.00	4.40	1.00	0.50
PRG	0.50	2.20	1.00	0.50
Uebr	0.13	0.57	0.50	0.25

In der Figur 18 sind die gewählten Raten und ihre Resultate für die Sanierungen (oben) und die Rückbauten (unten) am Beispiel der MFH und der DLG illustriert. In der linken Spalte sind die bekannten Daten der Jahre 2000–2005 aufgeführt. Die blaue horizontale Linie verläuft auf der Höhe dieser Werte. Die weiteren Spalten zeigen von links nach rechts die Modellresultate (Mittelwerte) für die Szenarien KONSTANT, SANIEREN und ERSETZEN und KOMBINIERT. Es zeigt sich, dass sich die Erhöhung der Raten in den Szenarien auf den Mittelwert nicht so stark auswirkt, wie man dies aufgrund der Erhöhung der Raten annehmen könnte.



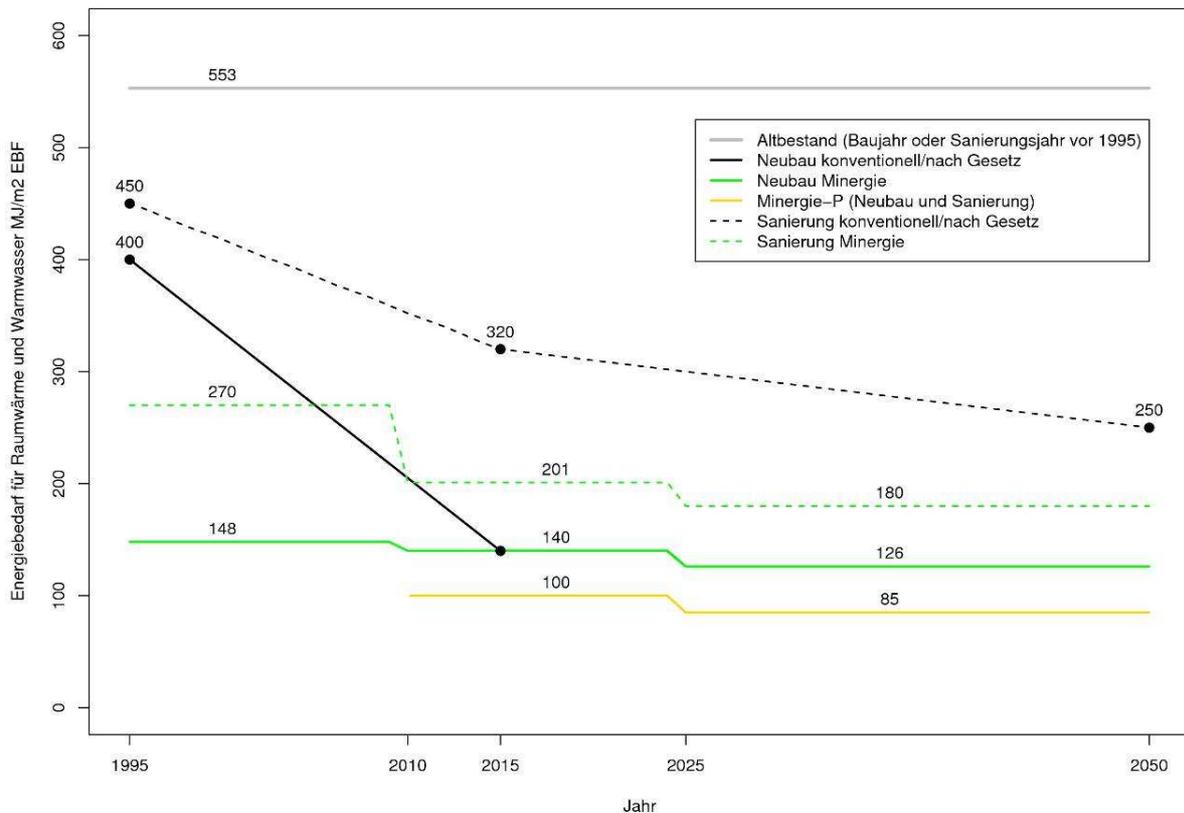
Figur 18 Die gewählten Raten für Sanierungen (oben) und Rückbauten (unten) am Beispiel der MFH und der DLG. Die Spalte ganz links zeigt die bekannten Daten der Jahre 2000–2005. Die blaue horizontale Linie verläuft auf der Höhe dieser Werte. Die weiteren Spalten zeigen von links nach rechts die Modellresultate (Mittelwerte) für die Szenarien KONSTANT, SANIEREN (Sanierungsrate erhöht), ERSETZEN (Rückbaurrate erhöht) und KOMBINIERT (Sanierungs- und Rückbaurrate erhöht).

2.6.2 Energieaspekte der Szenarien des Gebäudebestandes

Für die Entwicklung des Gebäudebestandes werden die vier soeben beschriebenen Szenarien gerechnet. Da bei diesen Entwicklungen der Energiestandard der Gebäude mit den Attributen konventionell, Minergie und Minergie-P beschrieben ist, können diese Angaben für energetische Fragestellungen verwendet werden. So interessiert im Hinblick auf das Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft der Energiebedarf für die Raumwärme und das Warmwasser, welche die Gebäude für ihren Betrieb benötigen. Die mit den Inputflüssen verbundene Graue Energie, welche die Neubau- und Sanierungstätigkeit mit sich bringt, kann ebenfalls berechnet werden. Mit dem Vergleich dieser Werte kann aufgezeigt werden, wie die Graue Energie und die Endenergie für die Nutzung der Gebäude zueinander im Verhältnis stehen und sich allenfalls zueinander verändern.

Energiebedarf der Gebäude

Die Figur 19 zeigt die Faktoren für den Energiebedarf, welche nach [Koschütz, Pfeiffer, 2005] und Angaben aus dem ECO₂-Rechner [ECO₂, 2007] für den jeweiligen Energiestandard einzusetzen sind. Der Energiebedarf ist hier auf die Raumwärme und das Warmwasser in Megajoule pro Quadratmeter Energiebezugsfläche MJ/m² EBF bezogen. Der Energiebedarf wird für das Modell unabhängig von der Nutzung der Gebäude untersucht. So bleibt der Wert für den Altbestand ab 1995 auf 553 MJ/m² EBF. Die konventionelle Sanierung bewirkt eine Reduktion des Energiebedarfes von 450 MJ/m² EBF im Jahr 1995 auf 320 MJ/m² EBF (2015) und weiter sogar auf 250 MJ/m² EBF im Jahr 2050. Diese Annahmen wurden in der Begleitgruppe des Projektes diskutiert und so festgehalten. Der Wert für die Neubauten in konventionelle Bauweise entspricht ab 2015 demjenigen von Minergie (140 MJ/m² EBF). Minergie-P-Standard wird für Neubauten und Sanierungen mit einem Wert von 100 MJ/m² EBF ab 2010 beginnen und ab 2025 auf 85 MJ/m² EBF absinken.



Figur 19 Die angenommene zeitliche Entwicklung des Energiebedarfs der Gebäude für Raumwärme und Warmwasser in Abhängigkeit der Bauweise (konventionell, Minergie, Minergie-P). Quellen: [Koschencz, Pfeiffer, 2005], [ECO₂, 2007], eigene Annahmen.

Graue Energie

Der Begriff «Graue Energie» umfasst die Energie, welche zur Herstellung eines Produkts verwendet wird. Für diese Arbeit wurden zwei Methoden für die Berechnung der Grauen Energie verwendet. Die eine Methode richtet sich nach dem Inhalt der Grauen Energie der Baustoffe. Dazu wurden die aktuellen Werte der KBOB/eco-bau/IPB-Empfehlung «Ökobilanzdaten im Baubereich» übernommen [KBOB 2009]. Die detaillierten Angaben wurden in der Folge aggregiert (Tabelle 8). Diese Daten beinhalten nur den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger für die Herstellung der Baustoffe, d. h. ohne erneuerbare Energieträger und ohne die Entsorgung der Baustoffe nach Ablauf ihrer Lebensdauer.

Die andere Berechnungsmethode nimmt pauschale Flächen-Faktoren für die Berechnung der Grauen Energie an, je nach dem ob ein Gebäude saniert oder neu gebaut wird (Quelle: Binz, Ott, 2002 in [Koschencz, Pfeiffer, 2005, S. 44]). Dort wird mit den Werten von 4000 MJ/m² EBF bei Neubauten und 1500 MJ/m² EBF bei Sanierungen gerechnet.

Primärenergie

Der Primärenergiefaktor (PEF) gibt die benötigte Primärenergie bezogen auf die Endenergie an. Die Werte wurden vom ECO₂-Rechner zur Verfügung gestellt und für diese Untersuchung angepasst. Der Faktor für 2005 beträgt für den Gebäudebestand für die Herstellung von Raumwärme und Warmwasser 1.67. Das heisst, der Primärenergiebedarf ist 1.67 mal grösser als die Endenergie. Dieser Faktor wird hier als gewichtetes Mittel zeitlich konstant eingesetzt, obwohl er für «Wohnen» (1.63) und «Nichtwohnen» (1.74) verschieden ist. Da sich aber das Verhältnis der EBF von «Wohnen» zu «Nichtwohnen» über die modellierte Zeit nicht wesentlich verändert (Mittelwert = 1.17, Standardabweichung = 0.012), kann der Faktor diesbezüglich konstant gelassen werden.

Tabelle 8 Eingesetzte Werte für die Graue Energie. Berücksichtigt sind dabei die fossilen und nuklearen Energieträger für die Herstellung der Baustoffe. Quelle: [KBOB 2009] eigene Aggregation

Graue Energie	
Material	MJ/kg
Beton (inkl. Armierung)	1.24
Kies, Sand	0.05
Belag	3.20
Mineralische Restfraktion	6.54
Dämmung	61.61
Metall	19.56

2.6.3 Szenarien zum Anteil der RC-Baustoffe im Input

Über den Anteil der RC-Baustoffe im Input in die Stadt Zürich müssen gewissen Annahmen getroffen werden. Diese Anteile werden sich im Laufe der Zeit wohl verändern, wahrscheinlich wird mehr RC-Material mit den Baustoffen in das System Stadt Zürich gelangen, da die Rückbaumaterialien öfter aufbereitet werden. Dies ist jedenfalls die Entwicklung, wie sie in den letzten 10 Jahren zu beobachten ist.

Daher wurden die Startwerte im Jahr 1995 so gewählt, dass sie für das Jahr 2005 den bekannten Daten aus der Phase I entsprechen (RC-Beton in Gebäude 20 %, RC-Beton in der Infrastruktur 50 %, RC-Kies und RC-Belag für die ganze Stadt 25 %). Diese Werte steigen im Modell auf 50–90 %, je nach RC-Baustoff und Szenario (vgl. Tabelle 9, mittlerer Zeilenblock).

Tabelle 9 Startwerte und Faktoren zur Berechnung der Szenarien 2.1–4.1. Für die Szenarien wird jeweils nur ein Parameter zusätzlich verändert, ausser im Szenario MAXIMAL, welches verschiedene Szenarien zusammenfasst.

	Startwerte 1995	Endwerte 2050 Sz. 0.0-1.3	Endwerte 2050 Sz. 2.1 RC + bzgl. 1.1	Endwerte 2050 Sz. 2.2 RC + bzgl. 1.2	Endwerte 2050 Sz. 3.1 ER + bzgl. 0.0	Endwerte 2050 Sz. 3.2 ER - bzgl. 0.0	Endwerte 2050 Sz. 3.3 Länge + bzgl. 0.0	Endwerte 2050 Sz. 4.1 MAXIMAL	
	Rate in %	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	
Gebäude	Sanierungsrate								
	Wohnen	1.39	*	3.00	1.00	1.00	1.00	3.00	
	Nichtwohnen	4.40	*	1.50	1.00	1.00	1.00	1.50	
	Rückbaurrate								
Wohnen	0.13	*	1.00	4.00	1.00	1.00	1.00	4.00	
Nichtwohnen	0.50	*	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00	3.00	
RC-Baustoffe		Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	Anteil in %	
	RC-Beton in die Gebäude	13%	50%	75%	75%	50%	50%	50%	75%
	RC-Beton in die Infrastruktur	47%	65%	75%	75%	65%	65%	65%	75%
	RC-Kies in das System	13%	75%	90%	90%	75%	75%	75%	90%
RC-Belag in das System	13%	75%	85%	85%	75%	75%	75%	85%	
Infrastruktur		Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	
	Erneuerungsrate konstant	1.00	1.00	1.00	1.00				
	Erneuerungsrate höher	1.20				1.20			1.20
	Erneuerungsrate tiefer	0.80					0.80		
Längen Infrastrukturnetze	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.20	1.20	

* siehe Tabelle 5

2.6.4 Szenarien der Infrastruktursysteme

Bei den meisten Szenarien wird für die Infrastruktursysteme davon ausgegangen, dass ihre Längen konstant bleiben. Mit den entsprechenden Erneuerungsraten werden daher die Input- und Outputflüsse gleichgross sein. Daher wurden die drei Szenarien 3.1 «Erneuerungsraten um 20 % erhöht», 3.2 «Erneuerungsraten um 20 % gesenkt» und 3.3 «Wachstum um 20 % bis ins Jahr 2050» formuliert und gerechnet (vgl. Tabelle 9).

Szenario 3.1 und 3.2: Erneuerungsraten verändert

Hier werden die Erneuerungsraten aller Infrastruktursysteme pauschal für die ganze modellierte Zeit um 20 % erhöht (3.1) bzw. um 20 % gesenkt (3.2). Die Längen bleiben dabei weiterhin konstant, d. h. es ändert sich nur die Lage der Input- und Outputflüsse aus der Erneuerung um jeweils 20 % gegenüber dem Szenario KONSTANT.

Szenario 3.3: Wachstum um 20 %

Da davon auszugehen ist, dass auch die Infrastrukturwerke wachsen, wenn der Gebäudebestand zunimmt, wurde ein Szenario formuliert, bei dem die Infrastrukturen bis ins Jahr 2050 um 20 % wächst. Damit erhöht sich der Materialinput, weil zunächst ein neuer Graben ausgehoben werden muss (es entsteht Aushub, welcher nicht berücksichtigt wird) und anschliessend vollständig mit neuen Baustoffen aufgefüllt wird. Die Erneuerungsraten bleiben in diesem Szenario auf dem Stand von heute. Da aber die Längen der Systeme wachsen, nehmen auch die Input- und Outputflüsse für den Unterhalt zu.

2.6.5 Das Szenario MAXIMAL

Für eine Abschätzung der oberen Grenzen der Materialflüsse wurde das Szenario MAXIMAL formuliert. Dabei gelten für den Gebäudebestand die gleichen Annahmen wie im Szenario KOMBINIERT, d. h. die Sanierungs- und Rückbauraten werden bis ins Jahre 2050 erhöht. Für die Infrastruktursysteme kommen neu die Voraussetzungen der Szenarien 3.1 und 3.3 dazu. Das bedeutet, dass die Erneuerungsraten der Infrastrukturen um 20 % angehoben wird (pauschal ab Beginn der Modellierung) und dass die Infrastruktursysteme bis ins Jahr 2050 um 20 % wachsen werden. Für den Input von RC-Materialien gelten die Annahmen der Szenarien 2.1 und 2.2, d.h. der RC-Input wird zusätzlich erhöht. Das Szenario verbindet damit das Wachstum und den starken Umbau des Gebäudebestandes mit dem Wachstum der Infrastruktursysteme. Es soll insbesondere als Vergleich für die Diskussion dienen. Die entsprechenden Parameter sind ebenfalls in der Tabelle 9 aufgeführt.

3 RESULTATE

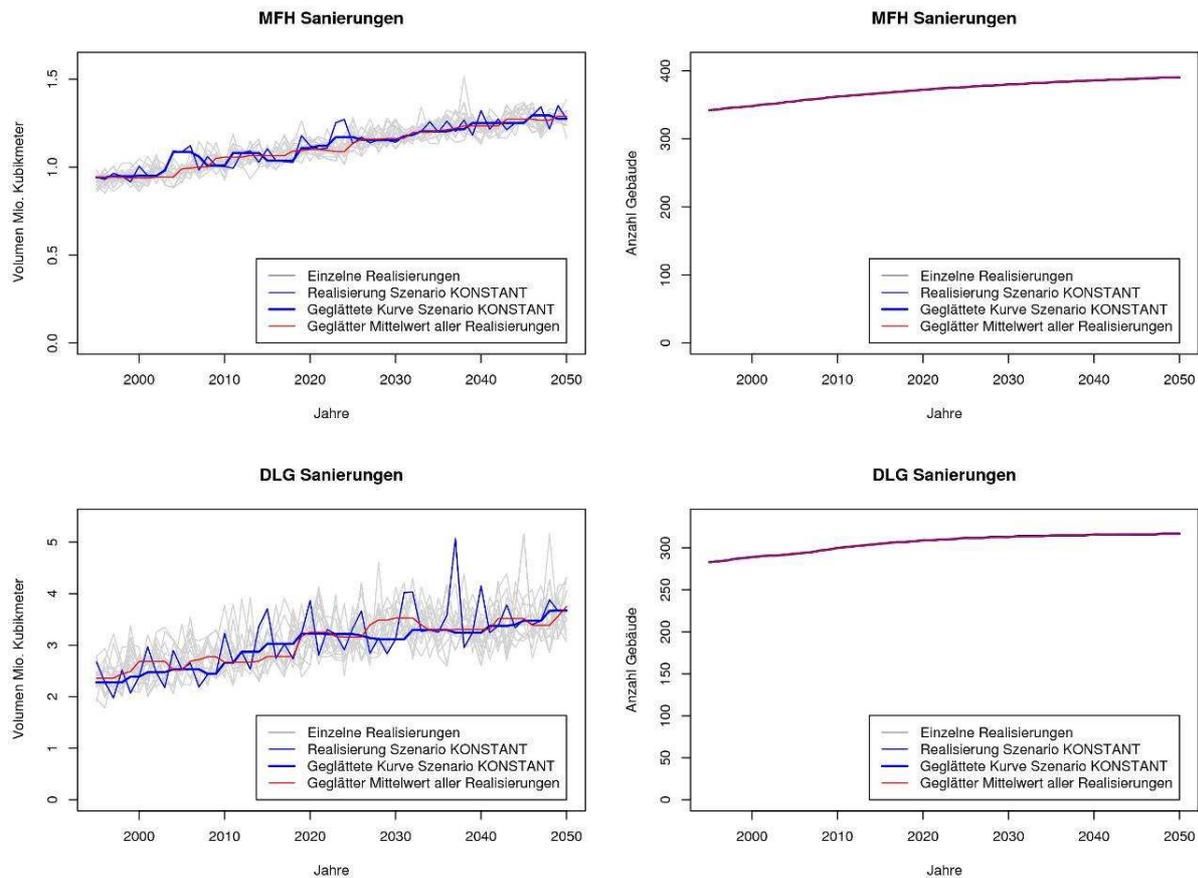
In den folgenden Abschnitten werden die Resultate der gerechneten Szenarien vorgestellt. Bevor auf die Ergebnisse der einzelnen Szenarien eingegangen wird, folgen die Resultate von je 100 Realisierungen des Gebäudebestandsmodells für das Szenario KONSTANT und das Szenario KOMBINIERT. Anschliessend wird das Szenario KONSTANT ausführlich dargestellt. Die weiteren Szenarien folgen mit dem direkten Vergleich zum Referenzszenario.

3.1 Resultate von 100 Realisierungen des Modells

Das Modell für den Gebäudebestand wurde so aufgebaut, dass für die Eingriffe in den Bestand (Sanierungen, Rückbauten) jeweils die Anzahl der möglichen Gebäude bestimmt wird. So bezieht sich die Sanierungsrate im Modell nicht auf das Gebäudevolumen, sondern wird als «Anzahl Gebäude, die in diesem Jahr saniert werden» interpretiert. Grundlage des Modells ist der Gebäudebestand der Stadt Zürich von 1994, welcher virtuell auf der Ebene Einzelgebäude fortgeschrieben wird. Wenn nun im Modell die Anzahl Gebäude festgelegt ist, die im entsprechenden Jahr zur Sanierung anstehen, so werden diese zufällig aus dem Bestand ausgewählt. Das hat zur Folge, dass das Gebäudevolumen, welches mit dieser Auswahl verbunden ist, stark schwanken kann, je nachdem, welche Gebäude aus dem Bestand für die Sanierung gewählt wurden.

Die Figur 20 zeigt dazu das Resultat von 100 verschiedenen Realisierungen des Modells für die Sanierungen von MFH (oben) und die DLG (unten). Dargestellt sind links das sanierte Gebäudevolumen und rechts die Anzahl der sanierten Gebäude. Grundlage für die verschiedenen Realisierungen sind immer die Startwerte des Szenarios KONSTANT. Sie unterscheiden sich nur in der (zufälligen) Wahl der zu sanierenden Gebäude. Die einzelnen Realisierungen (grau) unterscheiden sich auf Grund der zufällig gewählten Gebäude mit ihrem entsprechenden Volumen. Die blaue dünne Linie zeigt eine mögliche Realisierung, es ist diejenige, welche im weiteren als Szenario KONSTANT verwendet wird. Die dicke blaue Linie zeigt den geglätteten Verlauf dieses Szenarios. Der geglättete Mittelwert aller 100 Realisierungen ist rot eingetragen. Die geglättete blaue Kurve und der geglättete Mittelwert der 100 verschiedenen Realisierungen weichen nicht stark von einander ab.

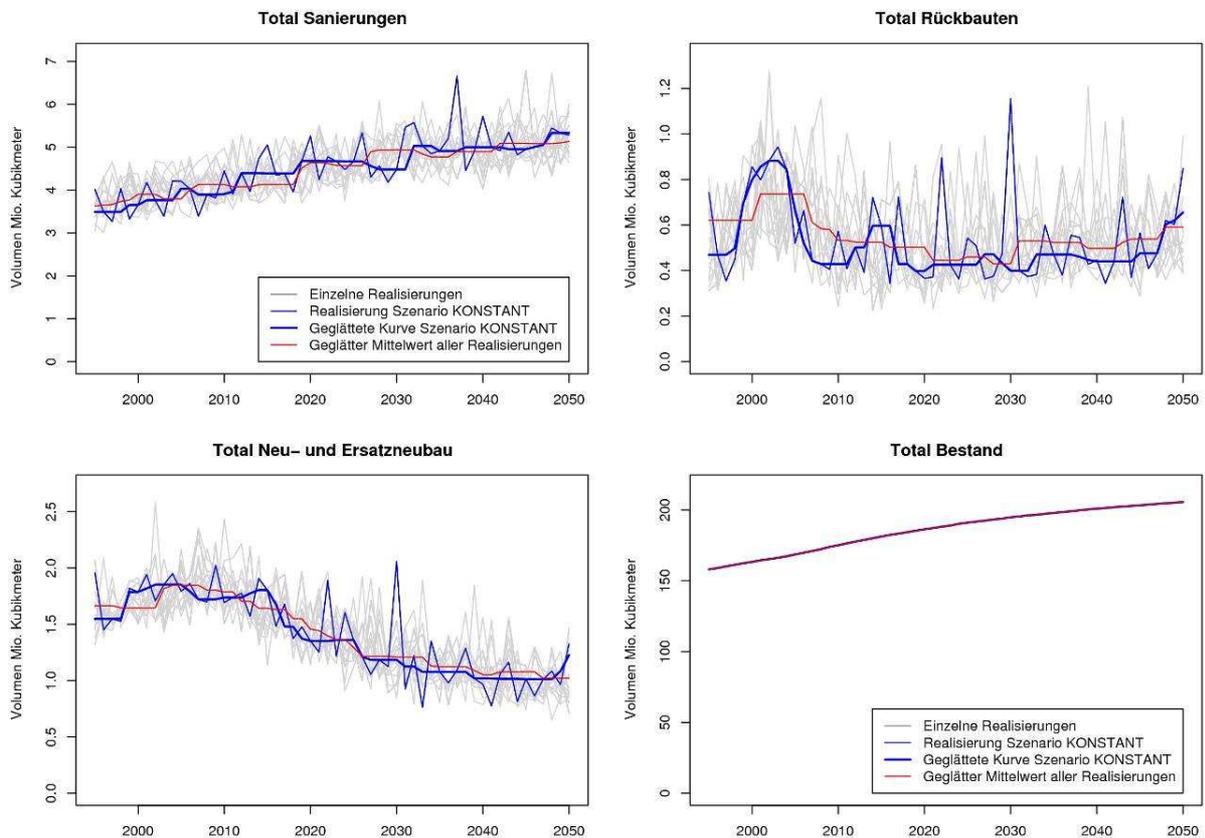
In der Figur ist deutlich zu erkennen, dass das Volumen der zu sanierenden Gebäude stark schwanken kann. Die Anzahl dieser Gebäude hingegen ist sowohl für die MFH wie auch für die DLG in allen Fällen nahezu identisch. Die Schwankungen beim Gebäudevolumen widerspiegeln damit die unterschiedlichen Gebäudegrössen, welche im Bestand der Stadt Zürich zu finden sind. Da die Berechnung der Materialflüsse pro Szenario rund zwei Stunden dauert und 10 Szenarien gerechnet werden, war es leider aus Zeitgründen nicht möglich, für jede der hier gezeigten Realisierungen auch die entsprechenden Materialflüsse zu berechnen. Für die Auswertung der Szenarien musste daher auf eine mögliche Realisierung zurückgegriffen werden, welche die entsprechenden Schwankungen zur Folge hat. Diesen Aspekt gilt es beim Interpretieren der Resultate zu berücksichtigen.



Figur 20 Das Resultat der zeitlichen Entwicklung von 100 Realisierungen des Modells für den Gebäudebestand für die Sanierungen von MFH und DLG. Links ist jeweils das *Volumen* der sanierten Gebäude aufgetragen, rechts die entsprechende *Anzahl*. Die Skalen sind in jeder Teilgrafik verschieden. Als Grundlage für diese Realisierungen dienen die Werte des Szenarios KONSTANT. Die im Weiteren verwendete Realisierung ist blau dargestellt (dünn: effektive Werte, dick: geglättete Kurve). Die rote Linie zeigt den geglätteten Mittelwert aller 100 Realisierungen.

In der Figur 21 ist für die gleichen 100 Realisierungen das Resultat des totalen Gebäudevolumens der Sanierungen, Rückbauten, Neu- und Ersatzneubauten und des Bestandes abgebildet. Die verwendeten Farben sind analog der vorangegangenen Figur eingesetzt. Auch hier zeigt sich der Einfluss der zufälligen Wahl der Gebäude. Die entsprechenden Grössen können von Jahr zu Jahr stark schwanken, je nach dem, ob zufällig eher kleine oder eher grosse Gebäude gewählt wurden.

Das totale Gebäudevolumen (unten rechts) hingegen ist in allen Realisierungen identisch. Das liegt daran, dass sich das Modell an der Nachfrage nach Gebäudevolumen orientiert. Diese Nachfrage basiert hauptsächlich auf Prognosen für die Bevölkerungs- und Beschäftigtenentwicklung und ihrem jeweiligen Flächenbedarf (Quadratmeter pro Person, Quadratmeter pro Beschäftigte) und wird in jedem Szenario als gegeben betrachtet und nicht verändert.

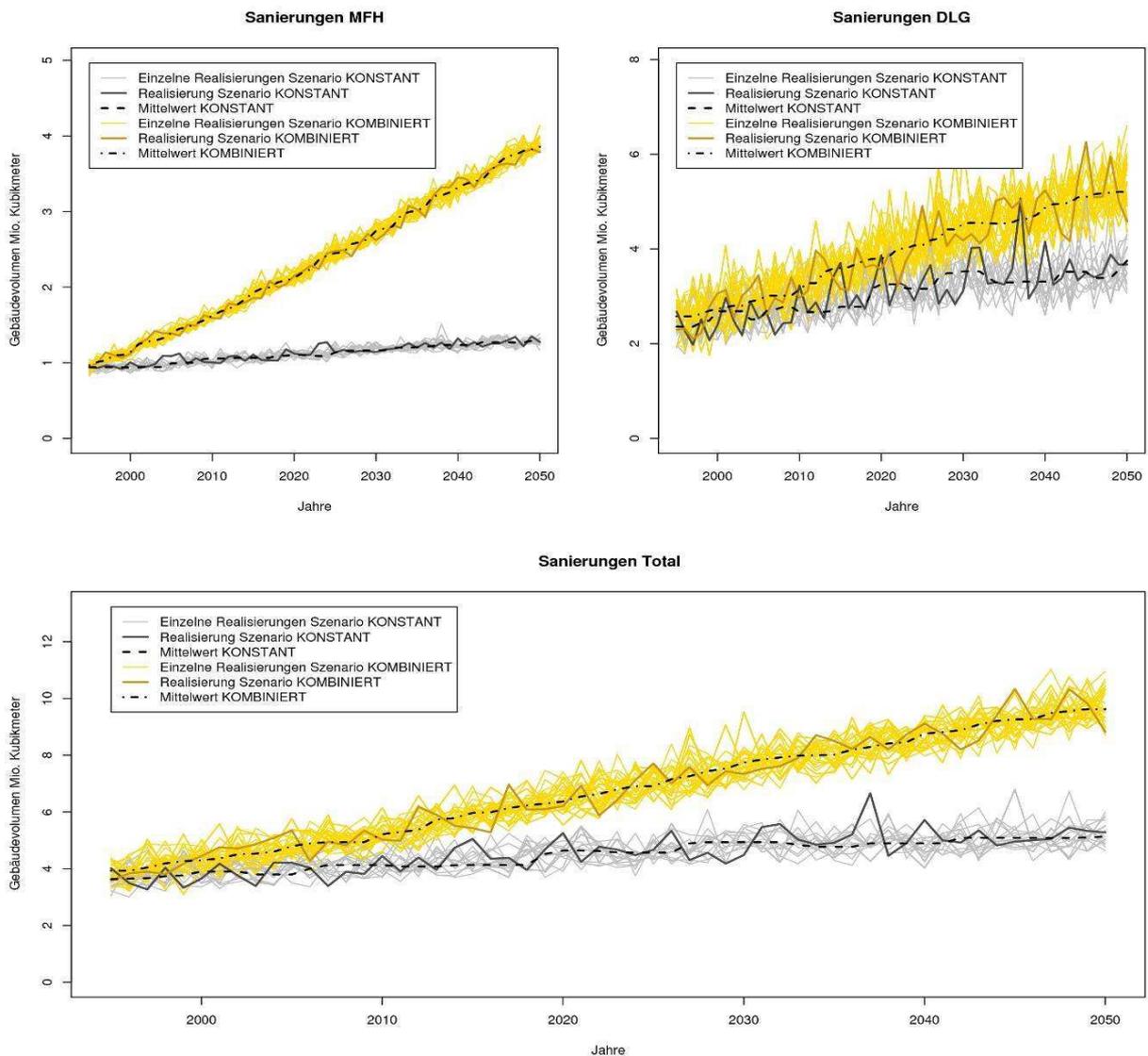


Figur 21 Das Resultat aus der zeitlichen Entwicklung von 100 Realisierungen des Modells für den Gebäudebestand und seine Veränderungen. Dargestellt ist das totale Gebäudevolumen der Sanierungen, der Rückbauten, der Neu- und Ersatzneubauten und der jeweilige Gebäudebestand. Auch hier ist gut zu sehen, dass das Gebäudevolumen bei den Eingriffen in Abhängigkeit der zufälligen Auswahl der Gebäude stark schwanken kann. Der gesamte Bestand hingegen erfüllt die Vorgabe an das Modell, dass dieser sich an der Entwicklung der Nachfrage nach Gebäudevolumen orientiert. Diese Nachfrage basiert hauptsächlich auf Prognosen der Bevölkerungs- und Beschäftigtenentwicklung.

Die Figur 21 zeigt schematisch die Methode des Modells. Die Anzahl Gebäude, welche gemäss dem Modell saniert oder zurückgebaut werden, wird entsprechend der Sanierungs- und Rückbaurrate zufällig aus dem Bestand ausgewählt. Die zurückgebauten Gebäude werden als Ersatzneubau wieder «neu gebaut». Anschliessend wird untersucht, ob der Bestand – das aktuelle Angebot – kleiner oder grösser als die Nachfrage ist. Wenn das Angebot kleiner als die Nachfrage ist, wird entsprechend mehr Gebäudevolumen neu gebaut. Im umgekehrten Fall wird 1/5 des Leerstandes ersatzlos zurückgebaut.

Es ist nun nicht von vornherein klar, ob sich die einzelnen Szenarien unterscheiden lassen, wenn die verschiedenen Realisierungen so stark von einander abweichen können. In der Figur 22 werden daher je 100 Realisierungen der zwei Szenarien KONSTANT (grau) und KOMBINIERT (gold) miteinander verglichen. Dargestellt sind die sanierten Gebäudevolumina für

die zwei Nutzungen MFH und DLG sowie das Total des sanierten Bestandes. Obwohl die Werte der einzelnen Realisierungen von Jahr zu Jahr stark schwanken, sind die Trends der verschiedenen Szenarien doch deutlich zu erkennen. Es wird nun auch sichtbar, dass die Vorgaben der Szenarien eingehalten werden. Die Sanierungen nehmen beim Szenario KOMBINIERT bis ins Jahr 2050 im Bereich «Wohnen» um das Dreifache, im Bereich «Nichtwohnen» um das Eineinhalbfache zu.



Figur 22 Der Vergleich der zeitlichen Entwicklung von je 100 Realisierungen der zwei Szenarien KONSTANT (grau) und KOMBINIERT (gold). Gezeigt sind hier die Resultate der Sanierungen (Gebäudevolumen), oben links MFH, oben rechts DLG und unten das Total des gesamten Bestandes. Obwohl die einzelnen Werte von Jahr zu Jahr stark schwanken, sind die Trends der zwei verschiedenen Szenarien deutlich zu unterscheiden.

3.2 Das Szenario KONSTANT, Startwerte und Referenz

3.2.1 Entwicklung des Gebäudebestandes

Auf Grundlage der Vorgaben des Modells wird sich der Gebäudebestand der Stadt Zürich im betrachteten Zeitraum zwischen 1995 bis 2050 von 156 Mio. Kubikmeter auf 205 Mio. Kubikmeter erhöhen (Figur 23). Diese Entwicklung gilt für alle Szenarien, da sich das Modell an der Nachfrage nach Energiebezugsfläche (EBF) der Bewohner und der Beschäftigten orientiert.

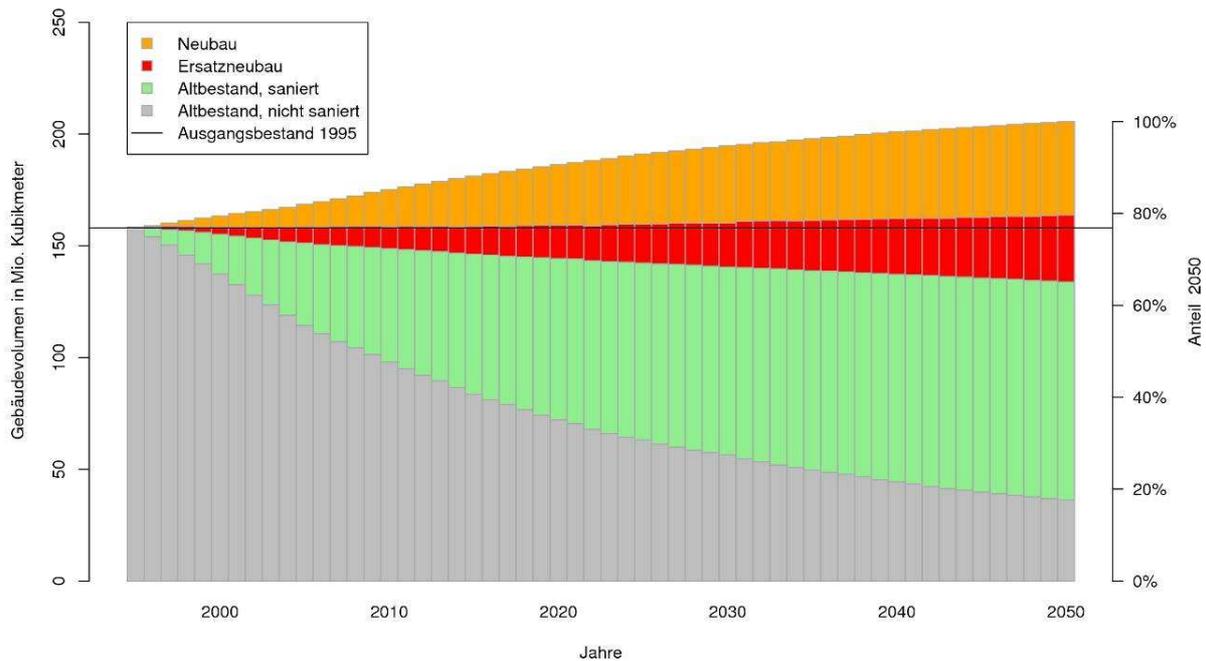
Im Szenario KONSTANT sind die Sanierungs- und Rückbauraten auf dem Stand von 2000–2005 festgehalten. Die Figur 23 zeigt, wie sich der Altbestand von 1995 (grau und ausgezogene Linie) mit der Zeit verändert. Die grün eingefärbten Balken entsprechen dem sanierten Anteil des Gebäudeparks, rot steht für die Ersatzneubauten. Orange sind die effektiven Neubauten, welche zum Bestand hinzukommen. Von der Bauweise her unterscheiden sich Ersatzneubauten und Neubauten nicht, sie sind beide Neubauten mit der entsprechenden Bauweise des Erstellungsjahres.

Der Bestand wird durch die Sanierungen rascher verändert als durch Ersatzneubauten. Der Grund dafür sind die im Vergleich zu den Rückbauraten rund 10 mal höheren Sanierungsraten (vgl. Figur 18). Ein Gebäude erhält nach dem Neubau und nach erfolgter Sanierung eine «Schonfrist», bevor es erneut saniert oder zurückgebaut werden kann. Ein Rückbau eines sanierten Gebäudes innerhalb der «Schonfrist» wird dadurch ausgeschlossen.

Wie zu sehen ist, wird der nicht-sanierte Altbestand im Jahr 2050 immer noch knapp 20 % des Ausgangsbestandes ausmachen. Der Anteil an Neu- und Ersatzneubauten (Baujahr nach 1995) wird im Jahr 2050 rund 35 % des Bestandes ausmachen. Rund 45 % des Bestandes von 2050 werden Gebäude sein, welche vor 1995 erstellt, aber in der Zeit ab 1995 mindestens einmal saniert wurden.

Für die Energieszenarien ist es von grossem Interesse, wie sich die drei Klassen konventionell, Minergie und Minergie-P innerhalb des Bestandes verteilen. Von dieser Verteilung wird der Energieverbrauch für die Raumwärme des Gebäudebestandes abhängen. Die Figur 24 zeigt dazu die detaillierte Darstellung von Altbestand, Sanierungen, Neu- und Ersatzneubau, jeweils differenziert nach der Bauweisen konventionell, Minergie und Minergie-P. Zusätzlich sind die denkmalgeschützten und denkmalinventarisierten Gebäude aufgetragen (hier zusammengefasst unter «Denkmalgeschützt», blau).

Die rötlichen Farben stehen für Neu- und Ersatzneubauten ab 1995. Sie sind in dieser Darstellung zusammengefasst. Grün steht für die sanierten Gebäude des Altbestandes ab 1995. Blau sind die denkmalgeschützten Gebäude eingefärbt, wobei die sanierten, denkmalgeschützten Gebäudebestandsanteile dunkelblau gefärbt sind. Der Altbestand mit Bau- und Sanierungsjahr vor 1995 ist wiederum grau eingefärbt.

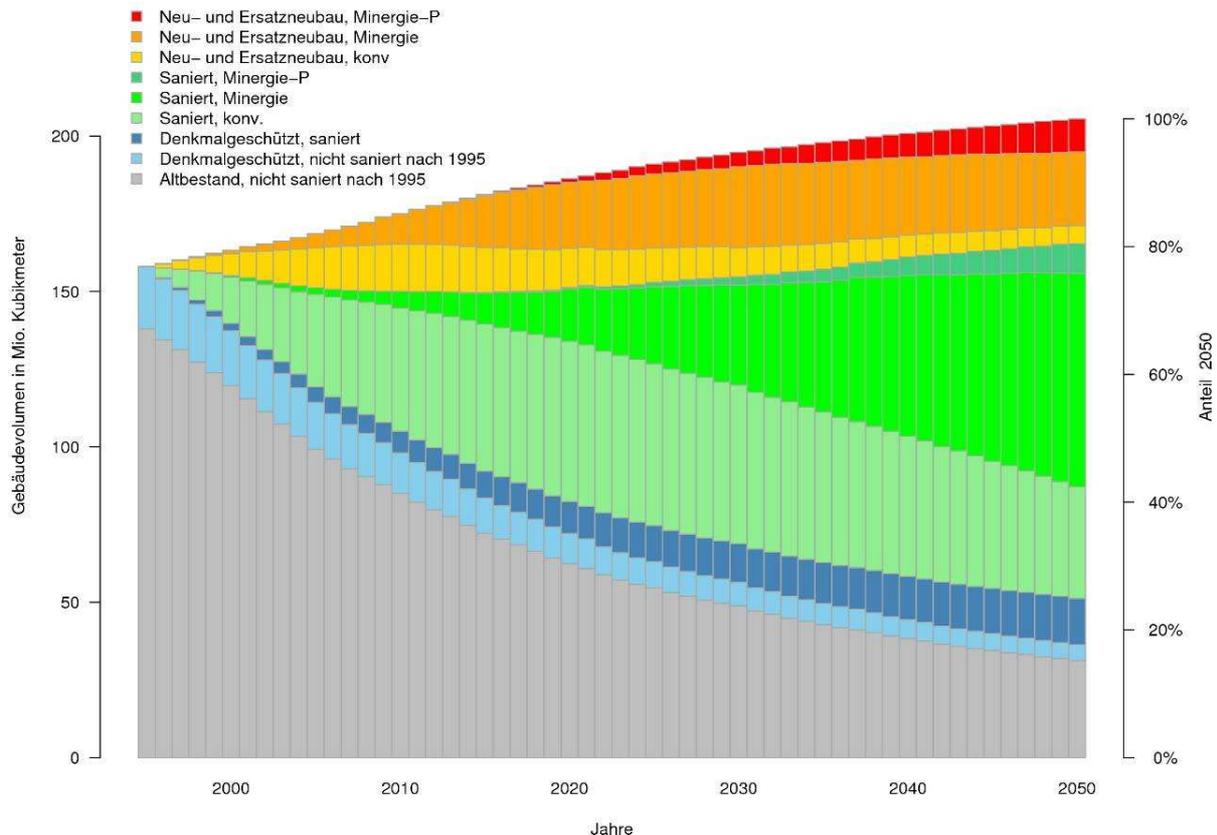


Figur 23 Die Entwicklung des Gebäudevolumens in der Stadt Zürich und seine Veränderung von 1995–2050 im Szenario KONSTANT. Grau: nicht sanierter Altbestand. Grün: nach 1995 sanierte Gebäude. Rot: Ersatzneubauten mit Baujahr nach 1995. Orange: Neubauten mit Baujahr nach 1995.

Es ist nun interessant zu sehen, dass die Neu- und Ersatzneubauten im Jahr 2050 vorwiegend Minergie- und Minergie-P-Standard aufweisen werden. Dahinter steht unter anderem die Annahme, dass bereits im Jahr 2015 die konventionellen Neubauten ebenfalls Minergie-Standard haben werden. Für die energetische Betrachtung heisst das, dass die Neu- und Ersatzneubauten im Jahr 2050 relativ tiefe Energiewerte haben werden und bezüglich energetischen Betrachtungen keine grossen Probleme darstellen sollten.

Der grösste Teil des Bestandes im Jahr 2050 werden Gebäude sein, welche nach deren Bau bereits mindestens eine Sanierung erlebt haben. Ihr Anteil umfasst in der Figur von oben nach unten die Farben dunkelgrün bis und mit dunkelblau. Das entspricht rund 60 % des Bestandes. Dieser Wert weicht von der Feststellung weiter oben ab. Dort wurde gezeigt, dass die sanierten Gebäude einen Anteil von 45 % des Gesamtbestandes aufweisen. Die Angabe oben bezieht sich auf den Altbestand von 1995. Der Wert hier von 60 % bezieht sich hingegen auf den gesamten Bestand im Jahr 2050 und schliesst auch die neuen Gebäude mit Baujahr nach 1995 ein. Diese haben also in der Zeit nach 1995 zum Teil auch bereits eine Sanierung erlebt.

Für die denkmalgeschützten Gebäude wurde angenommen, dass sie die gleichen Sanierungsraten haben wie der restliche Bestand. Sie können aber nur konventionell saniert werden und bleiben nach Definition stehen, d.h. deren Rückbaurate ist Null.



Figur 24 Szenario KONSTANT: Eine detailliertere Analyse der zeitlichen Veränderung des Gebäudevolumens bezüglich des Energiestandards konventionell, Minergie und Minergie-P. Wie in der Figur 23 ist das Volumen des Altbestandes, der sanierten und neugebauten Gebäude abgebildet. Zusätzlich finden sich die denkmalgeschützten Gebäude (blau).

3.2.2 Die Entwicklung der Infrastruktursysteme

Die Dimensionen der Infrastruktursysteme sind für das Modell identisch aus der Phase I des Projektes übernommen worden, sie sind im Abschnitt 2.5 dargestellt. Für weitere Ausführungen wird auf den Bericht der Phase I verwiesen, dort sind die Resultate für die Infrastruktur ausführlich beschrieben [Schneider, Rubli 2007, S. 32 ff].

Für das Referenzszenario KONSTANT und die weiteren Szenarien SANIEREN, ERSETZTEN und KOMBINIERT wurden die Infrastruktursysteme auf dem Stand von 2005 konstant belassen. Das heisst, sie wachsen nicht weiter. Ebenfalls wurden die Erneuerungsraten konstant auf den Werten des Jahres 2005 belassen. Die bedeutet, dass der Input und Output der Infrastruktursysteme in diesen Szenarien gleich gross sind und die gleiche Zusammensetzung der Materialien aufweisen, da effektiv nur erneuert wird, aber nicht neu gebaut.

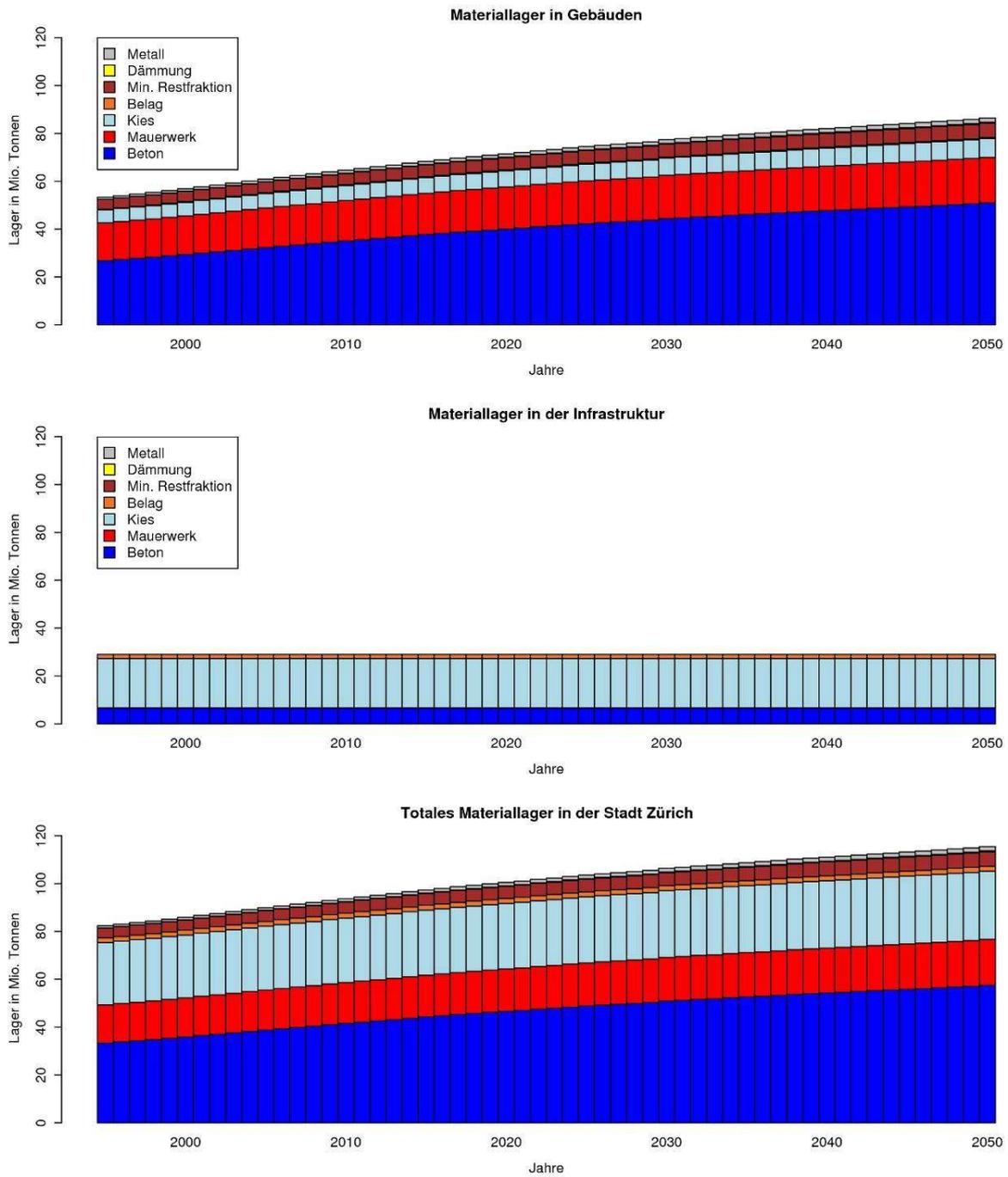
3.2.3 Entwicklung der Materiallager

In der Figur 25 ist die Entwicklung der Materiallager in der Stadt Zürich für die Jahre 1995–2050 für das Szenario KONSTANT abgebildet. Im oberen Teil der Figur ist die Entwicklung der Lager im Gebäudebestand dargestellt, in der Mitte die Entwicklung der Lager in den Infrastruktursystemen und unten das totale Lager im System Stadt Zürich. Die Zunahme des Materiallagers beruht hauptsächlich auf der Zunahme des Betons in den Gebäuden. Die Materiallager in der Infrastruktur bleiben konstant. Das totale Lager wird sich von 82 Mio. Tonnen auf über 115 Mio. Tonnen vergrössern. Die Werte der einzelnen Materiallager sind in der Tabelle 21 im Anhang aufgeführt. Dargestellt sind alle Materialien, welche berücksichtigt wurden. Dies sind die mineralischen Baustoffe Beton, Mauerwerk, Kies/Sand, Belag, mineralische Restfraktion (Gips, Glas, Keramik etc), die verschiedenen Wärme-Dämmmaterialien sowie die Metalle.

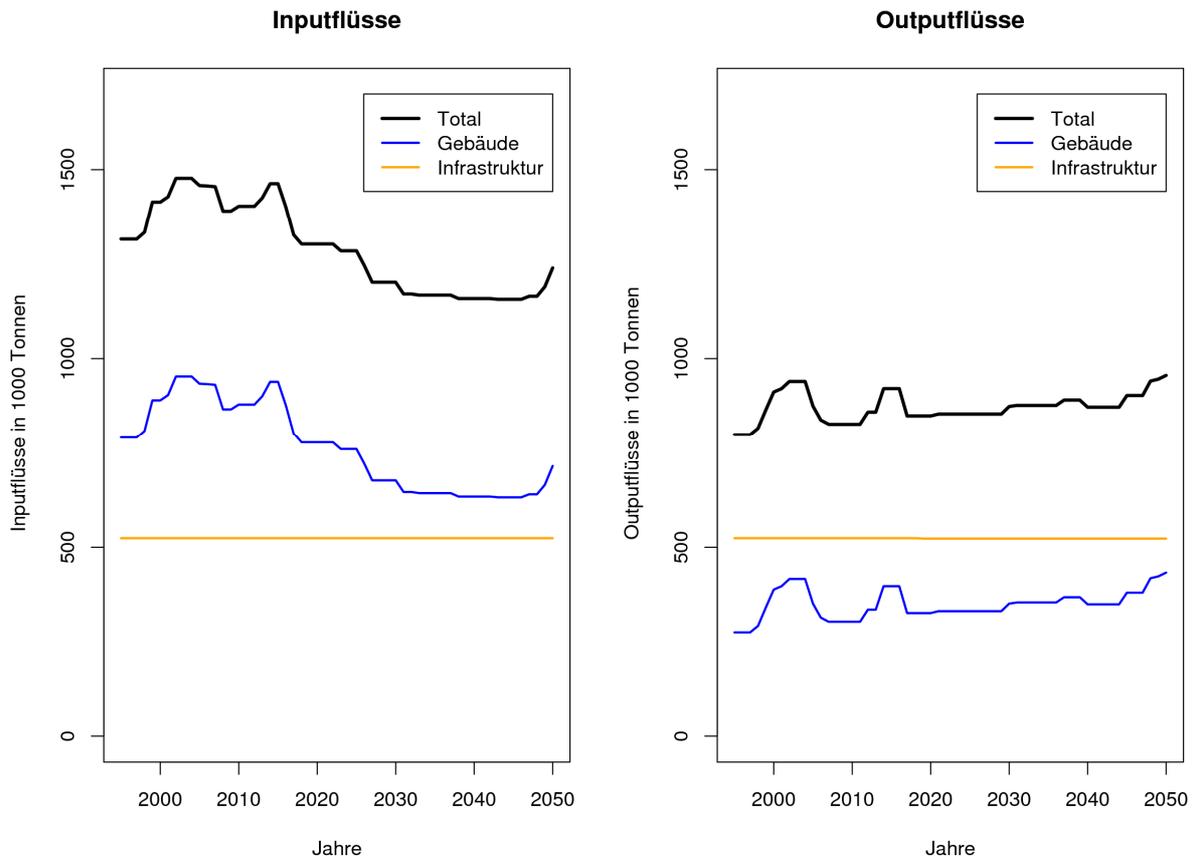
3.2.4 Materialflüsse: Input und Output

Wie im Abschnitt 3.1 dargestellt, werden die Materialflüsse aus einer möglichen Realisierung des Modells für die Entwicklung des Gebäudebestandes berechnet. Die kurzfristigen Schwankungen der Materialflüsse sind daher auf die Auswahl der im Modell in diesem Jahr sanierten und zurückgebauten Gebäude zurückzuführen. Die Trends bei den Input- und Outputflüssen sind dennoch klar zu erkennen. Der totale Input in den Gebäudepark im Szenario KONSTANT wird tendenziell abnehmen, weil sich das Wachstum des Gebäudeparks abschwächt. Der Outputfluss wird hingegen zunehmen, da der Bestand absolut zunimmt und daher die Anzahl Sanierungen und Rückbauten bei konstanten Raten in absoluten Werten ebenfalls zunehmen.

Die Figur 26 zeigt die berechneten Inputflüsse (links) und Outputflüsse (rechts) für den betrachteten Zeitraum für das System Stadt Zürich. Nach einer Wachstumsphase der Gebäude ab 1995 stabilisieren sich deren Inputflüsse bis ca. 2015 auf fast 1 Mio. Tonnen pro Jahr und fallen anschliessend bis 2050 auf ca. 0.6 Mio. Tonnen ab. Der Output aus den Gebäuden nimmt auch nach 2015 weiterhin leicht zu, da der Bestand wie bereits beschrieben zunimmt. Die Input- und Outputflüsse der Infrastrukturen bleiben gleich gross, da es sich dort um reine Erneuerung ohne Wachstum handelt. Über den betrachteten Zeitraum bleiben die totalen Inputflüsse grösser als die totalen Outputflüsse. Das bedeutet, dass sich das Lagerwachstum fortsetzt.

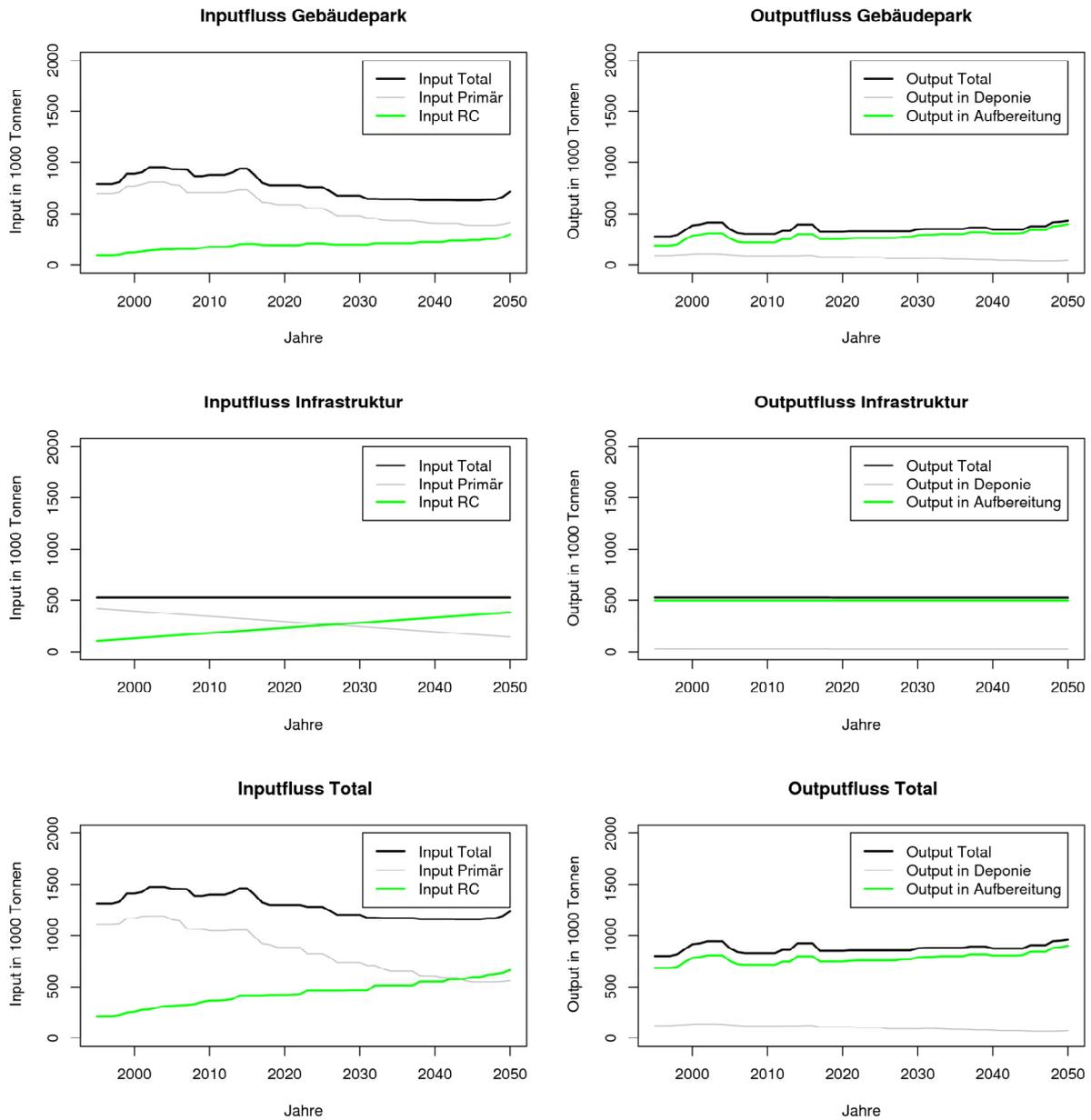


Figur 25 Zeitliche Entwicklung der Materiallager in der Stadt Zürich (oben: Gebäude, mitte: Infrastruktur, unten: Total) im Szenario KONSTANT. Der Beton in den Gebäuden dominiert das Wachstum des Materiallagers. Insgesamt wird das Lager der mineralischen Baustoffe in der Stadt Zürich von 80 Mio. Tonnen (1995) auf über 115 Mio. Tonnen im Jahr 2050 zunehmen.



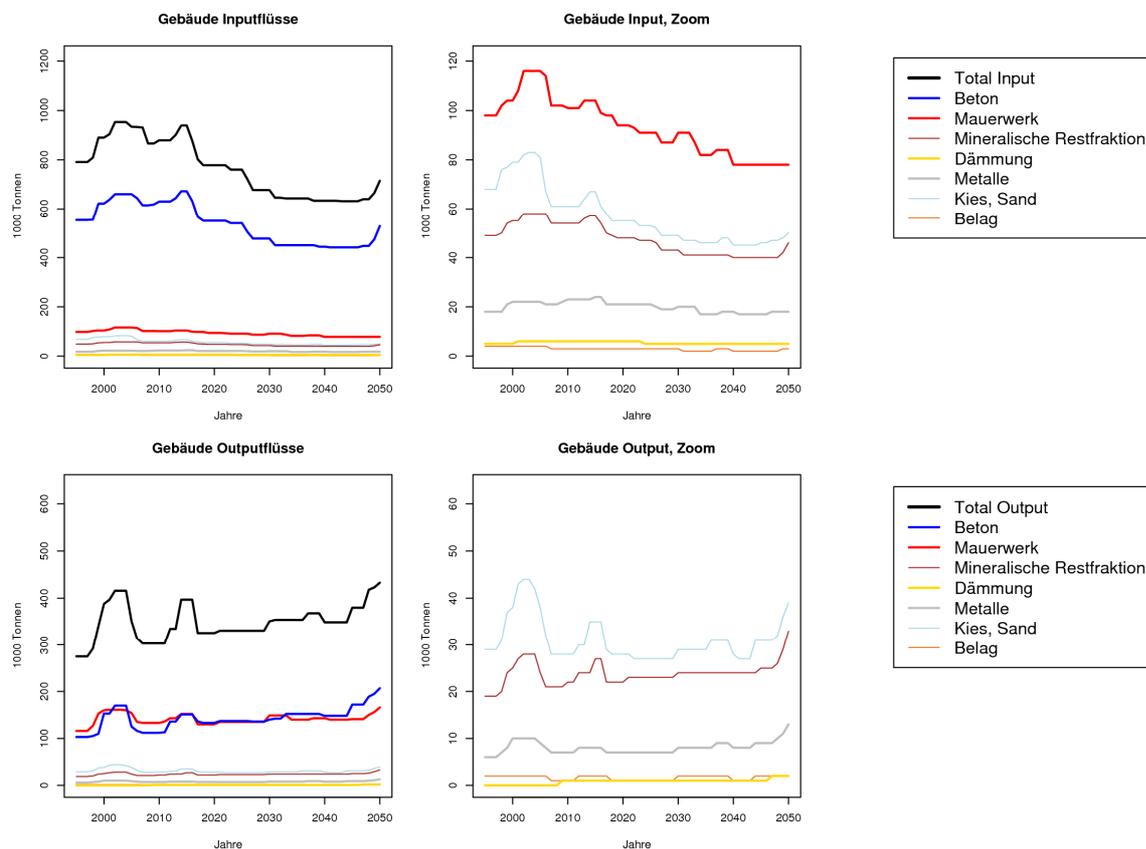
Figur 26 Die zeitliche Entwicklung der Input- und Outputflüsse für das Szenario KONSTANT in 1000 Tonnen/Jahr. Der Inputfluss in das System Stadt Zürich nimmt tendenziell ab, da sich das Gebäudewachstum bis 2050 abschwächt. Der Outputfluss hingegen nimmt zu, da der Bestand weiterhin zunimmt und damit bei konstanten Rückbau- und Sanierungsraten auf absoluter Basis mehr Lager abgebaut wird.

In der Figur 27 sind die Materialflüsse zusätzlich auf Primär- und Recycling-(RC-)Baustoffe (Input, links) und auf Aufbereitung/Deponie (Output, rechts) aufgeteilt. Damit wird erkennbar, dass der Anteil von RC-Material im Input weiter ansteigen und der Anteil von Rückbaumaterialien, welche deponiert werden, wird weiter sinken wird. Erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums nähert sich der Input von RC-Material (links, grün) dem Output der Materialien, die in die Aufbereitung fließen (rechts, grün), an. Er erreicht ihn aber nicht ganz. Es besteht somit für die ganze Dauer der modellierten Zeit grundsätzlich die Möglichkeit, alle anfallenden Rückbaustoffe innerhalb des Systems Stadt Zürich einzusetzen. Aber dieses Potential wird nicht vollständig ausgenutzt, der Anteil von RC-Baustoffen, welcher in der Stadt Zürich eingesetzt wird, müsste erhöht werden.



Figur 27 Die zeitliche Entwicklung der Input- und Outputflüsse des Gebäudeparks, der Infrastruktursysteme und die totalen Flüsse im Szenario KONSTANT. Der Inputfluss ist dabei aufgeteilt auf Primär- und Recycling-(RC)-Baustoffe. Beim Outputfluss erfolgt die Aufteilung auf die zwei Entsorgungswege Deponie und Aufbereitung. Das total der Materialflüsse, welche in die Aufbereitung gelangen (unten rechts, grün) bleibt immer höher als die eingesetzten RC-Baustoffe (unten links, grün). Das Potential des Einsatzes von RC-Baustoffen, welche aus der Stadt Zürich stammen, wird nicht vollständig ausgeschöpft.

Im Modell werden alle Materialfraktionen einzeln berechnet. Diese können daher auch grafisch dargestellt werden, wie dies in der Figur 28 für die Gebäude dargestellt ist. Dabei stehen oben die Inputflüsse und unten der entsprechende Output und zwar jeweils nach den einzelnen Baustoffen und Materialien. Rechts ist die Skala jeweils auf 10 % reduziert, um den Verlauf der «marginalen» Materialien zu zeigen. Interessant sind die Outputflüsse von Beton und Mauerwerk, welche fast gleich gross sind, obwohl das Lager von Beton fast doppelt so gross ist, wie das Lager von Mauerwerk. Was bei der Lagerbetrachtung nicht ersichtlich ist, ist die Altersverteilung der Materialien. Früher wurden die Gebäude mit einem viel grösseren Mauerwerksanteil gebaut als heute. Daher fällt beim Rückbau von Gebäuden ein grosser Anteil Mischabbruch (d.h. Mauerwerk und Beton gemischt) an. Das Verhältnis von Beton und Mauerwerk im Output bleibt daher lange annähernd konstant.

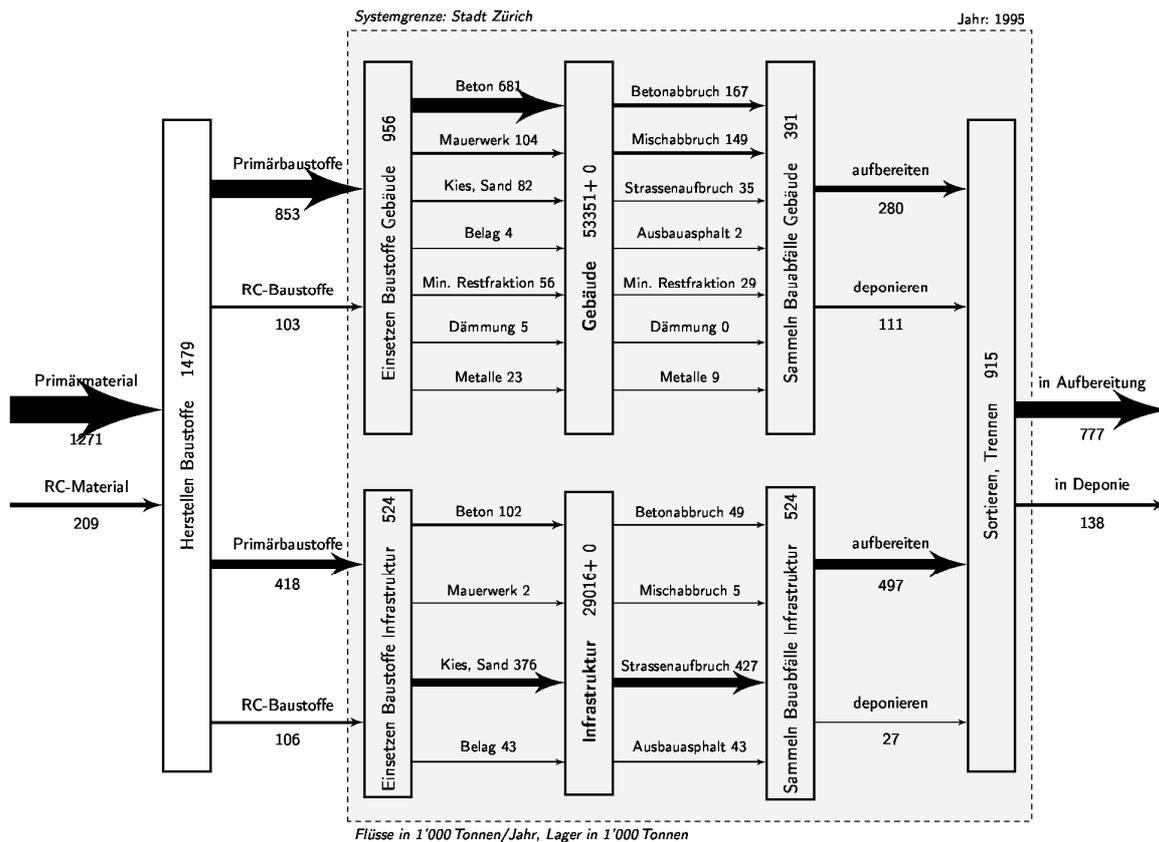


Figur 28 Szenario KONSTANT: Zeitlichen Entwicklung der Inputflüsse (oben) und Outputflüsse (unten) in den und aus dem Gebäudepark nach einzelnen Materialien. In den Abbildungen rechts ist die Skala jeweils auf 10 % reduziert, um den Verlauf der «marginalen» Materialflüsse zu zeigen.

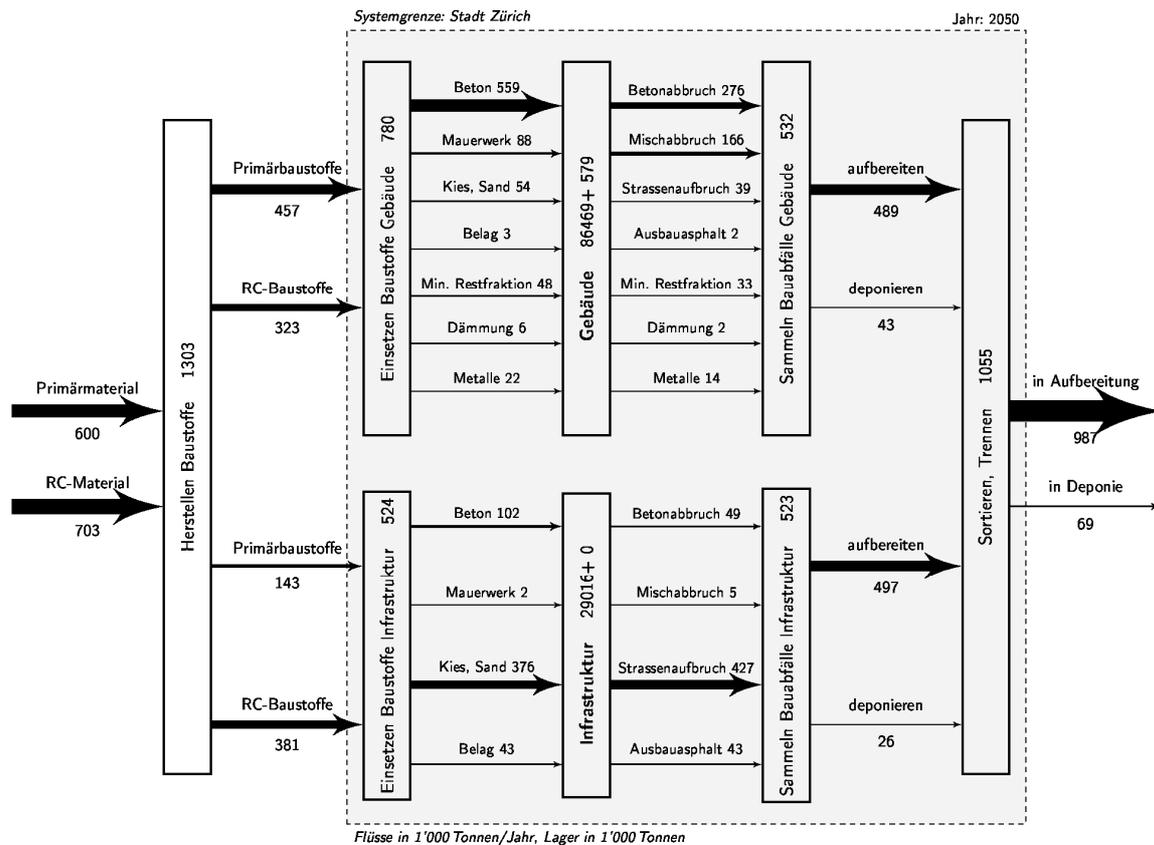
3.2.5 Das System Stadt Zürich 1995 und 2050

Nun ist es möglich, die sämtlichen Materiallager und -flüsse in das Gesamtsystem Stadt Zürich einzutragen. Dieses System wurde bereits im Methodenteil vorgestellt (Abschnitt 2.1). Es zeigt den Input der einzelnen Materialfraktionen in den Gebäudepark und die Infrastruktursystemen (von links) und den Output der Rückbaumaterialien, welche in die Aufbereitung oder die Deponie fließen (nach rechts). In der Stadt Zürich befinden sich keine Anlagen für die Herstellung von Primär- und RC-Komponenten, daher stammt der gesamte Input aus dem Umland und der totale Output wird wieder im Umland verarbeitet oder deponiert.

Die Figur 29 zeigt dazu das Resultat für den Beginn der modellierten Zeit, d.h. für das Jahr 1995. In der Figur 30 ist das System Stadt Zürich im Jahr 2050, dem Ende der Modellierung dargestellt. Das Lager steigt von 53 Mio. Tonnen im Jahr 1995 auf über 84 Mio. Tonnen 2050. Das Wachstum der Materiallager im Gebäudebestand beträgt für den betrachteten Zeitraum demnach rund 30 Mio. Tonnen. Nach der Vorgabe für das Szenario KONSTANT bleiben die Längen der Infrastruktursysteme konstant. Daher bleiben ihre Lager und ihre jährlichen Input- und Outputflüsse ebenfalls konstant. Was sich aber auch bei der Infrastruktur ändert, ist der Anteil von RC-Baustoffen im Input, der nimmt ebenfalls zu.



Figur 29 Das System Stadt Zürich im Jahr 1995, dem Beginn der Modellierung für alle Szenarien. Der Input besteht zum grössten Teil aus Baustoffen primärer Herkunft.



Figur 30 Das System Stadt Zürich im Jahr 2050 für das Szenario KONSTANT, dem Ende des betrachteten Zeitraums. Es werden mehr Rückbaumaterialien aufbereitet und deutlich mehr RC-Baustoffe eingesetzt.

Die offensichtlichste Änderung zwischen Start und Ende ist der Anteil von RC-Baustoffen bei den Inputflüssen in das System. Dieser Anteil steigt von knapp 15 % auf über 50 % im Jahr 2050. Gleichzeitig sinkt der Anteil der Materialien, die deponiert werden.

In der Figur 30 ist zudem zu erkennen, dass der Outputfluss aus der Aufbereitung unter den vorgegebenen Bedingungen auch im Jahr 2050 höher ist als der Inputfluss an RC-Material in die Stadt Zürich. Dies bedeutet, dass unter den gewählten Annahmen nicht sämtliches RC-Material wieder in der Stadt Zürich eingesetzt wird. Grundsätzlich besteht aber die Möglichkeit, im Hochbau noch mehr Primärmaterial durch RC-Material zu ersetzen, so dass theoretisch die Bilanz ausgeglichen gestaltet werden könnte.

3.3 Resultate der Szenarien SANIEREN, ERSETZEN, KOMBINIERT

Das bisher vorgestellte Szenario KONSTANT dient für die weiteren Betrachtungen als Referenzszenario. Da davon auszugehen ist, dass sich die Rückbau- und Sanierungsraten des Gebäudebestandes verändern werden, wurden die drei Szenarien SANIEREN (Erhöhung der Sanierungsrate bis ins Jahr 2050), ERSETZEN (Rückbaurrate erhöht) und KOMBINIERT (beide Raten werden bis 2050 erhöht) gerechnet. Das Total des Gebäudevolumens weist in allen Szenarien das gleiche Wachstum auf. Dies ist eine Voraussetzung des Modells, in dem die Nachfrage nach Gebäudevolumen für alle Szenarien gleich hoch sein muss. Was sich ändert, ist die Verteilung zwischen saniertem Altbestand, Ersatzneubauten und den Neubauten. Die Figur 31 zeigt die jeweilige Entwicklung der Szenarien. Links oben KONSTANT (entspricht der Figur 23), rechts oben SANIEREN, links unten ERSETZEN, rechts unten KOMBINIERT.

Im Szenario SANIEREN bleiben die Anteile von Neubau (gold) und Ersatzneubau (rot) annähernd gleich gross wie in Szenario KONSTANT. Eine deutliche Änderung ist aber bei den sanierten Gebäuden festzustellen, deren Anteile im Vergleich zum Szenario KONSTANT stark zunehmen (grün). Im Jahr 2050 werden nach diesem Szenario weniger als 10 % der Gebäude nicht saniert oder ersetzt worden sein (grau).

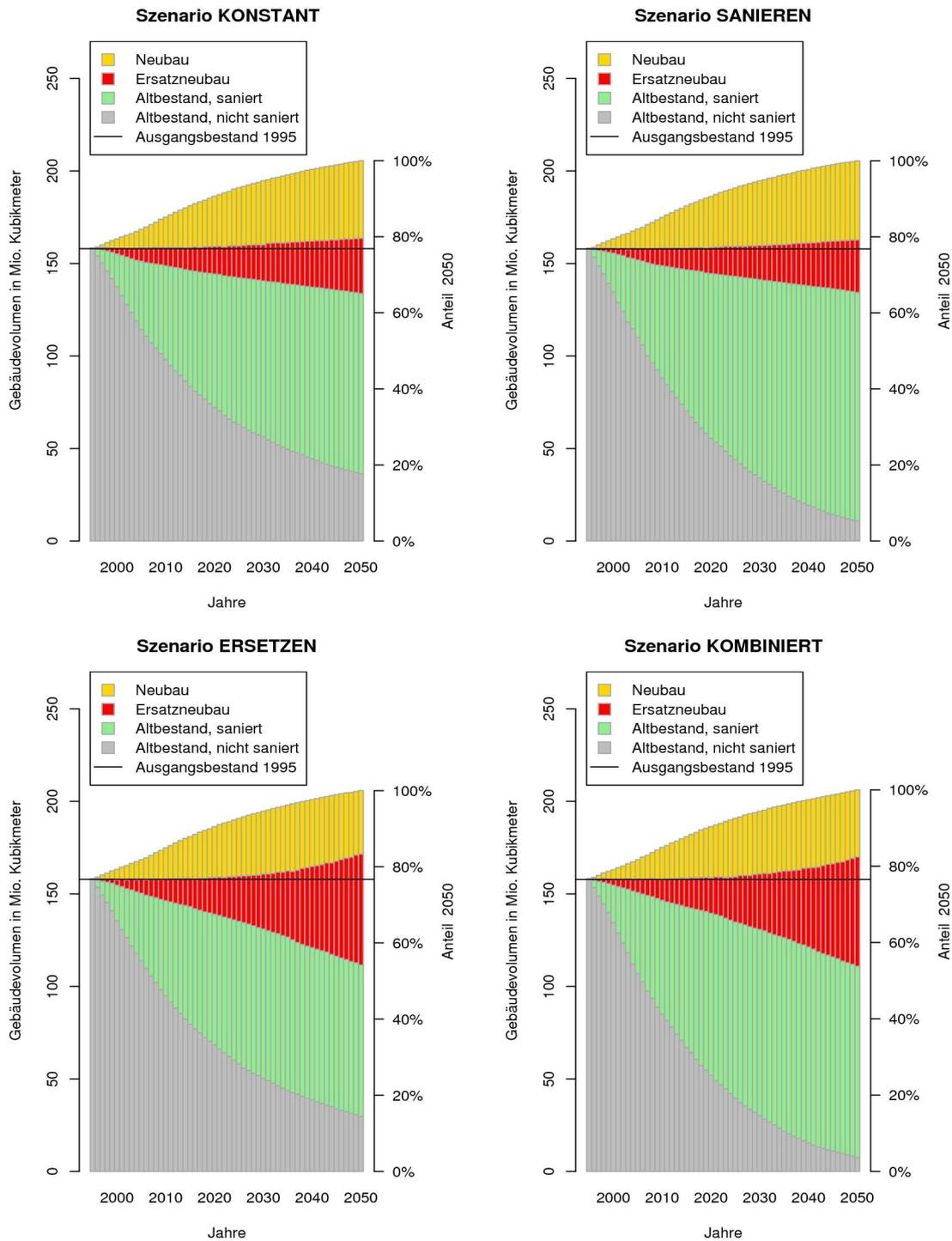
Wird die Rückbaurrate erhöht (Szenario ERSETZEN), so bewirkt dies eine Zunahme von Ersatzneubauten. Die Sanierungsrate hingegen bleibt im diesem Szenario konstant. Da die Rückbaurrate rund 10-mal kleiner ist als die Sanierungsrate (vgl. Tabelle 6) bewirkt dieses Szenario eine geringere Veränderung des Bestandes. Wohl nehmen die Ersatzneubauten im Vergleich zum Szenario KONSTANT zu, der Anteil der Gebäude, die bis ins Jahr 2050 keinen Eingriff erfahren, bleibt aber mit über 15 % relativ hoch.

Am wirkungsvollsten für eine rasche Veränderung des Bestandes ist daher das Szenario KOMBINIERT, welches eine erhöhte Sanierungs- und Rückbaurrate annimmt. Einerseits werden mehr Gebäude ersetzt und gleichzeitig auch mehr saniert. Damit wird der Anteil des Altbestandes, welcher weder saniert noch rückgebaut wurde auf unter 5 % sinken.

3.3.1 Veränderung der Bauweise

Der Umbaugeschwindigkeit im Bestand verläuft in Abhängigkeit des gewählten Szenarios verschieden. Gleiches gilt für die Verteilung der Bauweisen (konventionell, Minergie und Minergie-P) bei den drei Szenarien.

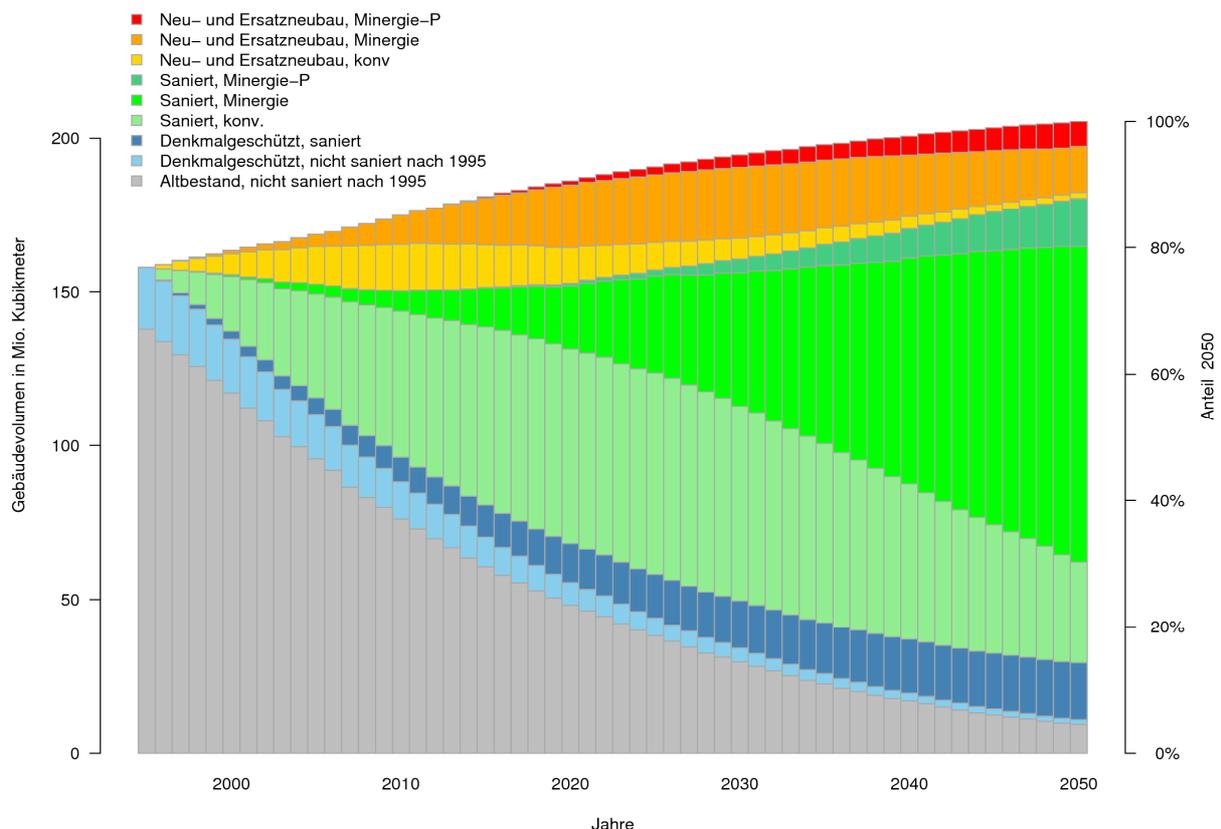
Die Veränderung des Gebäudebestandes verläuft schnell in den Szenarien SANIEREN und KOMBINIERT, langsam in den Szenarien KONSTANT und ERSETZEN. Wie bereits in der Beschreibung der Figur 24 erwähnt wurde, ist der Anteil an konventionell gebauten Häusern mit Baujahr ab 1995 im Jahr 2050 nur noch gering. Die meisten Neubauten ab 1995 weisen Minergie oder sogar Minergie-P-Standard auf. Diese Aussage gilt für alle drei Szenarien. Hingegen ist der Unterschied der sanierten Gebäude zwischen den Szenarien gross. Wenn die Sanierungsraten im Szenario SANIEREN bis ins Jahr 2050 verdreifacht («Wohnen») bzw. auf den 1.5-fachen Wert angehoben wird («Nichtwohnen»), dann wird der Altbestand mit Bau- und Sanierungsjahr vor 1995 rascher saniert als in den Szenarien KONSTANT und ERSETZEN.



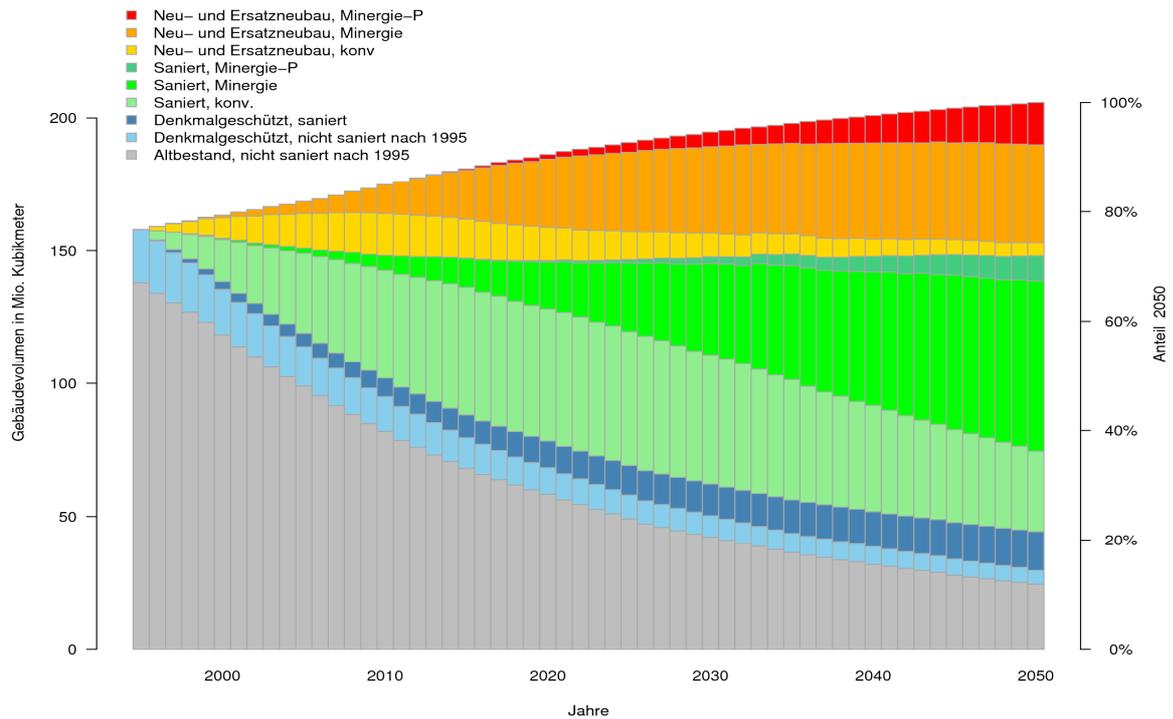
Figur 31 Der Vergleich der Entwicklung der Zusammensetzung des Bestandes der vier Szenarien: oben links KONSTANT, oben rechts SANIEREN, unten links ERSETZEN, unten rechts KOMBINIERT. Am wirkungsvollsten ist das Szenario KOMBINIERT.

Umgekehrt bewirkt die Erhöhung der Rückbauraten (ERSETZEN) um den Faktor 4 («Wohnen») bzw. 3 («Nichtwohnen») einen verstärkten Anteil von Ersatzneubauten. Damit wird aber der Altbestand auf dem Niveau des Szenarios KONSTANT saniert, da die Sanierungsraten nicht verändert werden, was entsprechend langsam verläuft.

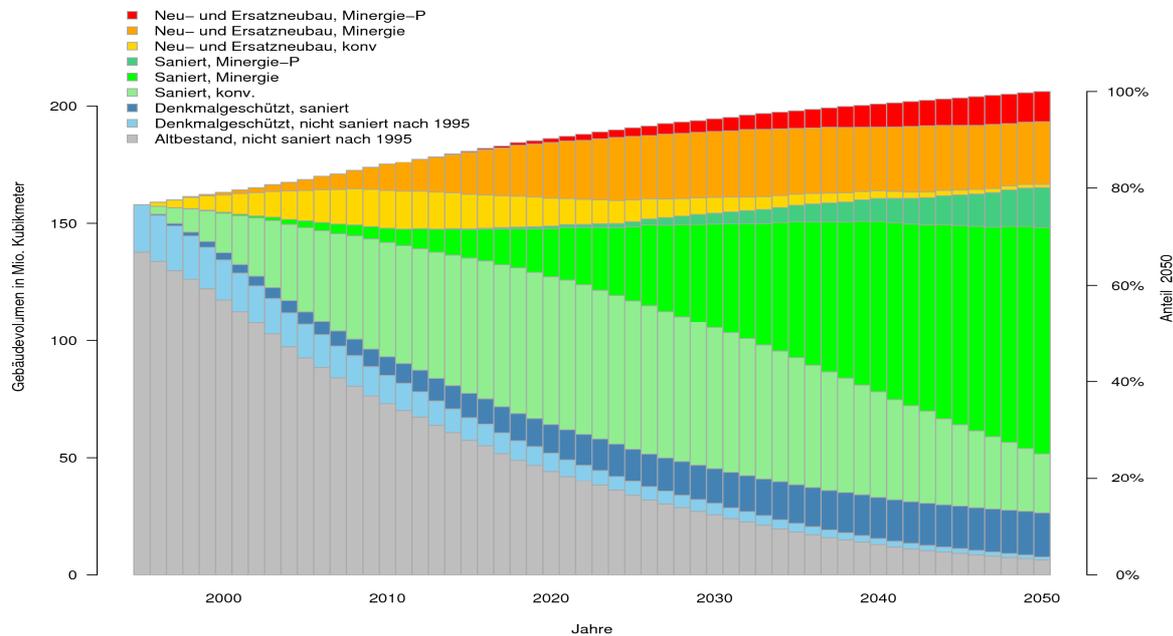
In der der Figur 32, der Figur 33 und der Figur 34 sind die entsprechenden Resultate er drei Szenarien für die Entwicklung des Bestandes nach den Bauweisen in der detaillierten Form dargestellt. In dieser Darstellung wird ebenfalls deutlich, dass der Anteil der konventionell gebauten Gebäude mit Baujahr ab 1995 bis im Jahr 2050 einen vernachlässigbar kleinen Anteil ausmachen wird. Dieser Umstand ist besonders dann ausgeprägt, wenn die Sanierungsraten erhöht werden (Szenario SANIEREN und KOMBINIERT).



Figur 32 Die Entwicklung des Gebäudebestandes in Mio. Kubikmetern gegliedert nach Bauweise im Szenario SANIEREN.



Figur 33 Die Entwicklung des Gebäudebestandes in Mio. Kubikmetern gegliedert nach Bauweise im Szenario ERSETZEN.

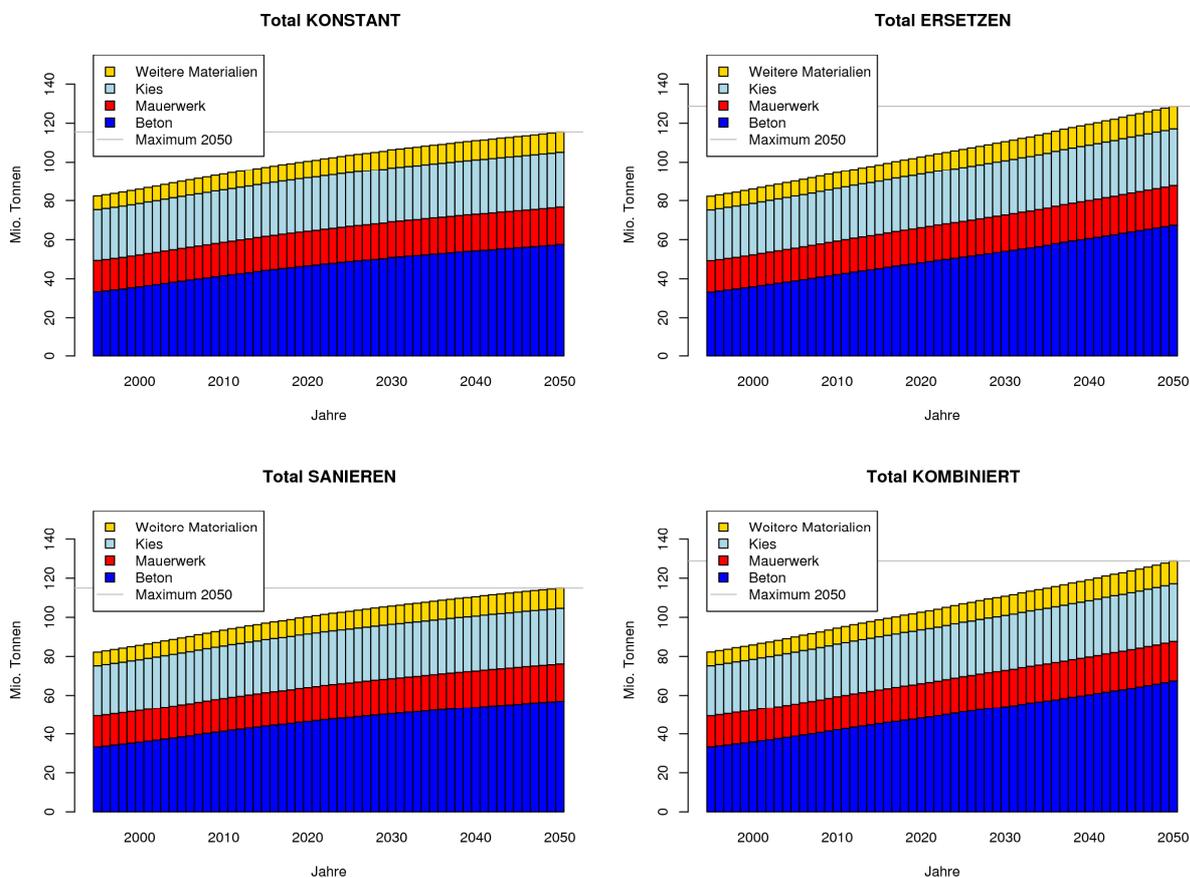


Figur 34 Entwicklung des Gebäudebestandes in Mio. Kubikmetern gegliedert nach Bauweise im Szenario KOMBINIERT.

3.3.2 Entwicklung der Materiallager bei den verschiedenen Szenarien

Die Materiallager entwickeln sich bei den vier Szenarien volumenmässig alle nahezu identisch, da dies eine Vorgabe an das Modell ist (das Gebäudevolumen muss eingehalten werden). Massenmässig unterscheiden sich aber die Lager der verschiedenen Szenarien, da früher der Anteil von Mauerwerk beim Bau der Gebäude viel grösser war als heute. Die Neu- und Ersatzneubauten ab 1995 werden daher zum grossen Teil aus Beton erstellt, welcher eine grössere Dichte aufweist als das Mauerwerk.

In den zwei Szenarien KONSTANT und SANIEREN bleibt der grösste Teil des Altbestandes mit Baujahr vor 1995 bestehen, nur knapp 15 % davon wird ersetzt. Das Materiallager nimmt daher im Szenario SANIEREN gleich zu wie im Referenzszenario KONSTANT, nämlich von gut 80 Mio. Tonnen auf 115 Mio. Tonnen. (Figur 35).



Figur 35 Die totalen Materiallager des Systems Stadt Zürich in Mio. Tonnen der verschiedenen Szenarien. Unter «Weitere Materialien» sind Belag, mineralische Restfraktion, Dämmung und Metalle zusammengefasst. Aus der Zusammensetzung der Lager ist zu erkennen, dass die Neubauten zu grossen Teilen aus Beton erstellt werden. Daher nimmt der Betonanteil bei den Szenarien ERSETZEN und KOMBINIERT aufgrund der vielen Ersatzneubauten stärker zu als in den zwei anderen Szenarien.

In den zwei anderen Szenarien wird die Rückbaurrate erhöht. Damit nehmen auch die Ersatzneubauten stärker zu, woraus ein grösserer Inputfluss von Beton in den Gebäudebestand der Stadt Zürich resultiert.

Die Lager der Infrastruktursysteme bleiben bei diesen Szenarien gleich gross, wie sie in der Figur 25 beschrieben sind. Das Wachstum des totalen Lagers beruht daher ausschliesslich auf dem Wachstum des Gebäudebestandes.

3.3.3 Input- und Outputflüsse des Gebäudebestandes

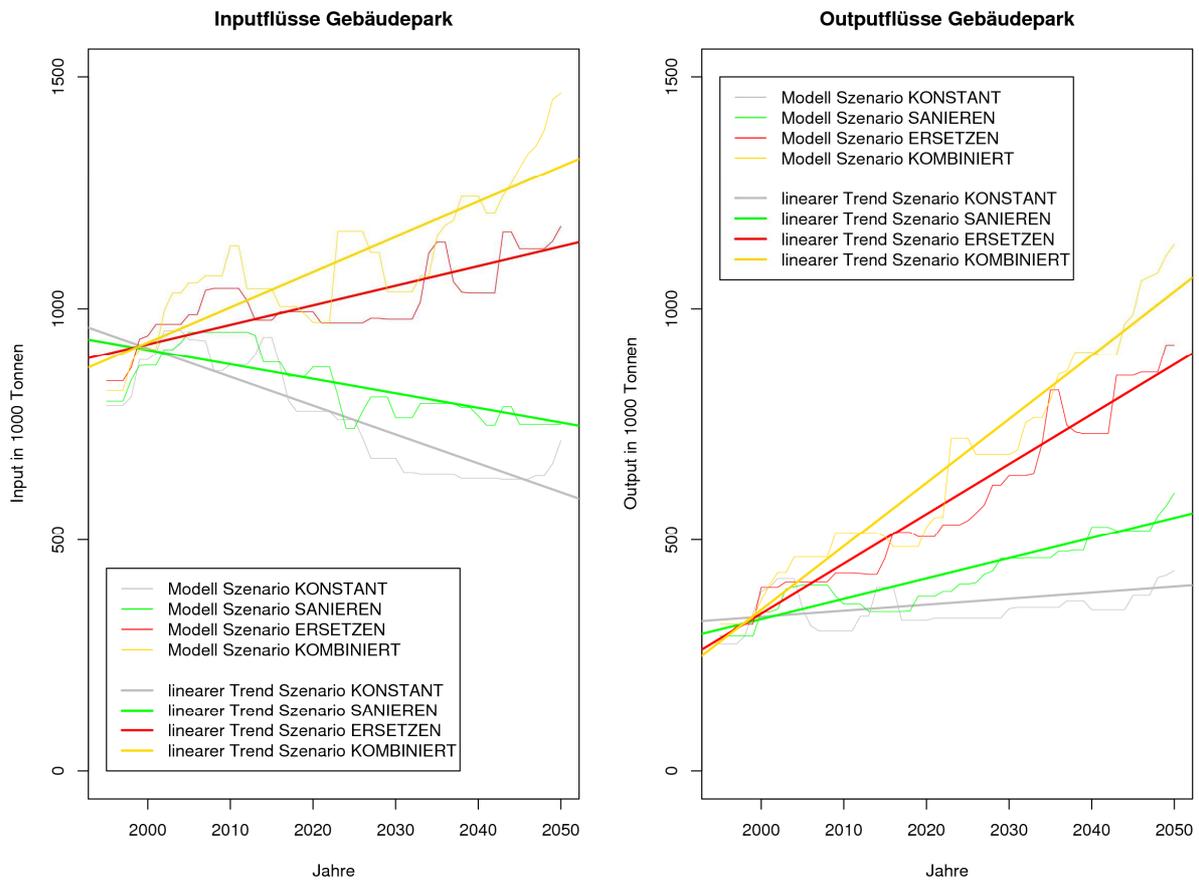
Nach den Modellvorgaben wachsen die Infrastruktursysteme nicht. Der Materialumsatz in diesem Bereich beruht daher nur auf der Erneuerung dieser Systeme. Dabei sind die Input- und Outputflüsse gleich gross und bleiben konstant. Sie entsprechen bei diesen vier Szenarien den Flüssen, wie sie in der Figur 26 dargestellt wurden. Für die Betrachtung hier wurden die Flüsse der Infrastruktur weggelassen. Um die Materialflüsse der einzelnen Szenarien vergleichen zu können, sind ihre geglätteten Werte aufgetragen und mit lineare Trends versehen (Figur 36).

Der geringste totale Inputfluss in den Gebäudebestand ist im Szenario KONSTANT zu verzeichnen. Dieser sinkt von knapp 1.0 Mio. Tonnen pro Jahr (Mio. t/a) auf etwas über 0.6 Mio. t/a. Trotz der sich gemäss dem Modellvorgaben abschwächenden Nachfrage nach Gebäudevolumen und den weiterhin tiefen Sanierungs- und Rückbauraten, wird der Outputfluss leicht ansteigen. Der Grund dafür ist der kontinuierlich wachsende Gebäudebestand. Dies führt dazu, dass bei gleichbleibenden Sanierungs- und Rückbauraten im zeitlichen Verlauf mehr Rückbaumaterial anfallen wird. Im Szenario SANIEREN nimmt der Inputfluss ebenfalls auf rund 0.75 Mio. t/a ab. Der Output hingegen wächst stärker von ca. 0.35 Mio. t/a auf über 0.5 Mio. t/a, da vermehrt Gebäude saniert werden. Bei den anderen Szenarien – es sind die beiden mit erhöhten Rückbauraten – steigen sowohl der Inputfluss (> 1.1 Mio. t/a) als auch der Outputfluss (knapp 1.0 Mio. t/a) stark an, da hier mehr Gebäude ersetzt werden. Die Zusammensetzung der Rückbaumaterialflüsse wird später im Abschnitt 3.5 differenziert dargestellt.

Bei einer grösseren Sanierung wird rund 10 % des Materials, welches im Gebäude verbaut ist, ersetzt. Bei einem Rückbau hingegen fällt das gesamte Gebäude als Rückbaumaterial an. Anstelle des zurückgebauten Gebäudes wird meist ein Ersatzneubau erstellt, was bedeutet, dass entweder gleich viel Material eingesetzt wird wie zurückgebaut wurde oder wahrscheinlicher ist aber, dass mehr Material eingesetzt wird, weil grössere Ersatzneubauten erstellt werden. Daher unterscheiden sich die Input- und Outputflüsse der Szenarien deutlich.

3.4 Energieszenarien

Die vier Szenarien, welche die unterschiedlichen Entwicklungen des Gebäudebestandes abbilden, können mit weiteren Daten ergänzt werden, um energierelevante Fragestellungen zu beantworten. Dabei interessieren die Graue Energie, welche mit dem Bau der Gebäude in der Stadt Zürich verbunden ist und die Betriebsenergie (Endenergie für die Produktion von Raumwärme und Warmwasser) des Gebäudeparks.

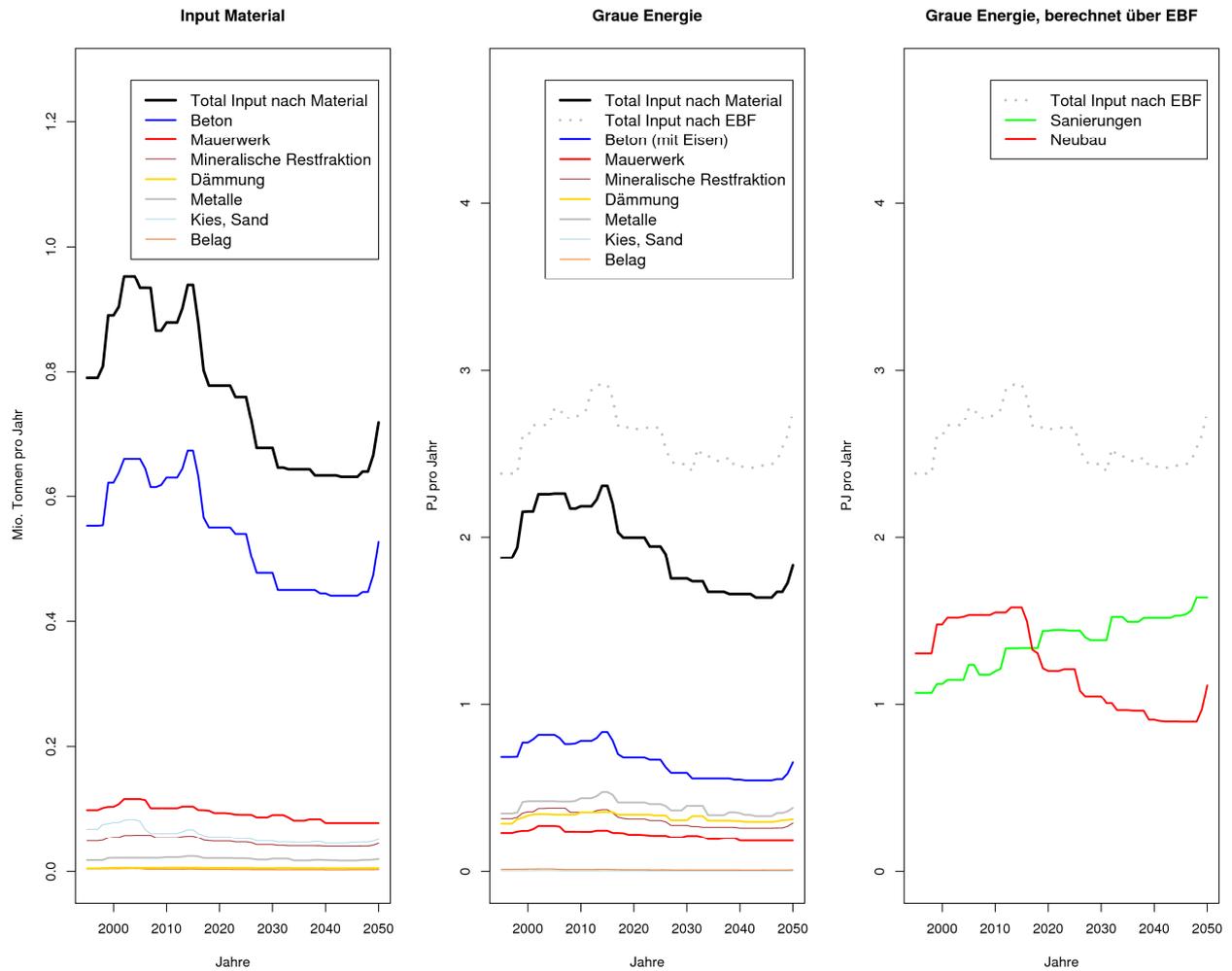


Figur 36 Die Input- und Outputflüsse des Gebäudeparks der vier Szenarien, die geglätteten Kurven und die linearen Trends. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien sind deutlich erkennbar.

3.4.1 Entwicklung der Grauen Energie

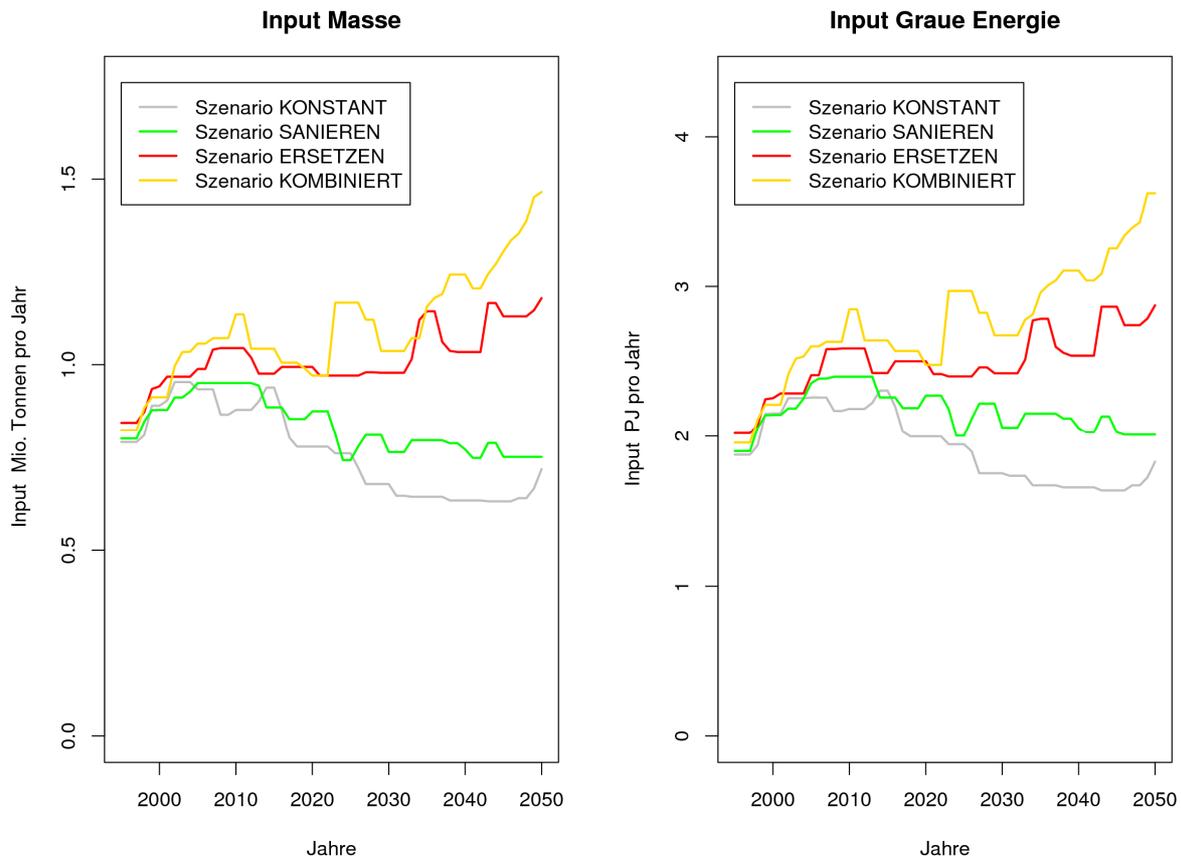
Die Energie wird hier in Petajoule (PJ) angegeben, 1 PJ entspricht 278 GWh.

Für die Berechnung der Grauen Energie wurden zwei verschiedene Methoden angewandt. Einerseits wurde die Graue Energie der Inputflüsse für jeden Baustoff eingesetzt, andererseits können pauschale Faktoren für die sanierten und neugebauten Energiebezugflächen (EBF) eingesetzt werden. Die Resultate dieser Berechnungen finden sich in der Figur 37 . Dort sind der Materialinput (links) und der damit verbundenen Input von Grauer Energie (Mitte und rechts) im Szenario KONSTANT illustriert. Die Darstellung ganz rechts entspricht der Berechnung nach den pauschalen Werten für die Flächen, die Darstellung in der Mitte nach den einzelnen Materialien. In der Mitte ist zudem das Resultat nach der Flächenberechnung für den Vergleich ebenfalls aufgetragen.



Figur 37 Zeitliche Entwicklung des Materialinputs (links, Mio. Tonnen) und der damit verbundenen Grauen Energie (Mittlere Grafik, Petajoule) im Szenario KONSTANT. Rechts ist das Resultat der pauschalen Berechnung der Grauen Energie nach Neubau und Sanierung aufgetragen.

Interessanterweise verlaufen die beiden Kurven für das Total der Grauen Energie bei der mittleren Grafik (schwarz ausgezogen und grau gestrichelt) parallel zueinander, auch liegen sie recht nah beieinander. Die beiden Methoden liefern demnach grundsätzlich ein ähnliches Resultat. Die hier aufgeführten Werte für die Graue Energie nach den einzelnen Materialien (Mitte) umfassen nur die mineralischen Baustoffe, Metalle und Dämmmaterialien. Hingegen sind Kunststoffe, Holz etc. nicht berücksichtigt. Gerade bei Sanierungen ist deren Anteil aber hoch, dementsprechend ist auch die Graue Energie hoch. Daher sind die Resultate aus den Berechnung hier tiefer als bei der Berechnung über die pauschalen Werte, welche über die sanierten und neugebauten Flächen erfolgen (rechts).



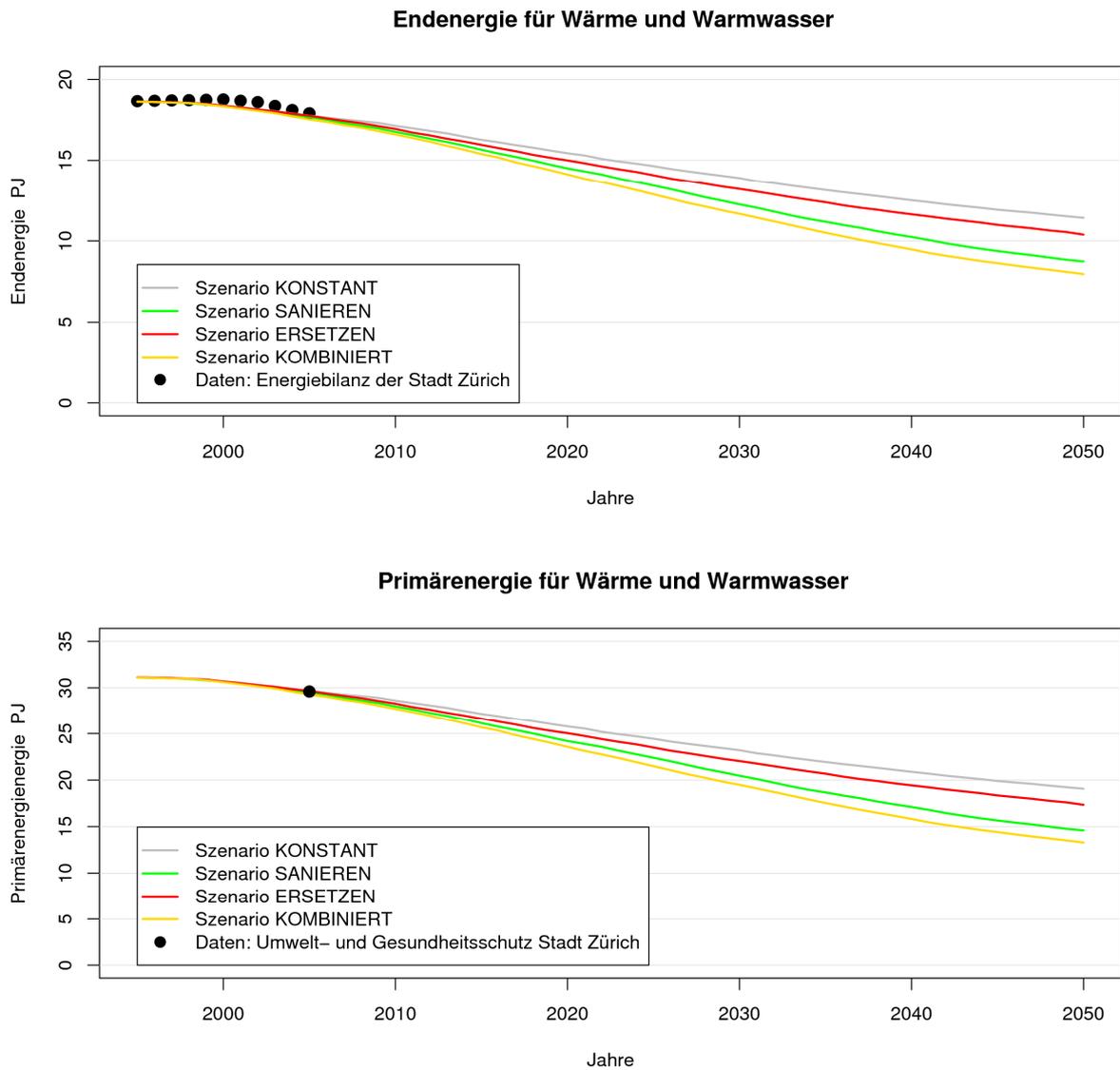
Figur 38 Zeitliche Entwicklung der Baustoffflüsse (links, Mio. Tonnen) und der damit verbundenen Grauen Energie (rechts, Petajoule) für die vier Szenarien. Da die Faktoren zur Berechnung der Grauen Energie über den ganzen modellierten Zeitraum konstant angenommen wurden, verlaufen die Kurven proportional.

Da sich der Input von Material und der Input von Grauer Energie lediglich um die Proportionalitätsfaktoren unterscheiden, werden hier nicht alle Szenarien in dieser ausführlichen Form grafisch dargestellt (vgl. Tabelle 8). Hingegen finden sich in der Figur 38 als Zusammenfassung das jeweilige Total des Inputs der vier Szenarien und ihr entsprechender Input von Grauer Energie. Es erstaunt nicht weiter, dass die beiden Darstellungen ähnlich aussehen, der Vergleich von Input und Grauer Energie für die vier Szenarien zeigt, dass beide proportional verlaufen. Daraus kann ein genäherter mittlerer Wert von rund 2.5 MJ/kg für die Graue Energie der mineralischen Baustoffe abgeschätzt werden.

3.4.2 Betriebsenergie des Bestandes

Aus der Veränderung des Gebäudebestandes kann aufgrund der Bauweisen konventionell, Minergie und Minergie-P der Energiebedarf für die Nutzung des Gebäudeparks abgeschätzt werden. Hier wurde nur der Energiebedarf für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) berücksichtigt und berechnet. Die Prozessenergie (PE) wird explizit nicht berücksichtigt.

Die benötigte Endenergie für den Betrieb des Gebäudeparks beträgt um die Jahrtausendwende rund 18.5 Petajoule pro Jahr (PJ/a) (vgl. Figur 39). Die modellierten Werte stimmen hier gut mit den bekannten Daten für die Stadt Zürich überein (Energiestatistik der Stadt Zürich). Mit dem Primärenergiefaktor PEF von 1.67 für den gesamten Bestand erhält man die Werte, wie sie in der Figur 39 unten dargestellt sind. Der bekannte Wert für das Jahr 2005 aus der Energiestatistik der Stadt Zürich wird dabei vom Modell gut abgebildet (schwarzer Punkt). Die beiden Darstellungen verlaufen proportional zueinander, da sie sich lediglich um den PEF unterscheiden. Im Szenario KONSTANT sinkt der Bedarf an Endenergie bis ins Jahr 2050 auf 11.4 PJ/a, im Szenario KOMBINIERT, dem wirkungsvollsten Szenario, sinkt er sogar bis auf 8.0 PJ/a. Das bedeutet, dass eine Halbierung des Endenergiebedarfs im Gebäudebereich bis ins Jahr 2050 mit erhöhten Sanierungs- und Ersatzneubauraten erreicht werden könnte. Der Unterschied des Energiebedarfes zwischen den Szenarien beträgt somit bezüglich des Szenarios KONSTANT über 30 %.



Figur 39 Die Entwicklung des Energiebedarfes für Raumwärme und Warmwasser des Gebäudeparks. Oben die Endenergie, d. h. der Verbrauch in den Gebäuden und unten der damit verbundene Primärenergiebedarf. Der Primärenergiefaktor (PEF) beträgt 1.67 für das Jahr 2005 und wurde für den gesamten Zeitraum verwendet. Quellen der Daten [ECO₂, 2007], Energiebilanz der Stadt Zürich.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Resultate können diese in die spezifische Grösse Energiebedarf pro Energiebezugsfläche (MJ/m² EBF) umgerechnet werden. Diese Werte sind in der Tabelle 10 für die Jahre 2005, 2020, 2035 und 2050 für alle vier Szenarien aufgeführt. Die EBF ist dabei für einen Jahrgang für alle Szenarien gleich gross. Unter «Wohnen» sind in der Tabelle die Werte der EFH und MFH zusammengefasst. Die Rubrik «Nichtwohnen» bezieht sich damit auf die DLG, PRG und die übrigen Gebäude (Uebr).

Resultate

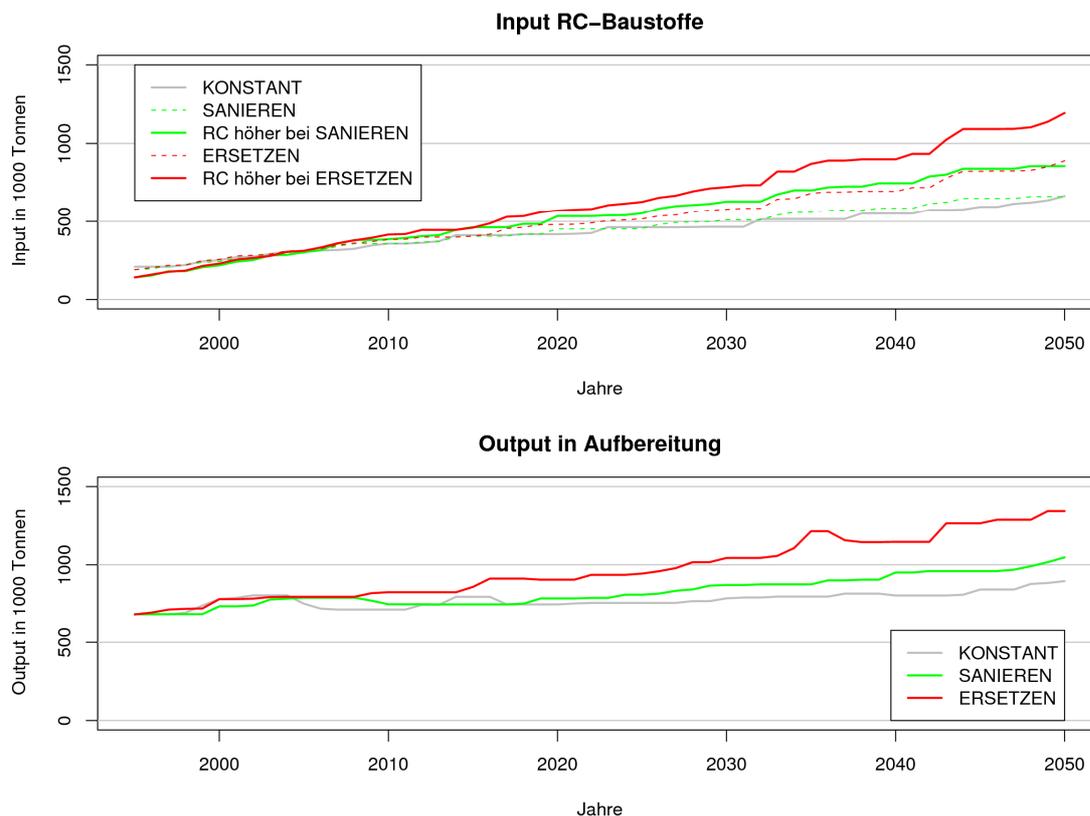
Tabelle 10 Die Energiekennzahlen (EKZ) für die beiden Bereiche «Wohnen» (EFH und MFH) und «Nichtwohnen» (DLG, PRG, Uebr) und für den totalen Gebäudebestand. Die Energiebezugsfläche (EBF) ist für die verschiedenen Szenarien für jeweils ein Jahr gleich gross.

Szenario	2005				2020				2035				2050				
	KON	SAN	ERS	OMB	KON	SAN	ERS	OMB	KON	SAN	ERS	OMB	KON	SAN	ERS	OMB	
Total																	
EBF	Mio. m ²	36.3				40.4				43.0				44.8			
Endenergie	PJ/a	17.8	17.7	17.8	17.5	15.4	14.5	15.0	14.1	13.1	11.2	12.4	10.5	11.4	8.7	10.4	8.0
EKZ	MJ/m ² EBF	490	488	490	482	381	359	371	349	305	260	288	244	254	194	232	178
Wohnen																	
EBF	Mio. m ²	19.7				21.7				23.2				24.4			
Endenergie	PJ/a	10.0	9.9	10.0	9.9	9.3	8.6	9.1	8.4	8.3	6.6	7.9	6.3	7.3	4.9	6.7	4.6
EKZ	MJ/m ² EBF	509	505	509	503	428	395	421	389	357	286	341	270	301	203	276	187
Nichtwohnen																	
EBF	Mio. m ²	16.6				18.7				19.8				20.4			
Endenergie	PJ/a	7.7	7.7	7.7	7.6	6.1	5.9	5.9	5.7	4.9	4.6	4.5	4.2	4.1	3.8	3.7	3.4
EKZ	MJ/m ² EBF	466	465	466	459	329	318	314	304	245	230	225	214	199	186	179	166

KON Szenario KONSTANT
 SAN Szenario SANIEREN
 ERS Szenario ERSETZEN
 OMB Szenario KOMBINIERT

3.5 Einfluss der Szenarien auf den Input von RC-Baustoffen

Die zwei Szenarien 2.1 und 2.2 sind Folge-Szenarien der zwei Basis-Szenarien SANIEREN und ERSETZEN (vgl. Abschnitt 2.6.3). Hier wurde der Anteil der RC-Baustoffflüsse am totalen Inputfluss in das System Stadt Zürich gegenüber SANIEREN und ERSETZEN erhöht. Die entsprechenden Werte sind in der Tabelle 9 auf der Seite 34 festgehalten. Als Grundlage für die Annahmen für diese zwei Szenarien steht der Gedanke, dass der Anteil der RC-Baustoffe am gesamten Input so hoch wie möglich sein soll. Je höher die RC-Anteile sind, umso weniger Bauabfälle müssen deponiert bzw. umso mehr Primärmaterial kann substituiert werden. Daher wurde hier bis ins Jahr 2050 der RC-Anteil beim Beton auf 75 %, diejenigen von RC-Kies und RC-Belag auf 90 % bzw. 85 % erhöht. Die Auswirkungen sind in der Figur 40 dargestellt. Im Vergleich zum Szenario KONSTANT bewegt sich der Inputfluss von RC-Baustoffen bei den zwei Szenarien SANIEREN und ERSETZEN in der gleichen Grössenordnung (oben, grau, grün-gestrichelt, rot-gestrichelt). Es handelt sich dabei um Werte, wie sie im vorhergehenden Abschnitt bereits ausführlich beschrieben wurden.



Figur 40 Vergleich der Inputflüsse von RC-Baustoffen in das System Stadt Zürich (oben) und der Outputflüsse, welche in den Aufbereitungsprozess gelangen (unten). Die Werte aus den zwei Basis-Szenarien SANIEREN und ERSETZEN sind in der oberen Grafik gestrichelt eingetragen. Die ausgezogenen Linien (grün, rot) stellen die Flüsse aus dem Zusatzszenario RC+ (höhere RC-Anteile bis im Jahr 2050: RC-Beton 75 %, RC-Kies 90 % und RC-Belag 85 %).

Neu kommen nun die Resultate für die beiden Szenarien RC+ hinzu (grün, rot). Insbesondere das Szenario RC+ des Hauptszenarios ERSETZEN weist im Jahr 2050 mit knapp 1.2 Mio. Tonnen gegenüber dem Szenario KONSTANT (0.6 Mio. Tonnen) einen doppelt so grossen Inputfluss von RC-Baustoffen auf.

Der Outputfluss in die Aufbereitung unterscheidet sich hier nicht von den bekannten Szenarien SANIEREN und ERSETZEN, da lediglich der Input verändert wurde. Die Outputflüsse sind jedoch in der Figur 40 (unten) dargestellt, um den Rückfluss des aufbereiteten Materials aus den Sanierungen und dem Rückbauprozess in die Stadt Zürich aufzuzeigen. Auch im Szenario RC+ bei ERSETZEN (rot) bleibt der Outputfluss in die Aufbereitung bis ins Jahr 2050 grösser als der Inputfluss von RC-Baustoffen. Dies bedeutet, dass selbst mit diesen hohen Anteilen von RC-Baustoffen ein gewisser Teil der Rückbaustoffe im Umland verwertet oder deponiert werden muss.

Eine detailliertere Zusammenstellung der Inputflüsse ist in den Grafiken der Figur 41 zu finden. Dort ist nicht nur die Entwicklung der RC-Baustoffflüsse (grün) sondern auch der primären Baustoffflüsse (grau, gestrichelt) aufgetragen. Damit lässt sich der totale Inputfluss berechnen (schwarz). Zusätzlich wurden die Outputflüsse in die Aufbereitung (blau) eingefügt, um zu zeigen, wieviel der aufbereiteten Rückbaumaterialien als RC-Baustoffe wieder eingesetzt werden. Hier wurde die Entwicklung der Stoffflüsse auf die Bereiche Gebäudepark (oben) und Infrastruktur (Mitte) und das Total (unten) aufgeteilt. Weiter sind die drei Szenarien KONSTANT (links), RC+ bei SANIEREN (Mitte) und RC+ bei ERSETZEN (rechts) abgebildet. Das Diagramm beim Szenario RC+ bei ERSETZEN der Infrastruktur wurde zugunsten der Legende wegelassen. Es entspricht dem Diagramm in der Mitte (links der Legende) und zeigt den geringen Einfluss der Änderungen bei den Infrastruktursystemen. Für die Infrastruktur wird davon ausgegangen, dass im Szenario KONSTANT im Jahr 2050 bereits über 70 % RC-Baustoffe eingesetzt werden, die Steigerung der RC-Anteile macht somit nicht mehr viel aus.

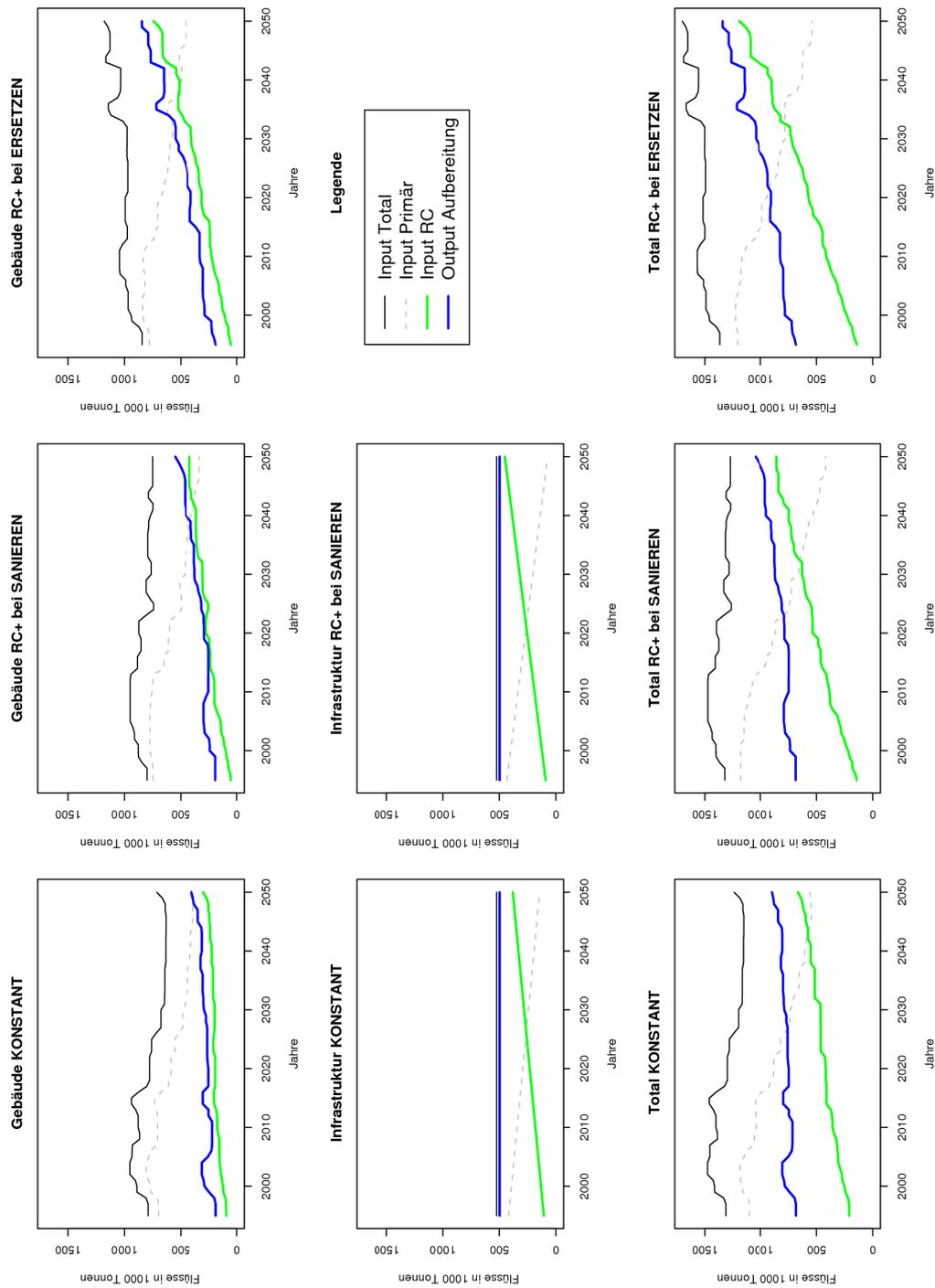
Allen Resultaten ist gemeinsam, dass die Outputflüsse in die Aufbereitung die Inputflüsse von RC-Material übersteigen. Auch wenn die Anteile von RC-Baustoffen am gesamten Input auf die optimistischen Werte von 75 % für Beton, 90 % für Kies und 85 % für Belag bis im Jahr 2050 angehoben werden, kann nicht alles anfallende RC-Material aus Sanierung und dem Rückbau wieder in die Stadt Zürich zurückgeführt werden. Damit besteht noch erhebliches Potential für den breiteren Einsatz von RC-Baustoffen im gesamten System Stadt Zürich.

Die einzelnen RC-Baustoffe und Rückbaumaterialien

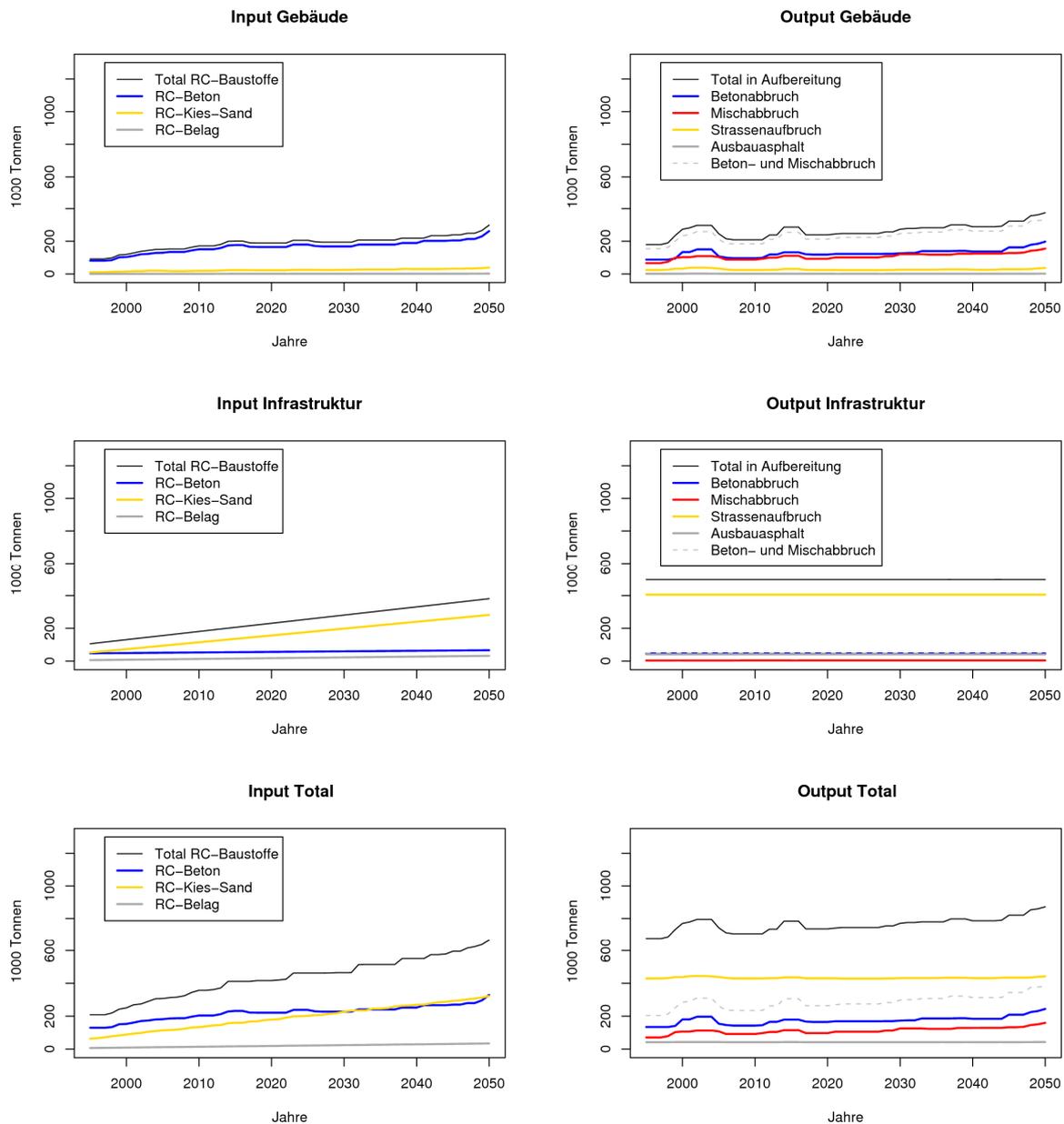
In der Figur 42 und der Figur 43 sind die Inputflüsse der RC-Baustoffe auf die einzelnen Materialien für die zwei Szenarien KONSTANT und RC+ bei ERSETZEN aufgeteilt. Zudem sind die Outputflüsse der Rückbaufractionen aufgetragen. Wieder sind in der obersten Zeile die Resultate für den Gebäudepark, in der Mitte diejenigen der Infrastruktur und das Total (unten) dargestellt.

Der Inputfluss in die Gebäude wird fast vollständig durch RC-Beton gedeckt («Input Gebäude»). Der Anteil für RC-Kies und RC-Belag ist im Vergleich zum Beton sehr klein. Der Output aus den Gebäuden wird hingegen von Betonabbruch und Mischabbruch dominiert («Output Gebäude»).

Das Verhältnis zwischen Betonabbruch und Mischabbruch kann sich ändern, insbesondere im Szenario RC+ bei ERSETZEN (Figur 43) steigt der Anteil von Betonabbruch stark an, da auch vermehrt jüngere Gebäude ersetzt werden. Der Input von RC-Kies in die Infrastrukturnetze («Input Infrastruktur») wird stark zunehmen und sich dem Output annähern («Output Infrastruktur»). Das Total des Outputs wird aber nicht ganz erreicht, da immer ein gewisser Anteil an Baustoffen primärer Herkunft verbaut wird. Die anderen Fraktionen (RC-Beton, RC-Kies, RC-Belag) spielen bezüglich der Masse beim Input keine grosse Rolle. Der Output aus der Infrastruktur wird von der Fraktion Strassenaufbruch dominiert, auch hier ist der Anteil der weiteren Fraktionen gering. Der totale Input («Input Total») setzt sich hauptsächlich aus RC-Beton aus den Gebäuden und RC-Kies aus der Infrastruktur zusammen. Im Szenario KONSTANT (Figur 42) bleibt der Anteil dieser zwei Fraktionen ziemlich konstant. Hingegen nimmt der Anteil von RC-Beton im Szenario RC+ bei ERSETZEN stark zu (Figur 43). Zu Beginn der modellierten Zeit beträgt der Anteil von Strassenaufbruch rund die Hälfte der 0.6 Mio. Tonnen, welche in die Aufbereitung gelangen. Betonabbruch und Mischabbruch aus den Gebäuden betragen je rund $\frac{1}{4}$. Diese Verteilung ändert sich je nach Szenario verschieden stark.

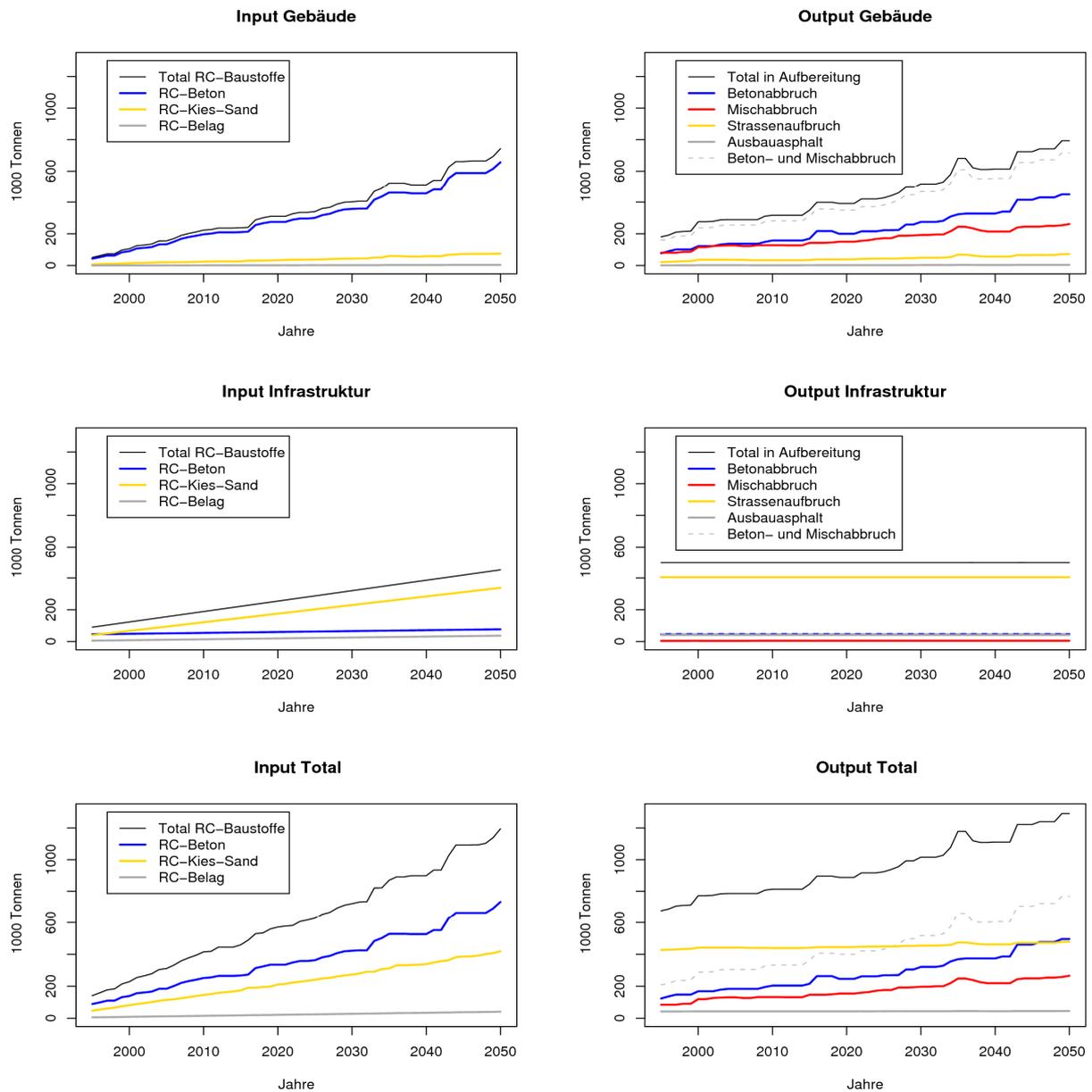


Figur 41 Die zeitliche Entwicklung der Input- und Outputflüsse (in die Aufbereitung) in und aus Gebäudepark und Infrastruktur. Die Infrastruktur ganz rechts entspricht dem Diagramm in der Mitte. Die Inputflüsse von RC-Baustoffen sind in jedem Fall kleiner als der Output in die Aufbereitung. Das Potenzial für den Einsatz von RC-Baustoffen wird nicht vollständig ausgeschöpft.



Figur 42 Inputflüsse der RC-Baustoffe und Outputflüsse der Rückbaumaterialien für das Szenario KONSTANT. In den Gebäudepark gelangt vorwiegend RC-Beton, in die Infrastruktursysteme zum grössten Teil RC-Kies/Sand. Der totale Output setzt sich hauptsächlich aus Strassenaufbruch (Kies/Sand), Beton- und Mischabbruch aus den Gebäuden zusammen. Ausbausphalt und der daraus hergestellte RC-Belag machen nur einen geringen Teil der RC-Baustoffe aus.

Im Referenzszenario KONSTANT nehmen die Outputflüsse nur langsam zu, so dass die Verhältnisse ziemlich konstant bleiben. Beim Szenario RC+ bei ERSETZEN hingegen wächst der Output aus den Gebäuden stark an, da dort als Folge der erhöhten Rückbaurrate viel Rückbaumaterial anfällt. Bis ins Jahr 2050 wird in diesem Szenario der Betonabbruch gleich hoch sein wie Strassenaufbruch («Output Total» unten rechts).



Figur 43 Inputflüsse der RC-Baustoffe und Outputflüsse der Rückbaumaterialien für das Szenario RC+ bei ERSETZEN. Der Inputfluss von RC-Beton in den Gebäudepark steigt nochmals stärker als im Referenzszenario. Die Werte für die Infrastruktur bleiben konstant.

Der Output von Beton- und Mischabbruch *zusammen* (grau gestrichelt) wird bei beiden Szenarien annähernd so gross sein, wie der jeweilige Bedarf von RC-Beton im gesamten System. Das legt nahe, den Mischabbruch vermehrt auch im Konstruktionsbeton für den Bau von Gebäuden einzusetzen, da der Bedarf von Beton in den Infrastrukturen viel geringer ist.

3.6 Einfluss der Szenarien im Infrastrukturbereich auf die Materialflüsse

Bei den Szenarien der Gruppe 3 (3.1, 3.2, 3.3, vgl. Abschnitt 2.6.4) werden Veränderungen im Bereich der Infrastruktursysteme modelliert. Für den Gebäudebestand dient dazu das Referenzszenario KONSTANT als Grundlage.

Für das Szenario 3.1 wurden die Erneuerungsraten (ER) der Infrastrukturnetze pauschal um 20 % für die ganze Dauer der modellierten Zeit angehoben. Analog wurden die ER im Szenario 3.2 um 20 % gesenkt. Die ER der verschiedenen Infrastrukturen wurden in der Phase I detailliert für alle Nutzungen erhoben, ihre Werte sind im Bericht der Phase I aufgeführt [Schneider, Rubli 2007, Tabelle A-4]. Für das Szenario 3.3 wird davon ausgegangen, dass der Umfang der Infrastrukturnetze bis ins Jahr 2050 um 20 % zunehmen wird. Dieses Wachstum kann einerseits ein reines Längenwachstum sein, andererseits bildet es auch eine verstärkte Bauweise der Strassen ab. Da hierzu keine Daten erhältlich sind, wurde mit diesem Szenario eine Schätzung betreffend den Auswirkungen dieser Änderung der Bauweise gemacht.

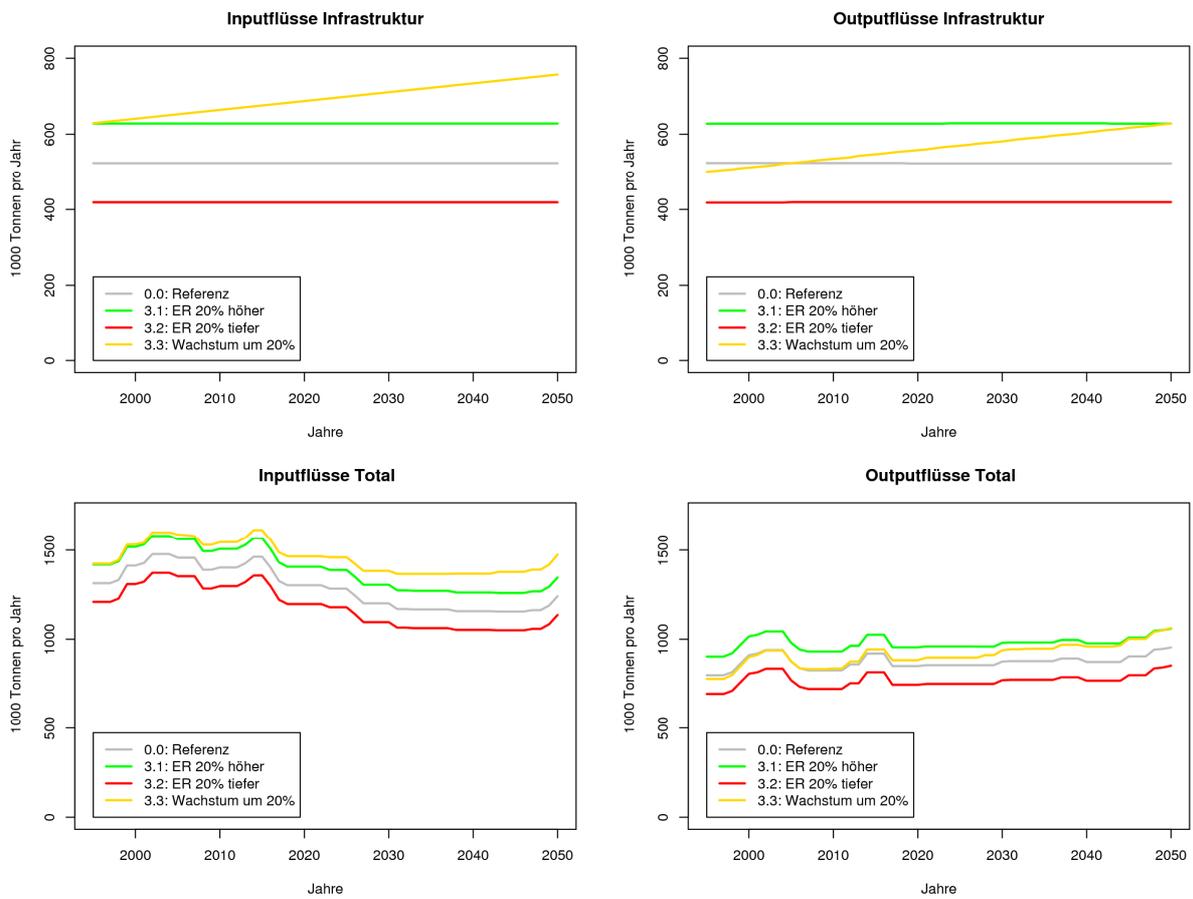
Die Figur 44 stellt die Resultate aus der Berechnung der drei Szenarien und des Referenzszenarios dar. Dargestellt sind die Inputflüsse (links) und die Outputflüsse (rechts) der Infrastruktursysteme (oben) und des gesamten Systems Stadt Zürich (unten). Die Materialflüsse aus den Gebäuden bleiben für diese Subsznarien immer dieselben des Szenario KONSTANT. Diese sind hier nicht explizit gezeigt.

Da in den Szenarien KONSTANT (Referenz), 3.1 und 3.2 das Wachstum der Infrastruktur gleich Null ist, bleiben die Input- und Outputflüsse über die ganze Zeit konstant. Lediglich das Niveau verschiebt sich entsprechend der Zu- oder Abnahme der ER um 20 % bezüglich dem Szenario KONSTANT. Hingegen nehmen In- und Outputflüsse in der Infrastruktur im Szenario 3.3 zu, da dort die Länge der Netze zunimmt.

Auf das Total der Materialflüsse – Gebäude und Infrastruktur zusammen – haben diese Szenarien einen relativ geringen Einfluss. Der Anteil der Infrastruktur am gesamten Inputfluss in die Stadt Zürich beträgt ca. $\frac{1}{3}$. Wenn dieses Drittel um ± 20 % verändert wird, macht verändert sich der totale Inputfluss um ± 7 %. Der Anteil des Outputflusses aus der Infrastruktur am totalen Outputfluss beträgt ca. die Hälfte. Hier verändern diese Szenarien den totalen Outputfluss um rund 10 %.

Der Materialumsatz der Infrastrukturnetze ist zwar hoch, aber relativ konstant. Allerdings wurden im Modell die Grossprojekte wie z. B. die neue Durchmesserlinie nicht berücksichtigt. Diese können das System kurzfristig beeinflussen. Auf längere Sicht spielen die Grossprojekte aber eine untergeordnete Rolle.

Der interessantere Aspekt bezüglich den Infrastruktursystemen bildet aber ihr Potential für den Einsatz von RC-Baustoffen aus dem Hochbau. Auf diese Fragestellung wird in der Diskussion näher eingegangen.



Figur 44 Der Einfluss veränderter Erneuerungsraten und des Wachstums der Infrastrukturnetze auf die Flüsse im Gesamtsystem.

4 DISKUSSION DER RESULTATE

4.1 Materiallager im Gebäudepark und Infrastruktur

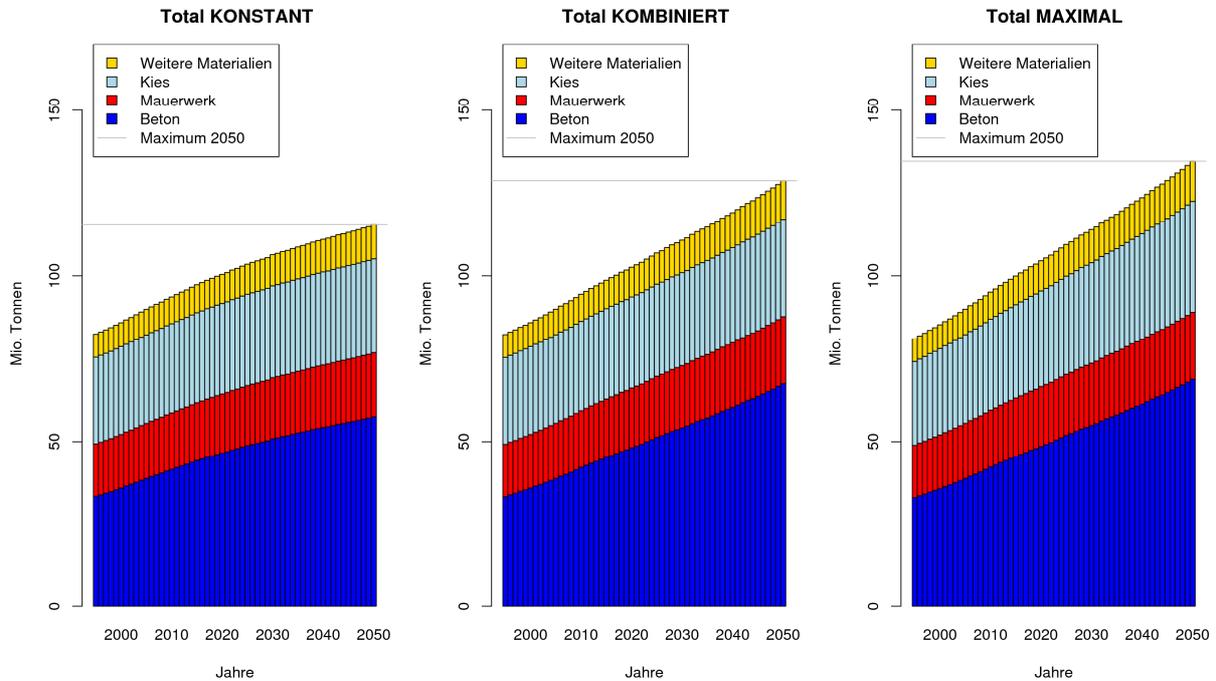
Die Materiallager der mineralischen Materialien werden in der Stadt Zürich weiterhin zunehmen, da der Gebäudebestand weiter wachsen wird. Das totale Gebäudevolumen wird um rund 30 % von 156 Mio. Kubikmeter (1995) auf 205 Mio. Kubikmeter (2050) zunehmen. Je nach Szenario, d. h. ob mehr oder weniger Gebäude ersetzt werden, verändert sich dabei die Zusammensetzung des Materiallagers. Bei den Infrastruktursystemen wird das Wachstum eher moderat ausfallen.

Massenmässig ist der grösste Anteil des Zuwachses im Gebäudepark auf den Zuwachs des Betonlagers zurückzuführen. Dies hängt damit zusammen, dass Beton der Hauptbaustoff bei der Erstellung von Gebäuden ist und dies wohl auch in Zukunft so bleiben wird. Der Anteil von Mauerwerk ist tief. Die weiteren mineralischen Baustoffe wie Gips, Keramik, Glas haben nur geringe Anteile. Wenn die Rückbaurrate der Gebäude erhöht wird, wächst gleichzeitig die Ersatzneubaurate. Durch den Rückbau von alten Gebäuden fällt ein relativ grosser Anteil Mauerwerk (Mischabbruch) an, weil die alten Gebäude deutlich höhere Mauerwerksanteile aufweisen als die heutigen Bauten. Der Ersatzneubau weist hingegen einen grossen Betonanteil auf. Damit verändert sich das Lager des Bestandes auch aufgrund der Rückbau- und Ersatzneubautätigkeiten. Der Anteil von Beton nimmt somit auf Kosten des Mauerwerks zu. Da die Dichte von Mauerwerk (1.6 t/m^3) kleiner ist als die Dichte von Beton (2.4 t/m^3), verstärkt sich dieser Effekt bei der Betrachtung nach Massen zusätzlich.

Die Materialverteilung der Infrastrukturwerke wird gemäss den Modellannahmen bei den Szenarien KONSTANT, SANIEREN, ERSETZTEN und KOMBINIERT konstant bleiben. Hingegen wurde dem Szenario 3.3 ein Wachstum der Infrastruktursysteme um 20 % zugrunde gelegt. Im Szenario MAXIMAL wächst somit zusätzlich zum Gebäudebestand auch die Infrastruktur. Das Materiallager wird unter diesen Annahmen von über 80 Mio. Tonnen im Jahr 1995 auf 135 Mio. Tonnen im Jahr 2050 zunehmen (Figur 45). Im Szenario KOMBINIERT beträgt der Lagerzuwachs noch immer 128 Mio. Tonnen. Die Differenz zwischen diesen zwei Szenarien ist relativ also relativ gering. Die Differenz ist auf das Lagerwachstum von Kies/Sand in den Infrastrukturbauten zurückzuführen. Die geringe Differenz zwischen den beiden Szenarien zeigt, dass der Einfluss des Wachstums der Infrastrukturwerke auf das Materiallager in der Stadt Zürich gering ist. Mit der folgenden Abschätzung kann dieses Ergebnis gestützt werden. Das Materiallager der Infrastrukturen beträgt ca. $\frac{1}{3}$ des totalen Lagers. Wenn dieses Drittel um 20 % zunimmt, entspricht das einer Zunahme bezüglich dem totalen Lager von 6.67 % bzw. 7.6 Mio. Tonnen, was ziemlich genau der oben formulierten Differenz zwischen den zwei Szenarien KOMBINIERT und MAXIMAL entspricht, nämlich $135 - 128 = 7$ Mio. Tonnen.

Anhand der Figur 45 lässt sich deutlich zeigen, was der Umbau des Gebäudeparks für die Entwicklung der Materiallager bedeutet. Im Szenario KONSTANT flacht das Wachstum gegen das Jahr 2050 langsam ab, so wie man es gemäss den Prognosen zur Entwicklung der Bevölkerungs- und Beschäftigtenzahlen erwarten kann. Steigen hingegen die Sanierungs- und Rückbauraten wie im Szenario KOMBINIERT stark an, so trägt der Umbau des Gebäudeparks

noch einmal rund die Hälfte zum Wachstum des Materiallagers (nach Massen) bei. Wenn zusätzlich auch die Infrastruktursysteme um 20 % zunehmen, so verläuft der Lageraufbau nahezu linear auf die 135 Mio. Tonnen.



Figur 45 Entwicklung der Materiallager in der Stadt Zürich für die drei Szenarien KONSTANT, KOMBINIERT und MAXIMAL. Zusätzlich zum Wachstum des Gebäudebestandes (KONSTANT) und zum verstärkten Umbau (KOMBINIERT) kommt nun auch noch ein Wachstum der Infrastruktursysteme hinzu (MAXIMAL). Das Materiallager wächst von 82 Mio. Tonnen auf 135 Mio. Tonnen im Szenario MAXIMAL. Unter «Weitere Materialien» sind Belag, mineralische Restfraktion, Dämmungen und Metalle zusammengefasst.

Wenn nun die mineralischen Materiallager auf pro Kopf bzw. pro Einwohner bezogen werden, zeigt sich, dass die Zunahme bezüglich dem Stand von 1995 bis ins Jahr 2050 zwischen den einzelnen Szenarien sehr unterschiedlich ist (Tabelle 11). Ausgehend von 227 Tonnen pro Einwohner (t/cap) im Jahr 1995 steigen die Lager bis 2050 auf 274 t/cap (KONSTANT), 305 t/cap (KOMBINIERT) bzw. 322 t/cap (MAXIMAL). Der Startwert für das Jahr 1995 stimmt gut mit dem Wert aus der Phase I für das Jahr 2005 überein. Dort waren es 246 t/cap für das entsprechende Materiallager [Schneider, Rubli 2007]. Die Zunahme des Lagers pro Einwohner bewegt sich bis ins Jahr 2050 in Abhängigkeit von der Erneuerungsintensität und vom Wachstum der Infrastruktursysteme zwischen 21 % und 42 %.

Tabelle 11 Vergleich der Lager der mineralischen Baustoffe. Die Grössenordnung der Werte pro Einwohner stimmen gut mit dem Wert aus der Phase I überein. Dort wurden für das entsprechende Lager 246 t/cap im Jahr 2005 berechnet [Schneider, Rubli 2007].

Mineralische Materialien	Alle 1995	KONSTANT 2050	KOMBINIERT 2050	MAXIMAL 2050
Lager pro Einwohner in Tonnen/cap	227	274	305	322
Zunahme in Prozent bzgl. 1995		21%	34%	42%

4.2 Materialflüsse

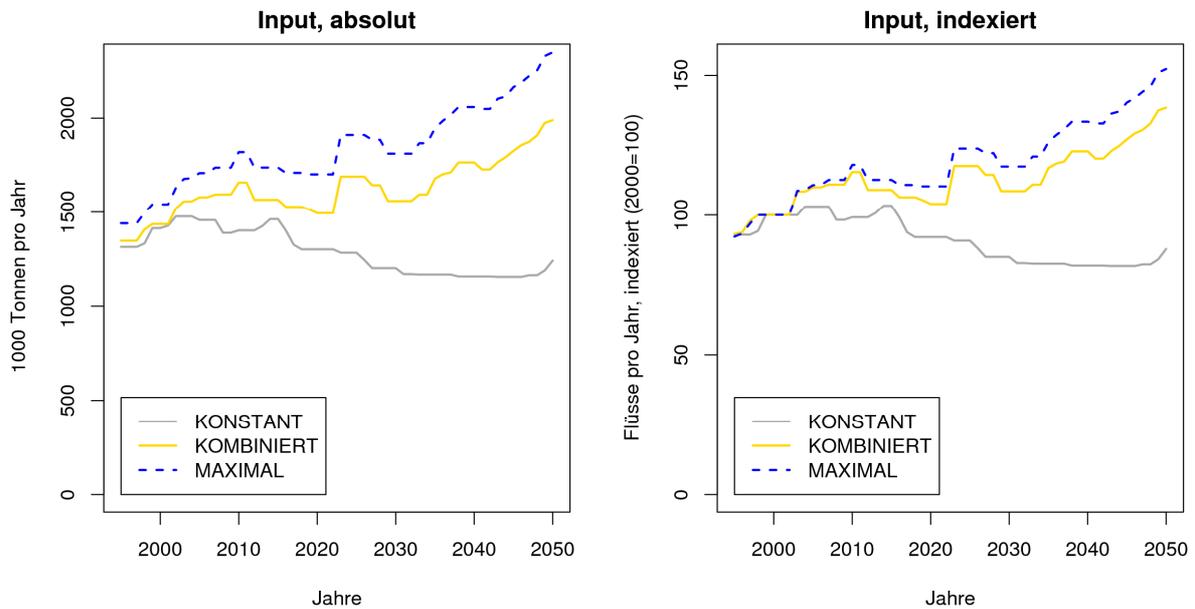
4.2.1 Input in das System Stadt Zürich

Um den Lageraufbau, wie er im vorherigen Abschnitt diskutiert wurde, zu ermöglichen, müssen die entsprechenden Inputflüsse dem System zugeführt werden. Der Input von Baustoffen, welche in das System Stadt Zürich gelangen, wird sich dabei je nach Szenario unterschiedlich entwickeln.

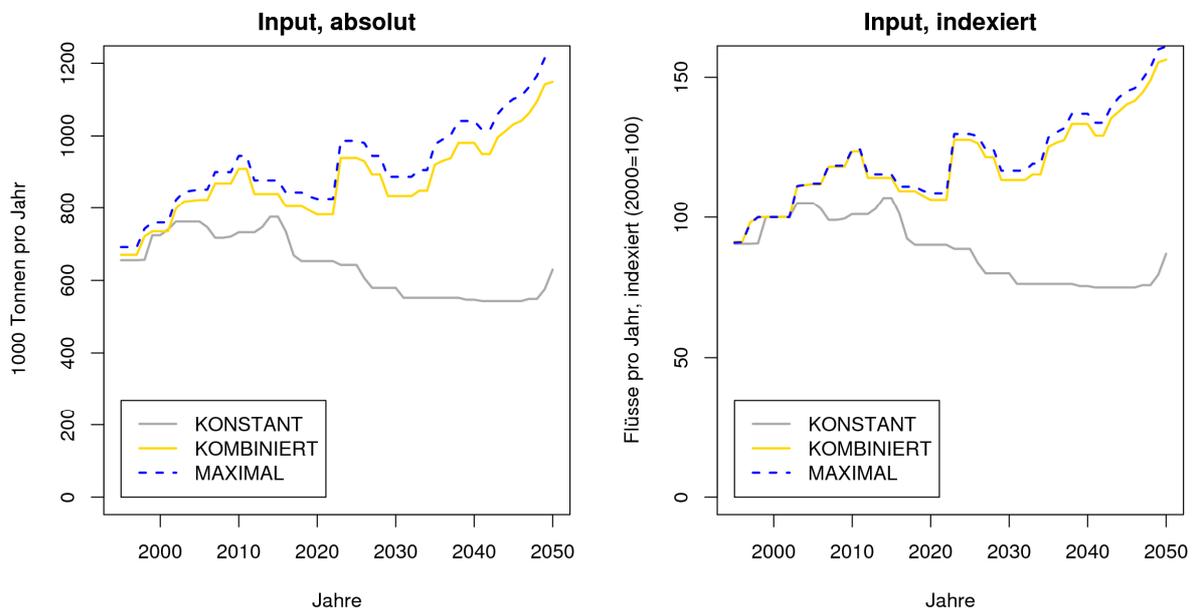
In den folgenden Figuren (Figur 46 und Figur 47), sind als Vergleich die Inputflüsse von einigen Baustoffen dargestellt. In den Grafiken auf der linken Seite sind jeweils die absoluten Flüsse in 1000 Tonnen pro Jahr abgebildet. Die Entwicklung der Flüsse ist jeweils in den Grafiken auf der rechten Seite in indexierter Form (Bezugsjahr 2000) dargestellt. In jeder dieser Figuren sind die Resultate der drei Szenarien KONSTANT, KOMBINIERT und MAXIMAL abgebildet.

Werden die totalen Inputflüsse der hier untersuchten Baustoffe dargestellt (Figur 46), so sind die Unterschiede zwischen den drei Szenarien deutlich zu sehen. Im Szenario KONSTANT (grau) wird der totale Input von 1.35 Mio. Tonnen pro Jahr (1995) tendenziell abnehmen, da sich das Wachstum abflacht. Im Szenario KOMBINIERT (gold) wird dieser Wert bis gegen 2.0 Mio. Tonnen pro Jahr ansteigen und im Szenario MAXIMAL (blau gestrichelt) führt das Wachstum der Infrastruktursysteme zu einem Inputfluss von weit über 2.0 Mio. Tonnen pro Jahr (2050). Insgesamt ist damit in Abhängigkeit des gewählten Szenarios eine maximale Zunahme von 50 % zu erwarten (Grafik rechts).

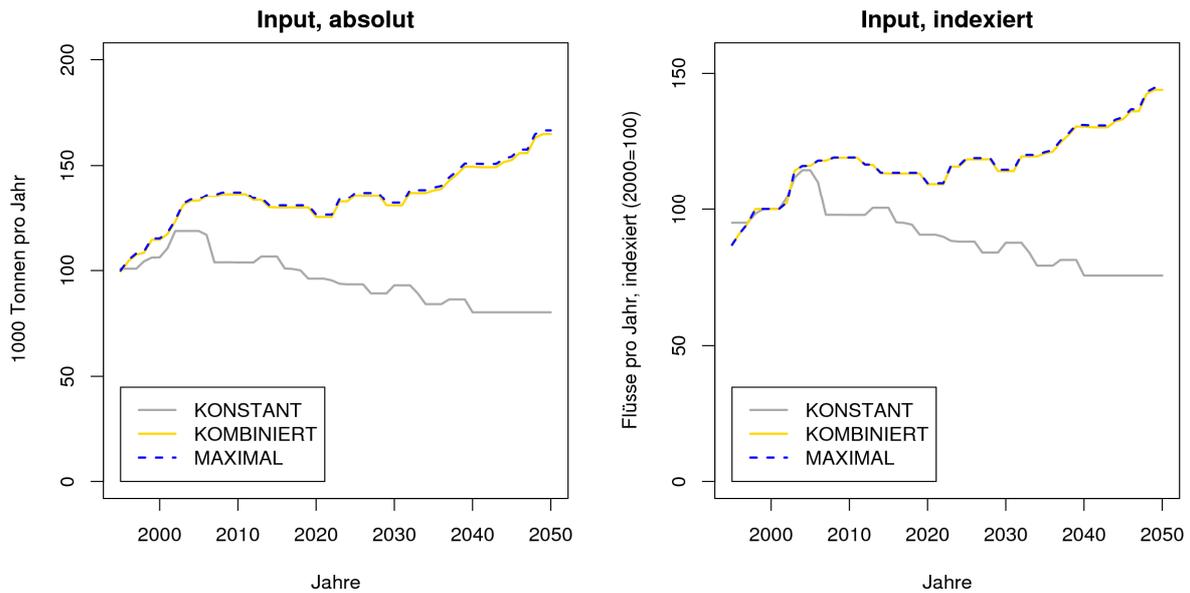
Der Inputfluss von Beton (Figur 47) verläuft ähnlich wie der totale Inputfluss, ausser beim Szenario MAXIMAL. Dieses weist geringfügig höhere Werte als das Szenario KOMBINIERT auf. Der Grund dafür ist der im Vergleich zum Hochbau geringere Betonanteil in den Infrastruktursystemen, welche ja im Szenario MAXIMAL wachsen. Die Betonflüsse werden deshalb durch das Wachstum der Infrastruktur weniger stark beeinflusst. Interessanterweise zeigt sich bei der indexierten Darstellung (rechts), dass der Beton sogar leicht überdurchschnittlich zunimmt im Vergleich zum totalen Input. Dies kann mit der höheren Dichte von Beton im Vergleich zu den anderen Materialien erklärt werden.



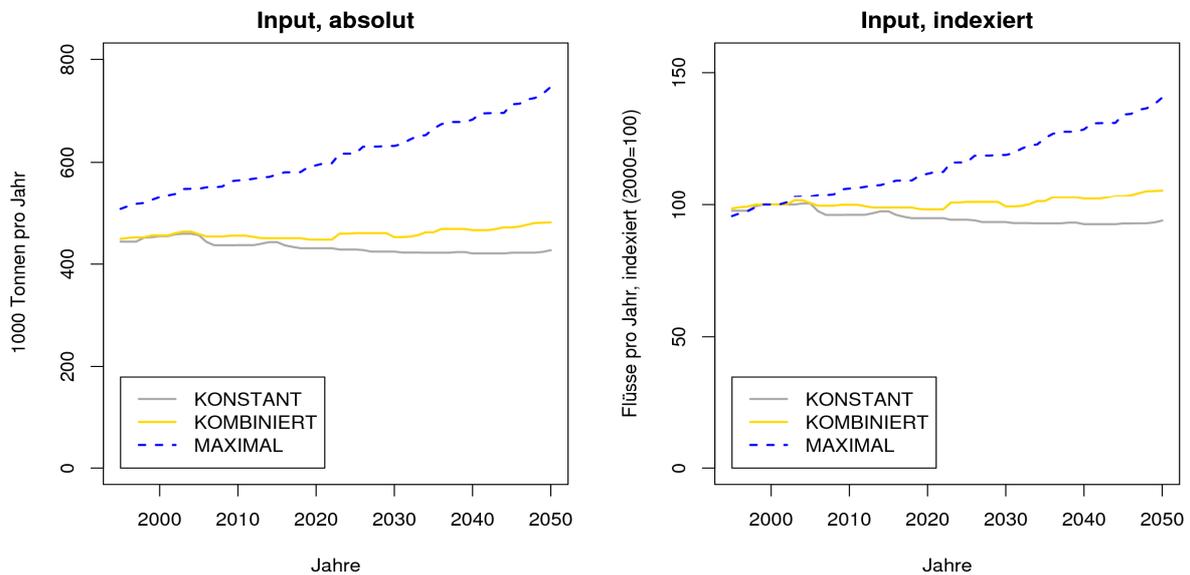
Figur 46 Zeitliche Entwicklung der **totalen Inputflüsse** der untersuchten Materialien (mineralische Baustoffe, Wärmedämmung, Metalle) in das System Stadt Zürich: Links in 1000 Tonnen pro Jahr, rechts indexiert mit dem Bezugsjahr 2000. Die Inputflüsse bei den Szenarien KOMBINIERT und MAXIMAL nehmen deutlich stärker zu als beim Szenario KONSTANT.



Figur 47 Der Inputfluss von **Beton**, in 1000 Tonnen pro Jahr (links) und indexiert (rechts). Da Beton zum grösseren Teil im Gebäudepark eingesetzt wird, ist der Unterschied zwischen den Szenarien KOMBINIERT und MAXIMAL zum Szenario KONSTANT deutlicher in der Figur 46.



Figur 48 Die zeitliche Entwicklung der Inputflüsse von **Mauerwerk** in das System Stadt Zürich in 1000 Tonnen pro Jahr und auf indizierter Basis (Bezugsjahr 2000). Es sind kaum Unterschiede zwischen den beiden Szenarien KOMBINIERT und MAXIMAL zu erkennen, weil nur wenig Mauerwerk in den Infrastrukturwerken eingesetzt wird.



Figur 49 Zeitliche Entwicklung der Inputflüsse von **Kies/Sand** in das System Stadt Zürich in 1000 Tonnen pro Jahr und auf indizierter Basis. Der Input von Kies/Sand wird durch das Wachstum des Gebäudebestandes viel weniger stark beeinflusst als durch das Wachstum der Infrastruktursysteme. Beim Szenario MAXIMAL resultiert aufgrund des angenommenen Wachstums der Infrastrukturbauten von 20 % ein Anstieg des Kies/Sandflusses um 40 %.

Die Inputflüsse von Mauerwerk sind in der Figur 48 illustriert. Hier ist der Unterschied zwischen den zwei Szenarien KONSTANT und MAXIMAL noch geringer, da für die Infrastrukturwerke sehr wenig Mauerwerk eingesetzt wird. Tendenziell werden die Inputflüsse von Mauerwerk langsamer ansteigen als der totale Inputfluss, da der Anteil von Mauerwerk in Gebäuden die in der jüngeren Vergangenheit erstellt wurden, abnimmt.

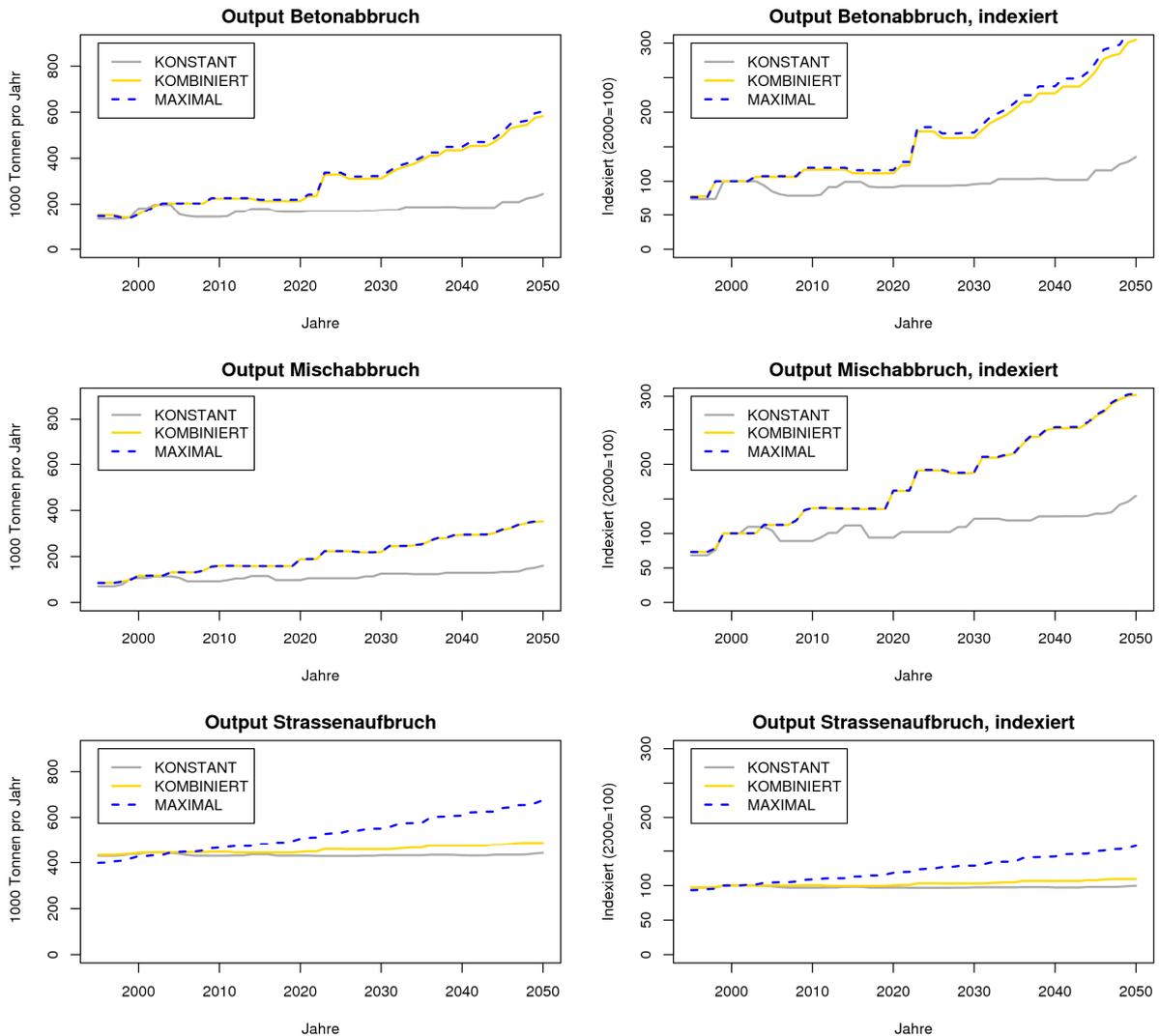
Der Input von Kies/Sand wird durch das Wachstum des Gebäudebestandes viel weniger stark beeinflusst als durch das Wachstum der Infrastruktursysteme (Figur 49). Aus diesem Grund bewegen sich die Inputflüsse des Szenarien KOMBINIERT und KONSTANT auf einem ähnlichen Niveau. Beim Szenario MAXIMAL resultiert aufgrund des angenommenen Wachstums der Infrastrukturbauten ein Anstieg des Kies/Sandflusses um 40 %. Diese Zunahme beinhaltet einerseits das Wachstum der Infrastruktursysteme um 20 %, andererseits aber auch die Zunahme des Unterhaltes aufgrund der höheren Erneuerungsraten.

Insgesamt zeigt sich auch bei den Inputflüssen der einzelnen Materialien, dass Beton der wichtigste Baustoff bleiben wird. Der Anstieg dieses Flusses wird – eine Zunahme der Sanierungs- und Rückbautätigkeit sowie des Wachstums der Infrastruktursysteme vorausgesetzt – am stärksten ausfallen.

4.2.2 Output von Betonabbruch, Mischabbruch und Strassenaufbruch

Der Output aus dem System Stadt Zürich besteht zum grossen Teil aus Strassenaufbruch (ca. 50 %) und zu je einem Viertel aus Beton- und Mischabbruch (vgl. Figur 42). Diese Outputflüsse sind für die drei Rückbaufractionen Betonabbruch, Mischabbruch und Strassenaufbruch in der Figur 50 dargestellt. In den Grafiken auf der linken Seite sind wiederum die Flüsse in absoluten Werten (1000 t/a) und rechts auf indexierter Basis (Bezugsjahr 2000) aufgeführt.

Beim Szenario KONSTANT bewegen sich die Outputflüsse in einem konstanten bis leicht ansteigenden Bereich. Die geringe Zunahme beruht auf dem Wachstum des Gebäudelagers. Werden aber die Sanierungs- und Rückbauraten wie im Szenario KOMBINIERT oder MAXIMAL erhöht, so wachsen die Flüsse von Betonabbruch bis ins Jahr 2050 um beinahe den Faktor drei (oben rechts). Auch die Fraktion Mischabbruch wird bei diesem Szenario bis ins Jahr 2050 stark zunehmen und sich von knapp 2 Mio. Tonnen pro Jahr auf knapp 4 Mio. Tonnen pro Jahr verdoppeln. Der Grund für die kleinere Zunahme beim Mischabbruch liegt wieder in der veränderten Bauweise der Gebäude. Sowohl beim Betonabbruch wie auch beim Mischabbruch weichen die Resultate der Szenarien MAXIMAL und KOMBINIERT kaum voneinander ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Szenario MAXIMAL die gleiche Entwicklung des Gebäudebestandes vorausgesetzt wird, wie beim Szenario KOMBINIERT. Beim Szenario MAXIMAL wachsen hingegen zusätzlich die Infrastrukturwerke. Dies äussert sich in höheren Strassenaufbruchflüssen. Das Szenario MAXIMAL weist im Vergleich zum Szenario KOMBINIERT einen deutlich stärkeren Anstieg dieses Flusses auf. Der Output von Beton- und Mischabbruch wird in allen Szenarien stärker wachsen als der Input von Beton und Mauerwerk. Das hat zur Folge, dass der Anteil von Rückbaumaterialien, welche aufbereitet werden, steigt.

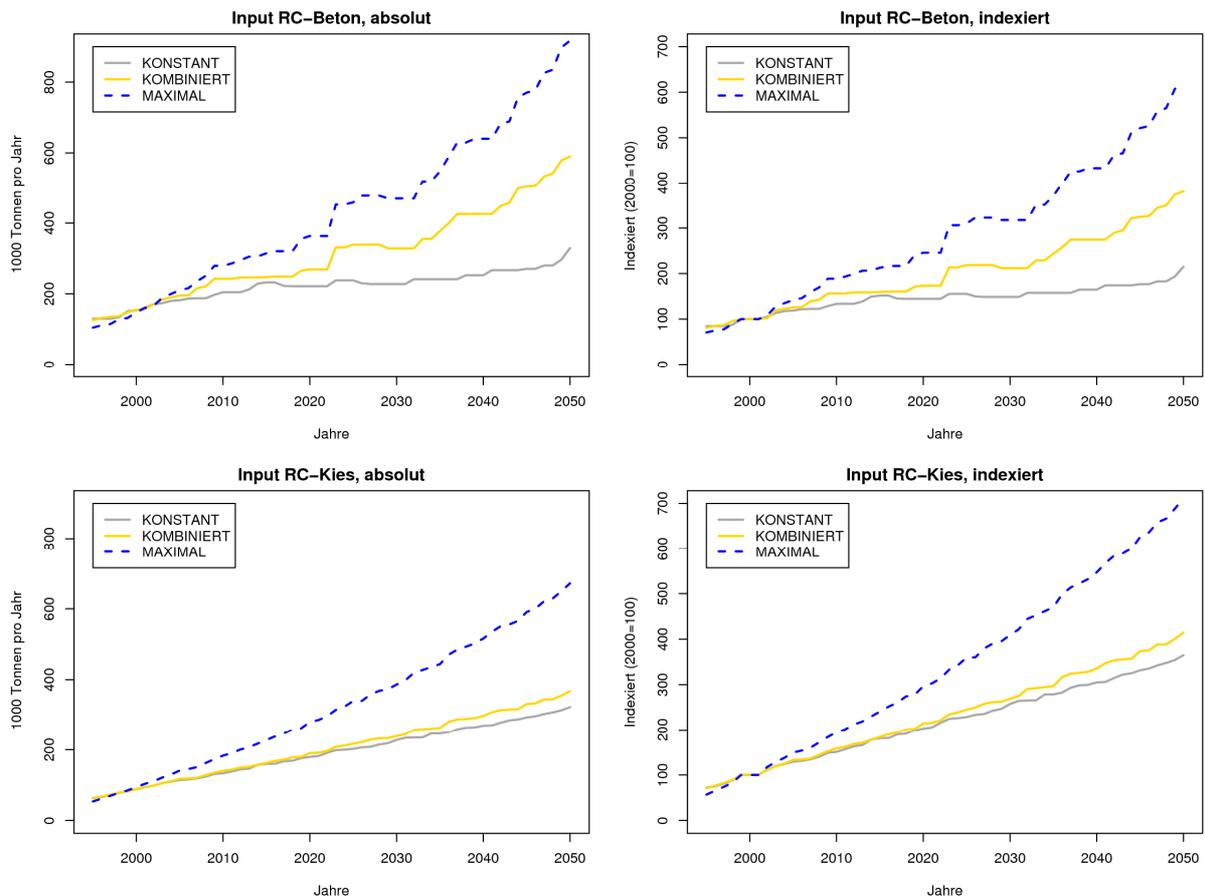


Figur 50 Zeitliche Entwicklung der Outputflüsse aus dem Gebäudebestand und aus den Infrastruktursystemen für die drei Fraktionen Betonabbruch, Mischabbruch und Strassenaufbruch in 1000 Tonnen pro Jahr (linke Grafiken) und auf indexierter Basis mit Bezugsjahr 2000 (rechte Grafiken). Dargestellt sind jeweils diejenigen Anteile der Outputflüsse, welche in den Aufbereitungsprozess gelangen und damit für das Recycling zur Verfügung stehen.

4.2.3 Potentiale beim Einsatz von RC-Baustoffen

Bisher wurden in den letzten Figuren jeweils die totalen Materialflüsse dargestellt. Hier folgt nun der Bezug auf die Inputflüsse von RC-Beton und RC-Kies.

Im Modell wird davon ausgegangen, dass das Wachstum der RC-Baustoffflüsse deutlich stärker ausfällt, als das Wachstum der entsprechenden Baustoffe, welche aus Primärmaterialien hergestellt werden. Deshalb wird der Inputfluss von RC-Beton beispielsweise auch im Szenario KONSTANT zunehmen, obwohl dort der totale Betoninput bis 2050 abnehmen wird.



Figur 51 Die zeitliche Entwicklung der Inputflüsse von RC-Beton (oben) und RC-Kies (unten) in 1000 Tonnen pro Jahr und auf indexierter Basis (Bezugsjahr 2000). Die drei Szenarien zeigen, wie stark das Wachstum von Recycling-Baustoffe sein kann. Auch beim Szenario KONSTANT nehmen die beiden RC-Baustoffe deutlich zu (indexiert, rechts). Im Szenario MAXIMAL sind zusätzlich zur erhöhten Umbautätigkeit im Gebäudebestand und zum Wachstum der Infrastruktursysteme die Anteile von RC-Baustoffen im Input weiter erhöht worden.

Bei den zwei Szenarien KOMBINIERT und MAXIMAL nehmen die RC-Betonflüsse um bis zu 500 % zu (Szenario MAXIMAL im Jahr 2050). Hier sind die zwei Baustoffe «Konstruktionsbeton» und «Magerbeton» zusammengefasst. Die Zunahme von RC-Beton im Szenario MAXIMAL fällt auch deshalb stark aus, weil bei diesem Szenario von einer starken Zunahme beim Einsatz von RC-Magerbeton im Tiefbau ausgegangen wird (vgl. Tabelle 9). Die Zunahme von RC-Kies fällt noch stärker aus als die Zunahme von RC-Beton. Hier betragen die prozentualen Raten 300–400 % (Szenarien KONSTANT, KOMBINIERT) und sogar knapp 700 % beim Szenario MAXIMAL.

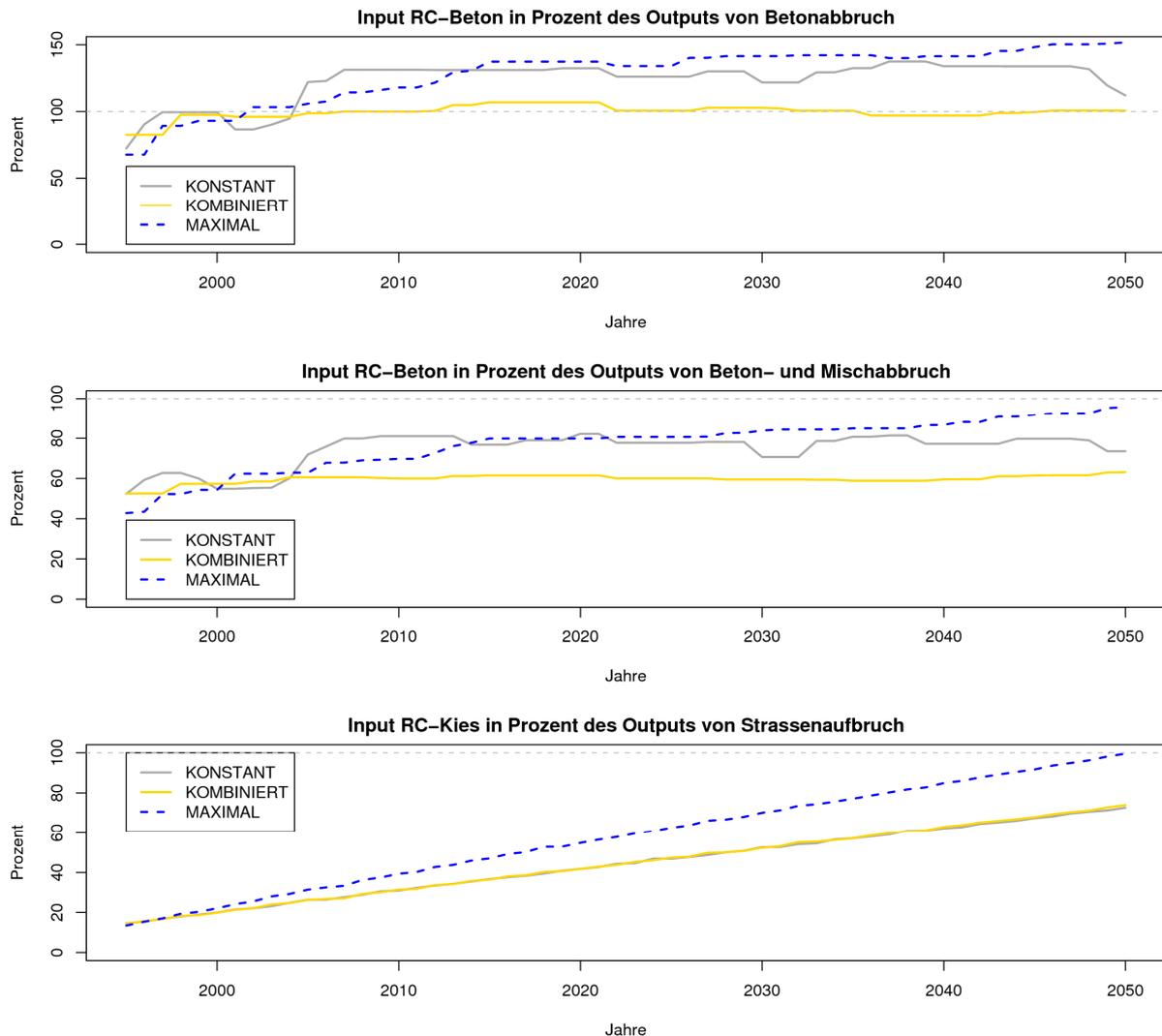
Es stellt sich nun die Frage, ob die starke Zunahme der Inputflüsse der zwei Recyclingbaustoffe RC-Beton und RC-Kies in das System Stadt Zürich durch die in der Stadt anfallenden Outputflüsse gedeckt werden kann. Um diese Frage zu beantworten, sind die Inputflüsse als

Anteil der entsprechenden Outputflüsse berechnet worden. Dabei wird beispielsweise der Inputfluss von RC-Beton dem Outputfluss von Betonabbruch gegenübergestellt und das Verhältnis in Prozenten angegeben. Ist dieser Wert kleiner als 100 %, so bedeutet dies, dass weniger RC-Beton in der Stadt eingesetzt wird, als Betonabbruch aus der Stadt in die Aufbereitung gelangt. Ist der Wert hingegen grösser als 100 %, so könnte zusätzliches Material für die Herstellung von RC-Beton aus dem Umland eingesetzt werden. Die Resultate aus diesen Berechnungen sind in der Figur 52 für drei verschiedene Fälle abgebildet. In der oberen Grafik ist der Input von RC-Beton auf den Output von Betonabbruch bezogen. Der Inputfluss von RC-Beton setzt sich zusammen aus dem Konstruktionsbeton für die Gebäude und dem Magerbeton, der zum grössten Teil für die Infrastrukturbauten verwendet wird. Der Betonabbruch stammt fast ausschliesslich aus dem Gebäudepark. Bei der Infrastruktur wird angenommen, dass der Magerbeton (Hüll- und Füllbeton) in den Strassenaufbruch gelangt. Zusätzlich gelangt sowohl aus den Sanierungen und Rückbau der Gebäude als auch aus der Bewirtschaftung der Infrastruktur ein gewisser Anteil an Betonabbruch in den Mischabbruch. Die entsprechenden Anteile sind in der Tabelle 18 im Anhang aufgeführt. Alle diese Punkte führen dazu, dass der Input von RC-Beton grösser ist als der Output von reinem Betonabbruch.

Wird hingegen der Input von RC-Beton in Prozent des Outputs von Beton- und Mischabbruch zusammen betrachtet, so werden weniger als 100 % des Outputs wieder eingesetzt (Figur 52, mittlere Grafik). Mischabbruch- und Betonabbruchgranulate können beide als Zuschlagstoffe für Konstruktionsbeton dienen. Häufiger wird jedoch Betonabbruchgranulat für die Herstellung von RC-Konstruktionsbeton verwendet und das Mischabbruchgranulat für die RC-Magerbetonproduktion. Bei der pauschalen Betrachtung «Input RC-Beton» (Konstruktions- und Magerbeton) ist es daher sinnvoll, diesen Input dem Output von Beton- und Mischabbruch zusammen gegenüberzustellen. Damit steigt der Anteil von RC-Beton von ca. 50 % auf maximal 90 % des Outputs. Es wäre also für den ganzen Zeitraum bis ins Jahr 2050 und auch im Szenario mit dem grössten RC-Betonbedarf möglich, diesen Input mit den Rückbaumaterialien Betonabbruch und Mischabbruch aus der Stadt Zürich zu decken.

Beim Vergleich der oberen und mittleren Grafik fällt noch ein weiterer Aspekt auf. Der Input von RC-Beton ist im Szenario KONSTANT bezüglich den Outputflüssen höher als im Szenario KOMBINIERT. Dieser Sachverhalt kann damit erklärt werden, dass beim Szenario KONSTANT der Output aufgrund der tiefen Sanierungs- und Rückbauraten relativ gering bleibt. Da aber der Bedarf nach RC-Beton nach den Modellannahmen stark steigt, ist der Inputfluss entsprechend hoch, so dass kaum ein Outputüberschuss zu verzeichnen ist.

Der Inputfluss von RC-Kies beträgt im Jahr 2005 ca. 25 % des Outputs des Strassenaufbruchs. Dieser Anteil erfährt in Abhängigkeit des Szenarios einen starken Anstieg (Figur 52 unten). Da der grösste Teil des Kieses in den Infrastruktursystemen eingesetzt wird, fallen die Resultate für die Szenarien KONSTANT und KOMBINIERT gleich aus, da diese lediglich den Gebäudebestand betreffen. Hingegen nimmt der Inputfluss von RC-Kies im Szenario MAXIMAL stark zu, da dort einerseits die Infrastrukturen wachsen werden und gleichzeitig der Inputfluss von RC-Baustoffen erhöht wird.



Figur 52 Die Entwicklung der Verhältnisse der Input- und Outputflüsse für RC-Beton und RC-Kies in Prozent des Outputs. Oben bezüglich dem Output von Betonabbruch, in der Mitte bezüglich dem Output von Beton- und Mischabbruch zusammen, unten bezüglich dem Output von Strassenaufbruch. Werte grösser als 100 % bedeuten, dass mehr als die gesamte Bezugsgrösse in der Stadt eingesetzt wird. Bei Werten kleiner als 100 % entsteht ein Überschuss des Outputs.

Da bis ins Jahr 2050 der Inputfluss von RC-Kies rund 90 % des Kiesbedarfs ausmacht (Szenario MAXIMAL), sind die Input- und Outputflüsse dann beinahe gleich gross. Für die zwei Fälle, wie sie in der Figur 52 in der mittleren und unteren Grafik dargestellt sind, nähert sich das System Stadt Zürich beim Szenario MAXIMAL einem Fließgleichgewicht an. Da dieses Szenario aber die oberste Grenze des zu erwartenden Wachstums abbildet, wird wahrscheinlich weiterhin weniger Material, welches aus Sanierung und Rückbau anfällt, als RC-Baustoff wieder eingesetzt werden als grundsätzlich möglich wäre. Diese Überschüsse werden im Umland

entweder aufbereitet und dort anschliessend dem Bauwerk zugeführt oder aber im Umland deponiert.

Aus der Sicht des Ressourcenmanagements kann aus den oben gezeigten Figuren geschlossen werden, dass das Potential für einen vermehrten Einsatz von RC-Baustoffen in der Stadt Zürich sehr gross ist. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass nicht jeder RC-Baustoff für jede Anwendung geeignet ist. So ist zum Beispiel RC-Beton aus Mischabbruch im Einsatz als Konstruktionsbeton nur bei nichttragenden Bauteilen sinnvoll. Hingegen kann dieser Beton im Tiefbau als Hüll- und Füllbeton oftmals ohne Probleme eingesetzt werden.

Um die Stoffflüsse auf der Ebene Stadt Zürich näher an wirkliche Kreisläufe zu bringen muss sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau der Einsatz von RC-Baustoffen in jeder möglichen Anwendung so hoch wie möglich sein. Damit können die Mengen von Rückbaustoffen aus der Stadt Zürich, welche heute im Umland verbleiben, minimiert werden.

4.3 Graue Energie und Energiebedarf für den Betrieb der Gebäude

Der Energiebedarf für die Nutzung des Gebäudeparks kann im Vergleich zu heute nur über eine forcierte Umbautätigkeit (Sanierung und Ersatzneubau) halbiert werden. Im Resultatteil ist die Entwicklung des Energiebedarfes anhand der Figur 39 dargestellt. Es zeigt sich, dass Sanierungen bezüglich energetischer Verbesserung wirksamer sind als Neu- und Ersatzneubau, da die Sanierungsrate viel höher ist als die Rückbaurate. Allerdings sind Neubauten im Vergleich zu gleichzeitig sanierten Gebäuden energieeffizienter. Oftmals ist es schwierig, bei einer Sanierung eines Gebäudes Minergie- oder sogar Minergie-P-Standard zu erreichen. Da die «Umbaugeschwindigkeit» des Gebäudebestandes in jedem Fall langsam ist, lohnt es sich, sowohl bei Neubau als auch bei Sanierungen die energetischen Mindestanforderungen so hoch wie möglich anzusetzen. Was heute gebaut wird, steht anschliessend wieder viele Jahre in diesem Zustand im Gebäudepark, bis wiederum eine energetische Sanierung erfolgt oder gar ein Ersatzneubau erstellt wird.

In den folgenden Abschnitten sollen die zwei Aspekte Graue Energie und der Energiebedarf des Bestandes für den Betrieb unter verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert werden.

4.3.1 Graue Energie

Die eingesetzten Werte für die Graue Energie der Baustoffe werden im betrachteten Zeitraum kaum konstant bleiben, da sie den Anteil der Primärenergie enthalten. Falls sich der Energiemix für die Herstellung der Baustoffe in der Zukunft ändert, so müssen dementsprechend auch die Faktoren für die Graue Energie angepasst werden. Im Rahmen dieser Studie war es nicht möglich, Abschätzungen über die Entwicklung des Energiemix bis ins Jahr 2050 zu machen. Daher wurden die Werte aus dem Jahr 2007 für die gesamte modellierte Dauer verwendet.

Es soll an dieser Stelle die Darstellung der Figur 37 noch einmal aufgegriffen werden. Dort werden zwei verschiedene Ansätze zur Berechnung des Inputs der Grauen Energie einander gegenübergestellt. Einerseits finden sich dort die Angaben zum Input der Baustoffe. Dieser Input

wird vom Modell detailliert berechnet. Somit ist für jedes Material bekannt, wie gross die jährliche Menge ist, welche in den Gebäudebestand gelangt. Die einzelnen Materialflüsse können mit den entsprechenden Faktoren ihrer Grauen Energie multipliziert werden, wobei der jährliche Input von Grauer Energie resultiert. Andererseits kann die Abschätzung für die Graue Energie auch über die sanierten und neugebauten Flächen (Energiebezugsflächen EBF) erfolgen. In [Koschenz, Pfeiffer 2005] finden sich dazu folgende Angaben:

- Graue Energie bei einer Sanierung: 1500 MJ/m² EBF
- Graue Energie bei einem Neubau: 4000 MJ/m² EBF

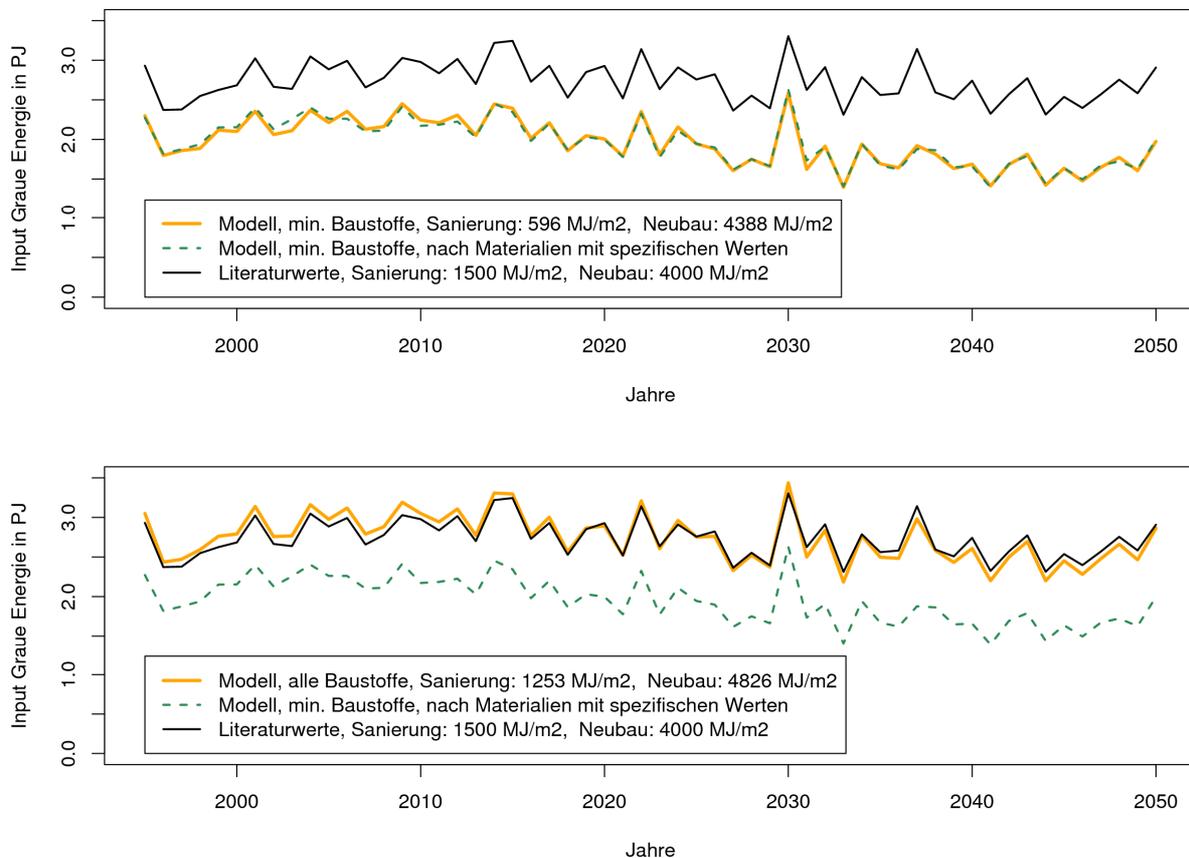
Dieser Ansatz verwendet also pauschale Faktoren, um den Input von Grauer Energie abzuschätzen. Die hier verwendeten Werte beziehen sich auf Wohngebäude. Da für alle anderen Nutzungen keine entsprechenden Faktoren bekannt sind, wurden sie für den gesamten Gebäudebestand verwendet.

In der Figur 37 ist zu sehen, dass diese zwei Ansätze für den Input der Grauen Energie ein ähnliches Resultat ergeben. Allerdings ist der differenzierte Ansatz nach den Materialien um ca. 20 % tiefer als der pauschale Ansatz nach den Flächen. Dies kann damit erklärt werden, dass im hier verwendeten Modell nicht alle Materialien berücksichtigt sind, sondern nur die mineralischen Baustoffe, die Wärmedämmung und die Metalle. Kunststoffe, Holz, Textilien etc. fehlen. Bei der pauschalen Betrachtung über die Flächen sind aber alle Materialien enthalten, es ist somit naheliegend, dass diese Berechnung den höheren Input von Grauer Energie liefert.

In der Folge interessierte nun, wie gross denn die pauschalen Faktoren für die sanierten und neugebauten Flächen sein müssten, um nur die hier im Modell verwendeten Materialien abzubilden. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, um die detaillierte Berechnung nach den Materialien mit den entsprechenden pauschalen Werten in Übereinstimmung zu bringen. Mit Hilfe des Programms MS EXCEL und der darin enthaltenen Funktion *solver* konnten die Abweichung zwischen der Berechnung nach Materialien und der Berechnung nach EBF minimiert werden. Das Resultat dieser Berechnung schlägt die pauschalen Werte von 596 MJ/m² EBF (Sanierung) und 4388 MJ/m² EBF (Neubau) vor. Diese Werte wurden mit den bekannten Daten der sanierten und neugebauten Energiebezugsflächen multipliziert. Das Resultat ist in der Figur 53 (oben) exemplarisch für das Szenario KONSTANT abgebildet. Hier sind nicht die geglätteten Daten, sondern die exakten jährlichen Werte dargestellt. Die Abweichung zwischen der genaueren Berechnung nach dem jährlichen Inputflüssen der einzelnen Materialien (grün gestrichelt) und der pauschale Berechnung mit den eigenen Faktoren (orange) ist effektiv minimal.

Es stellt sich nun die Frage, ob die Differenz zu den bekannten Werten aus der Literatur, welche pauschal mit allen Materialien rechnen, auch bestimmt werden kann. Dazu wurde angenommen, dass bei einer Sanierung das Mengenverhältnis der Materialien anders ist als bei einem Neubau. Dies gilt insbesondere für diejenigen Materialien, welche im hier verwendeten Modell nicht erfasst sind. Diese werden bei einer Sanierung wohl vermehrt ersetzt als die mineralischen Baustoffe. Wiederum mit MS EXCEL und der *solver*-Funktion konnte dieser Unterschied bestimmt werden. Dazu wird angenommen, dass die zusätzlichen Materialien, welche im Modell

nicht enthalten sind, weitere 10 % der bereits berechneten 4388 MJ/m^2 EBF ausmachen, d. h. es kommen beim Neubau 438 MJ/m^2 EBF hinzu. Dieser Anteil kann bei den Sanierungen 1.5 mal so gross sein, da bis zu einer Sanierung der Innenausbau bereits mehrfach erneuert wurde. Somit fallen bei einer Sanierung zusätzliche 657 MJ/m^2 EBF für die nichtmineralischen Baustoffe hinzu. Insgesamt ergibt diese Berechnung die Werte 1253 MJ/m^2 EBF bei Sanierungen und 4826 MJ/m^2 EBF bei Neubauten für die pauschale Berechnung nach den Energiebezugsflächen für alle Materialien (Tabelle 12).



Figur 53 Vergleich zweier Methoden zur Berechnung der Grauen Energie. Die graue und die gestrichelte grüne Linien entsprechen den Werten, wie sie bereits in der Figur 37 abgebildet sind. Die graue Linie wurde mit den Faktoren von 1500 MJ/m^2 EBF für Sanierungen und 4000 MJ/m^2 EBF für Neubauten berechnet [Koschütz, Pfeiffer, 2005]. Die gestrichelte grüne Linie verwendet für den gesamten Input in den Gebäudebestand die entsprechenden spezifischen Werte der Grauen Energie für jedes Material. Die orange Linie benutzt ebenfalls pauschale Faktoren für Sanierung und Neubau, aber selber berechnete. Diese haben den Wert von 596 MJ/m^2 EBF (Sanierung) und 4388 MJ/m^2 EBF für Neubauten (oben, mineralische Baustoffe, Wärmedämmung und Metalle) bzw. 1253 und 4826 MJ/m^2 EBF für alle Baustoffe (unten).

Tabelle 12 Berechnete Werte für die pauschalen Faktoren der Grauen Energie nach den Energiebezugsflächen von Sanierung und Neubau und Vergleich mit bekannten Literaturwerten.

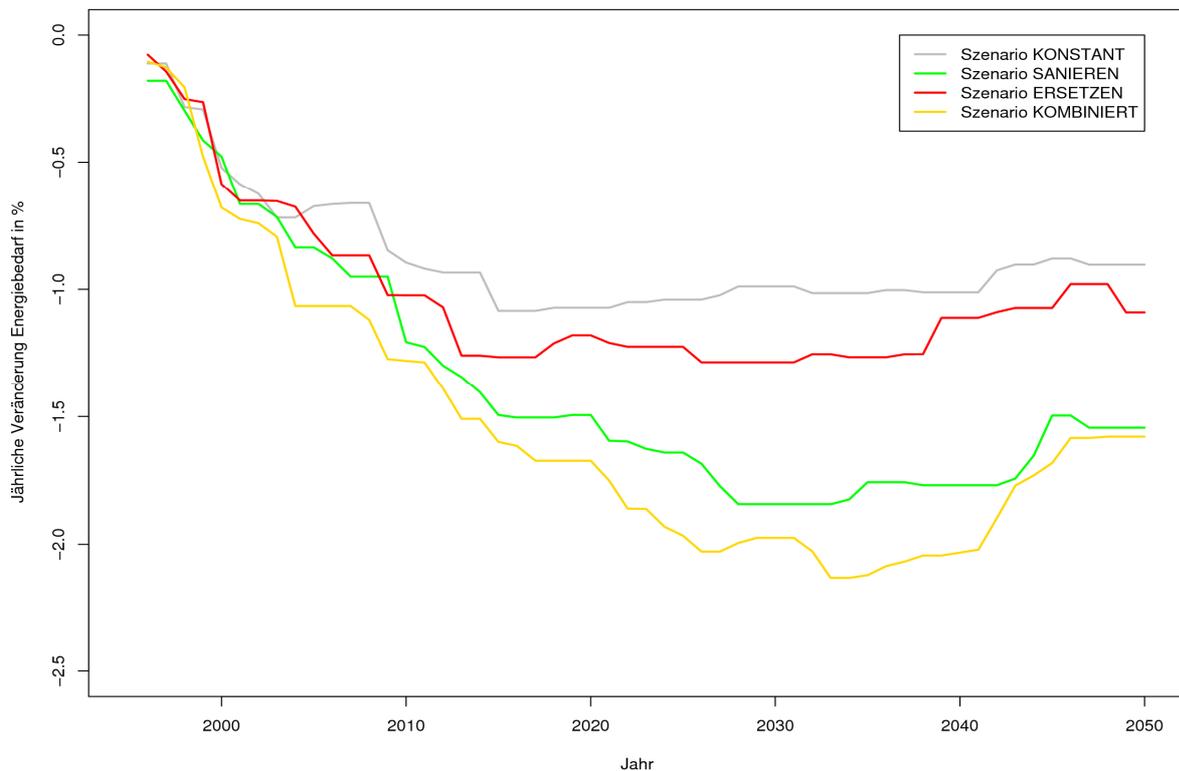
	Sanierung MJ/m ²	Neubau MJ/m ²
Modell, mineralische Baustoffe	596	4'388
Modell, nichtmineralische Baustoffe	1.5 * 438 = 657	1.00 * 438 = 438
Modell, alle Baustoffe	1'253	4'826
Koschenz, Pfeiffer 2005	1'500	4'000

Der hier ermittelte Wert von 4826 MJ/m² EBF passt mit weiteren Werten, die in [Koschenz, Pfeiffer 2005] angegeben werden knapp überein. Dort reichen die entsprechenden Angaben von 1200 bis 4800 MJ/m² EBF. Die Autoren selber verwenden für die heutige Bauweise einen Wert von 3200 MJ/m² EBF, welcher zukünftig auf 2000 MJ/m² EBF sinken könnte. Dabei nehmen sie an, dass der fossile Anteil der Herstellungenergie von 60 % auf 40 % sinken wird.

Es ist klar, dass die hier berechneten Werte für die pauschale Berechnung nach den sanierten und neugebauten Energiebezugsflächen nicht «exakt» sind. Es ist aber interessant, dass mit den zwei grundsätzlich verschiedenen Ansätzen (nach Input der Materialien bzw. nach den Flächen) eine doch recht gute Übereinstimmung zu bekannten Daten erreicht werden kann. Zudem ist die Betrachtung hier über den gesamten Bestand gemacht – unabhängig von der Nutzung der Gebäude. Die verschiedenen Literaturangaben hingegen beziehen sich immer auf einzelne konkrete Objekte, welche differenziert untersucht wurden. Die dort erhaltenen Werte haben jeweils eine breite Streuung.

4.3.2 Entwicklung der Betriebsenergie

Die Betriebsenergie des Gebäudebestandes – ob als Endenergie oder Primärenergie ausgedrückt – wird im Laufe der Zeit wegen der energetisch günstigeren Bauweise abnehmen. Diese Abnahme kann als jährliche Veränderung bezüglich dem Vorjahr dargestellt werden (Figur 54). Ausgehend von einem ähnlichen Startwert bei -0.5 % im Jahr 2000 verharrt die Abnahme im Szenario KONSTANT ab dem Jahr 2015 bei einem Wert von ca. -1 % pro Jahr. Die Änderung im Szenario ERSETZEN ist etwas stärker, da durch das anheben der Rückbaurrate mehr Gebäude ersetzt werden. Insgesamt bewirken diese Ersatzneubauten bezüglich des totalen Endenergiebedarfs des gesamten Bestandes relativ wenig. Die zwei Szenarien ERSETZEN und KOMBINIERT hingegen werden bis ins Jahr 2030 eine verstärkte Abnahme des jährlichen Energiebedarfs bewirken, da mit der Erhöhung der Sanierungsrate ein viel grösserer Anteil der Gebäude eine energetische Verbesserung erfährt. Ab dem Jahr 2040 wird bei diesen Szenarien der grösste Teil der Gebäude soweit umgebaut sein, dass unter den vorgegebenen Bedingungen das Tempo der Erhöhung der Energieeffizienz des Gebäudeparks reduziert wird.



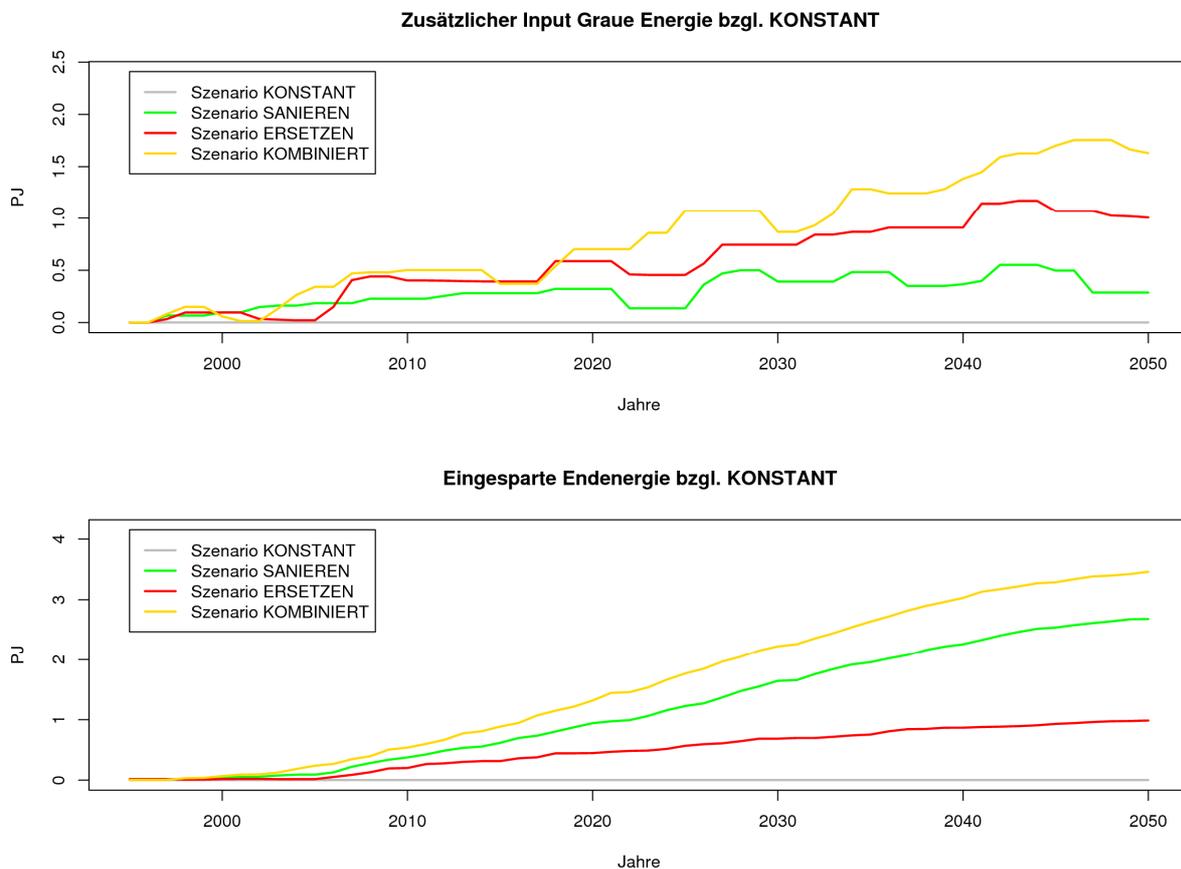
Figur 54 Zeitliche Entwicklung der jährliche Änderung des Endenergiebedarfs des Gebäudeparks für die verschiedenen Szenarien. Im Szenario KONSTANT wird die höchste Änderungsrate bei gut -1 % pro Jahr liegen, beim Szenario KOMBINIERT hingegen wird sie bis auf über -2.2 % sinken.

4.3.3 Vergleich von Grauer Energie und der Betriebsenergie

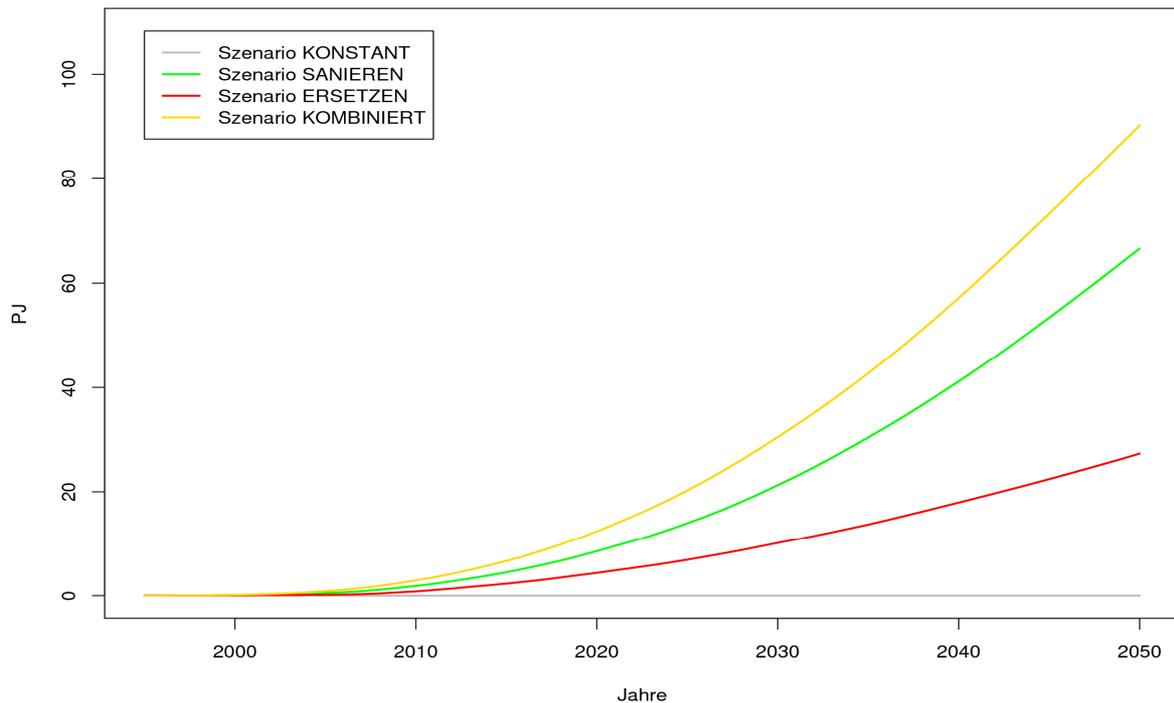
Bei der Betrachtung der Energieeffizienz sollte auch die mit dem Umbau des Gebäudeparks verbundene Graue Energie mit einbezogen werden. Aus diesem Grund wurde der *zusätzliche* Bedarf an Grauer Energie, welche für den Umbau zu einem Gebäudepark mit hoher Energieeffizienz notwendig ist, für die verschiedenen Szenarien berechnet. Sämtliche Berechnungen beziehen sich auf das Referenzszenario KONSTANT. Dies bedeutet, dass die Graue Energie dieses Szenarios die Bezugsgrösse für die anderen Szenarien bildet. In der Figur 54 (oben) ist die Entwicklung des zusätzlichen Bedarfs an Grauer Energie für die energieeffizienteren Szenarien dargestellt. Der zusätzliche Bedarf an Grauer Energie ist im Szenario KOMBINIERT am grössten, da dort am meisten Material ersetzt werden muss (Rückbaurate und Sanierungsrate erhöht). Das Szenario SANIEREN weist den geringsten zusätzlichen Bedarf an Grauer Energie aus, da bei einer Sanierung nur ca. 10 % des Gebäudematerials ersetzt wird. In der gleichen Figur (unten) ist die im Vergleich zum Szenario KONSTANT eingesparte Betriebsenergie (Endenergie) dargestellt. Beim Szenario KOMBINIERT ist das Einsparpotential bezüglich Betriebsenergie am grössten. Die Einsparung in Szenario ERSETZEN liegt nur wenig über dem Wert des Szenarios KONSTANT.

Das Szenario SANIEREN (grün) hat einen nur geringfügig höheren Input von Grauer Energie in den Gebäudepark zur Folge als das Szenario KONSTANT. Der Nutzen hingegen – die eingesparte Endenergie aufgrund der energetisch besseren Bauweise – ist im Verhältnis zur Grauen Energie aber viel grösser als im Szenario ERSETZEN.

Bei dem Vergleich, wie er mit den zwei Grafiken in der Figur 54 gemacht wird, sollte beachtet werden, dass die Graue Energie den jährlichen Input auf Grund der Bautätigkeit beschreibt. Hingegen resultiert der Bedarf nach Endenergie auf dem jeweiligen Bestand, welcher sich aus der Summe aller Eingriffe in den Gebäudepark zusammensetzt. Die Graue Energie beschreibt damit einen aktuellen Wert, der von aussen in den Gebäudepark gelangt, der Endenergiebedarf ist hingegen eine immanente Grösse des jeweiligen Gebäudebestandes.



Figur 55 Gegenüberstellung der Entwicklung der Grauen Energie und der Endenergie für vier Szenarien in Petajoule. Die Figur zeigt in der oberen Grafik den zusätzlichen Input von Grauer Energie bezüglich des Szenarios KONSTANT. In der unteren Grafik ist die eingesparte Endenergie bezüglich des Szenarios KONSTANT aufgetragen. Bei dieser Darstellung ist zu beachten, dass die Graue Energie nur von der jährlichen Bautätigkeit abhängt. Die Berechnung des Endenergiebedarfs hingegen beruht auf dem gesamten Bestand mit allen in der Vergangenheit getätigten Eingriffen.

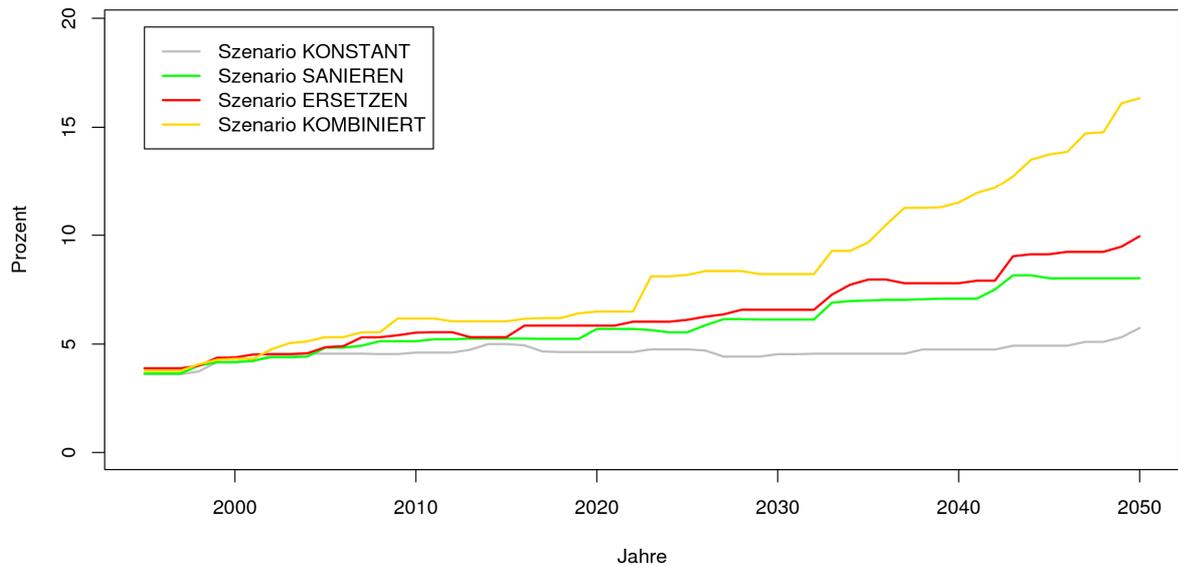


Figur 56 Entwicklung der *kumulierten* Endenergie in Petajoule, welche im Gebäudepark im Vergleich zum Szenario KONSTANT eingespart werden kann.

Die Figur 56 zeigt abschliessend die kumulierte Endenergie des Gebäudeparks im modellierten Zeitraum, welche in den anderen Szenarien im Vergleich zum Szenario KONSTANT eingespart werden kann. Ausgehend von einem Endenergiebedarf im Jahr 2007 von ca. 18 PJ/Jahr, können im Szenario KOMBINIERT bis ins Jahr 2050 rund 90 PJ eingespart werden. Das entspricht somit fünf Mal dem gesamten heutigen Jahresverbrauch für Warmwasser und Raumwärme. Im Szenario ERSETZEN, d. h. wenn lediglich die Rückbaurate erhöht wird, würde bis 2050 knapp der zweifache Jahresverbrauch von heute eingespart. Der Unterschied zwischen den Szenarien – kumuliert auf die modellierte Zeit – ist also beachtlich.

In der Figur 57 ist der zeitliche Verlauf des Verhältnisses des Inputs von Grauer Energie zur Betriebsenergie (Primärenergie) des Gebäudebestandes abgebildet. Sowohl die materialspezifischen Werte der Grauen Energie wie auch der Primärenergiefaktor (PEF) wurden für die modellierte Zeit konstant belassen. Im Szenario KONSTANT bleibt das Verhältnis relativ konstant um 5 %, da das sich Wachstum des Bestandes abschwächt (Input Graue Energie sinkt) und gleichzeitig der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser sinkt (Primärenergie sinkt ebenfalls). Im Szenario KOMBINIERT hingegen verändert sich das Verhältnis stark von rund 4 % im Jahr 1995 auf über 15 %, da einerseits der Primärenergiebedarf stark abnimmt (der Bestand wird rasch umgebaut), gleichzeitig aber steigt der damit verbundene Material- und Graue Energie-Input stark an.

Die zeitliche Entwicklung des Verhältnisses der Grauen Energie zur Betriebsenergie (Primärenergie) zeigt den zunehmenden Stellenwert der Grauen Energie sehr gut auf. Aus diesem Grund muss diesem Aspekt in Zukunft deutlich mehr Beachtung geschenkt werden.



Figur 57 Das Verhältnis des Inputs von Grauer Energie zur Betriebsenergie (Primärenergie) des Gebäudebestandes im zeitlichen Verlauf in Prozenten. Sowohl die Werte für die Graue Energie der Baustoffe wie auch der Primärenergiefaktor (PEF) wurden für die modellierte Zeit konstant belassen. Im Szenario KONSTANT bleibt das Verhältnis relativ konstant um 5 %, da sich das Wachstum des Bestandes abschwächt (Input Graue Energie sinkt) und gleichzeitig der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser sinkt (Primärenergie). Im Szenario KOMBINIERT hingegen verändert sich das Verhältnis stark von rund 4 % im Jahr 1995 auf über 15 %, da einerseits der Primärenergiebedarf stark abnimmt (der Bestand wird rasch umgebaut), gleichzeitig aber steigt der damit verbundene Material- und Graue Energie-Input stark an.

Es muss dafür gesorgt werden, dass auch die Graue Energie in den einzusetzenden Materialien so weit wie möglich reduziert wird. Gleichzeitig soll dieser Aspekt auch bei der Strategien zum Umbau des Gebäudeparkes berücksichtigt werden. Eine energetische Sanierung benötigt immer nur einen Bruchteil der Grauen Energie eines (Ersatz-)Neubaus, da bei einer Sanierung der grösste Teil der Bausubstanz erhalten bleibt. Gleichzeitig fallen bei einer Sanierung auch um eine Grössenordnung weniger Rückbaumaterialien an als bei dem Rückbau desselben Gebäudes

5 FAZIT

Mit dem in der ersten Phase entwickelten Modell für die Stadt Zürich konnten die mineralischen Baustoffflüsse und -lager im Gebäudebestand und den Infrastrukturnetzen für das Jahr 2005 sinnvoll abgeschätzt werden. Das in der zweiten Phase entwickelte dynamisch Modell ermöglicht nun die Berechnung der zeitlichen Veränderung der Materiallager sowie der Input- und Outputflüsse in Abhängigkeit von exogenen Faktoren. Zudem können weitere Aspekte wie beispielsweise die mit den Materialflüssen verbundene Graue Energie oder der Endenergieverbrauch bei der Nutzung des Gebäudeparks mit einbezogen werden. Im Rahmen der Studie wurden verschiedene Szenarien dynamisch modelliert, um die Auswirkung von intensivierten Sanierungs- und Rückbautätigkeit auf das System Stadt Zürich aufzuzeigen. Ebenso wurde ein höherer Input von Recycling-Baustoffen sowie von geänderten Erneuerungsraten der Infrastruktursysteme simuliert. Aus den verschiedenen Szenarien konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden.

Materiallager und -flüsse

- Der Gebäudepark in der Stadt Zürich befindet sich noch immer in einer Wachstumsphase.
- Gemäss den Annahmen im Gebäudebestandsmodell wird das Gebäudevolumen bis zum Jahr 2050 um über 30 % von 158 Mio. m³ auf 203 Mio. m³ zunehmen.
- Dementsprechend wird auch das Materiallager anwachsen, wobei sich die Zusammensetzung der Materialien in Abhängigkeit des gewählten Szenarios verändern wird; der Betonanteil wird auf Kosten des Mauerwerks steigen.
- Auch wenn die Längen der Infrastruktursysteme leicht zunehmen werden, ist ihr Wachstum im Vergleich zum Gebäudepark eher gering.
- Neben dem Wachstum des Gebäudeparks und der Infrastruktursysteme sind es die Sanierungs- und Rückbauraten, welche grosse Input- und Outputflüsse generieren. Deren Zunahme ist stark von der gewählten Strategie abhängig (siehe Szenarien).
- Bleiben die Sanierungs- und Rückbauraten auf dem Niveau von 2000–2005, dann nehmen die totalen Inputflüsse langsam ab, da sich das Wachstum des Gebäudebestandes verlangsamt. Die totalen Outputflüsse nehmen aber trotzdem zu, da der Gebäudebestand in absoluten Zahlen anwächst.
- Erhöhen sich die Sanierungs- und Rückbauraten (bzw. Ersatzneubauraten) jedoch bis im Jahr 2050, wie dies die Szenarien SANIEREN, ERSETZEN und KOMBINIERT voraussetzten, dann wachsen die Input- und Outputflüsse stark an.

Einsatz von Recycling-Baustoffen

- Das Potential für den Einsatz von RC-Baustoffen wird nicht genügend ausgeschöpft. Der Anteil von RC-Beton und RC-Kies muss stark erhöht werden, um die Materialflüsse in Richtung Fließgleichgewicht zu bringen.
- In allen modellierten Szenarien übertrifft der Output der Rückbaumaterialien, welche zu RC-Baustoffen aufbereitet werden, den entsprechenden Input in das System Stadt Zürich.
- Daher gilt es, den Anteil von RC-Beton in gebundener Form für den Bau der Gebäude so wie den Input von RC-Kies für die Überdeckung der Werkleitungen und die Foundation der Strassen weiter zu steigern, um das System in Richtung Fließgleichgewicht zu bringen.

Bei jeder Anwendung in der Stadt Zürich sollte der Anteil von RC-Baustoffen so hoch wie technisch möglich gewählt werden. Dies bedingt, dass neben einer verstärkten Kommunikation auch die Koordination für das Vorgehen verbessert wird. Optimal wäre daher eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Hoch- und Tiefbau bei diesen Punkten. **In Zukunft sollten deshalb das Amt für Hochbauten und das Tiefbauamt gemeinsam intern und extern thematisieren und kommunizieren, dass der Einsatz von RC-Baustoffen weiter erhöht werden soll.** Die Ausarbeitung von griffigen Massnahmen könnte dabei im Rahmen von gemeinsamen Projekten erfolgen. Nur so wird es möglich sein, ein aktives und vorausschauendes Materialmanagement zu entwickeln, welches von sämtlichen beteiligten Akteuren mitgetragen wird.

Energetische Aspekte

Der Aufbau des Modells wurde so gestaltet, dass sich weitere wichtige Fragestellungen bearbeitet lassen. So wurden im Laufe der Studie die energetischen Aspekte in das Modell mit einbezogen. Damit lassen sich die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Grauen Energie und des Endenergiebedarfs des Gebäudeparks dynamisch modellieren.

- Die Graue Energie, die in den Gebäudepark der Stadt Zürich gelangt, ist abhängig vom natürlichen Wachstum des Bestandes sowie von den Sanierungs- und Rückbauraten (siehe Szenarien).
- Der Input von Grauer Energie in den Gebäudebestand ist bei Sanierungen um eine Grössenordnung geringer als bei Ersatzneubauten.
- Bis ins Jahr 2050 wird sich die Endenergie zur Nutzung des Gebäudeparks weiter reduzieren. Je nach Szenario wird die Reduktion stärker oder weniger stark ausfallen bzw. die Reduktion wird schneller oder weniger schnell erreicht.
- Da die Sanierungsrate um einen Faktor 10 grösser ist als die Rückbaurate, bewirkt eine Erhöhung der Sanierungsrate einen grösseren Effekt als die proportionale

Erhöhung der Rückbaurrate, obwohl die Ersatzneubauten tendenziell eine energetisch bessere Bauweise aufweisen als sanierte Altbauten.

- **Um eine Halbierung des Primärenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser bis ins Jahr 2050 zu erreichen, müssen sowohl die Sanierungs- als auch die Rückbauraten erhöht werden.**

Im Allgemeinen lassen sich mit Ersatzneubauten energetisch bessere Lösungen erzielen als bei Sanierungen. Allerdings liegen die Rückbauraten um einen Faktor 10 tiefer als die Sanierungsraten, wie sich aus den Daten für die Stadt Zürich erheben liess (Tabelle 6 auf Seite 39). Dies führt dazu, dass eine Erhöhung der Ersatzneubauraten um den Faktor 3 bis 4, wie dies im Szenario KOMBINIERT angenommen wurde, einen geringeren Effekt auf den energetischen Absenkpfad des Gebäudeparks hat, als die entsprechende Erhöhung der Sanierungsraten. Neu- und Ersatzneubauten mit Baujahr ab heute weisen bereits einen guten Energiestandard auf. Ihr Anteil wird aber bis im Jahr 2050 je nach Szenario erst 35–45 % des Bestandes ausmachen. Das heisst, dass auch im ambitionsesten Szenario der Bestand zu mehr als der Hälfte aus Gebäuden bestehen wird, deren Baujahr vor 1995 liegt. Es gilt also, die Sanierungsrate zu erhöhen und den Energiestandard bei Sanierungen deutlich zu verbessern, um den Energieverbrauch des gesamten Gebäudebestandes wirksam zu senken.

Es stellt sich nun die Frage, ob die Rückbauraten noch stärker erhöht werden könnten. Dies wäre theoretisch möglich, ist aber in der Realität kaum zu erreichen. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass der energetische Aspekt beim Entscheid, einen Ersatzneubau zu errichten, eine untergeordnete Rolle spielt. Hier haben wirtschaftliche und soziale Faktoren wie die Verbesserung der Ausnutzung oder nachfragegerechte Grundrisse mehr Gewicht. Bei der Sanierung hingegen haben die energetischen Aspekte einen deutlich höheren Stellenwert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Ausmass der Erhöhung und das Beschleunigungspotential bei der Sanierungsrate noch ausgeprägter sein kann.

Bedeutung des Ressourcenmanagements

Das erarbeitete Modell und die Resultate aus der dynamischen Modellierung von verschiedenen Szenarien stellen wichtige Grundlagen dar, um ein nachhaltiges Ressourcenmanagement in der Stadt Zürich zu betreiben. Es bildet die Grundlage für eine umfassende Betrachtung eines komplexen Systems. Die gleichzeitige Modellierung der mineralischen Baustoffflüsse, der Grauen Energie und der Endenergie aus der Nutzung des Gebäudeparks auf der Ebene einer Stadt und mit dem zugrunde gelegten Detaillierungsgrad ist zum jetzigen Zeitpunkt wohl einzigartig. Anhand der Szenarien lassen sich die Auswirkungen von verschiedenen Strategien, hier insbesondere der Umbaustrategien, im vornhinein quantifizieren. Damit kann einerseits verhindert werden, dass falsche Anreize geschaffen werden, andererseits wird es möglich, eingeschlagene Strategien zu optimieren. Das Modell kann von der Stadt Zürich als Ressourcenmanagementtool verwendet werden, mit dem sich die eingeschlagenen Ressourcenstrategien überprüfen und weiterentwickeln lassen. Damit wird ein umfassendes und nachhaltiges Energie- und Ressourcenmanagement möglich.

Literaturverzeichnis

- [BFE 2004] Bundesamt für Energie BFE, 2004.
Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen, Perspektiven bis 2035. Bern.
- [BUWAL, 2001] BUWAL (Hrsg.), Wüest & Partner, 2001.
Bauabfälle Schweiz - Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege.
Band I und II. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- [ECO₂, 2007] ECO₂-Rechner für die Stadt Zürich
- [KBOB 2009] KBOB, 2009/1. Ökobilanzdaten im Baubereich.
Empfehlung KBOB/eco-bau/IPB, Stand 2007.
- [Koordiniertes Bauen, 2008] M. Schneider, S. Rubli, 2008.
Koordiniertes Bauen der Infrastrukturwerke in der Stadt Zürich.
- [Koschenz, Pfeiffer, 2005] M. Koschenz, A. Pfeiffer, 2005.
Potential Wohngebäude: Energie- und Gebäudetechnik für die 2000-Watt-Gesellschaft.
1. Auflage. Faktor Verlag. Zürich
- [Kost, 2006] M. Kost, 2006. Langfristige Energieverbrauchs- und CO₂-Reduktionspotentiale im
Wohngebäudesektor der Schweiz.
Diss. ETH Nr. 16421. ETH Zürich.
- [Kt. Aargau, 1995] Kanton AG (Hrsg.), Wüest & Partner, 1995.
Kantonale Abfallplanung: Perspektive Bauabfälle.
Baudepartement des Kantons Aargau, Aarau.
- [Lichtensteiger 2006] Th. Lichtensteiger (Hrsg.), 2006. Bauwerke als Ressourcennutzer und
Ressourcenspender. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich.
- [R] R Development Core Team (2006). R: A language and environment for statistical computing.
R Foundation for Statistical Computing,
Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- [RODBC] RODBC: ODBC database access. R package version 1.1-9.
Originally Michael Lapsley and from Oct 2002 B. D. Ripley (2007).
- [Schneider, Rubli 2007] M. Schneider, S. Rubli, 2007.
Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich.
Wertstoff-Börse GmbH, Schlieren.
- [SfS, R] <http://stat.ethz.ch/consulting/Statistiksoftware/R>
- [SIA, 2004] SIA Effizienzpfad Energie.
Statusbericht Graue Energie, Grundlagen zur Dokumentation SIA D 0216. 2004
- [Statistik Stadt Zürich, 2007] Statistik Stadt Zürich, 2007.
Bevölkerungsprognosen für die Stadt Zürich 2010-2025
- [Stat. JB07] Statistik Stadt Zürich, 2007. Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 2007.

Abbildungsverzeichnis

Figur 1 Die Veränderung des Gebäudebestandes.....	iii
Figur 2 Die Entwicklung des Gebäudebestandes für die vier Szenarien.....	v
Figur 3 Das System Stadt Zürich im Jahr 2050.....	vi
Figur 4 Der Endenergiebedarf des Gebäudeparks für Raumwärme und Warmwasser.....	viii
Figur 5 Die Lager und Flüsse der mineralischen Materialien im System Stadt Zürich.....	4
Figur 6 Die totalen Lager und Flüsse der mineralischen Materialien.....	5
Figur 7 Die Entwicklung der Einwohnerzahl der Stadt Zürich.....	7
Figur 8 Die modellierte Entwicklung der Beschäftigtenzahl.....	8
Figur 9 Die spezifischen Energiebezugsflächen.....	9
Figur 10 Die Energiebezugsflächen für «Wohnen» und «Arbeiten».....	10
Figur 11 Die Entwicklung der Nachfrage nach Gebäudevolumen.....	12
Figur 12 Die Annahmen über die Verteilung des Energiestandards.....	14
Figur 13 Das «typische» Gebäudevolumen.....	16
Figur 14 Die Altersverteilung des Bestandes und der der sanierten Mehrfamilienhäuser.....	17
Figur 15 Die Altersverteilungen für die MFH und die DLG.....	18
Figur 16 Der Bestand der Infrastrukturnetze in der Stadt Zürich.....	24
Figur 17 Das Schema der verschiedenen Szenarien.....	27
Figur 18 Die gewählten Raten für Sanierungen und Rückbauten.....	30
Figur 19 Die zeitliche Entwicklung des Energiebedarfs der Gebäude.....	32
Figur 20 100 Realisierungen für die Sanierungen von MFH und DLG.....	37
Figur 21 100 Realisierungen des Modells für den Gebäudebestand.....	38
Figur 22 100 Realisierungen der zwei Szenarien KONSTANT und KOMBINIERT.....	39
Figur 23 Die Entwicklung des Gebäudevolumens in der Stadt Zürich.....	41
Figur 24 Szenario KONSTANT: Eine detailliertere Analyse des Gebäudevolumens.....	42
Figur 25 Zeitliche Entwicklung der Materiallager in der Stadt Zürich.....	44
Figur 26 Die zeitliche Entwicklung der Input- und Outputflüsse für das Szenario KONSTANT.....	45
Figur 27 Die zeitliche Entwicklung der Input- und Outputflüsse des Gebäudeparks.....	46
Figur 28 Szenario KONSTANT: Detaillierte Darstellung der Inputflüsse und Outputflüsse.....	47
Figur 29 Das System Stadt Zürich im Jahr 1995.....	48
Figur 30 Das System Stadt Zürich im Jahr 2050 für das Szenario KONSTANT.....	49
Figur 31 Der Vergleich der vier Szenarien.....	51

Figur 32 Die Entwicklung des Gebäudebestandes im Szenario SANIEREN.....	52
Figur 33 Die Entwicklung des Gebäudebestandes im Szenario ERSETZEN.....	53
Figur 34 Die Entwicklung des Gebäudebestandes im Szenario KOMBINIERT.....	53
Figur 35 Die totalen Materiallager des Systems Stadt Zürich.....	54
Figur 36 Die Input- und Outputflüsse des Gebäudeparks der vier Szenarien.....	56
Figur 37 Zeitliche Entwicklung des Materialinputs und der damit verbundenen Grauen Energie.....	57
Figur 38 Die Entwicklung der Baustoffflüsse und der Grauen Energie für die vier Szenarien.....	58
Figur 39 Die Entwicklung des Energiebedarfes für für Raumwärme und Warmwasser.....	60
Figur 40 Vergleich der Inputflüsse von RC-Baustoffen und der Outputflüsse.....	62
Figur 41 Die zeitliche Entwicklung der Input- und Outputflüsse.....	65
Figur 42 Inputflüsse der RC-Baustoffe und Outputflüsse der Rückbaumaterialien.....	66
Figur 43 Inputflüsse der RC-Baustoffe und Outputflüsse der Rückbaumaterialien Szenario RC+.....	67
Figur 44 Veränderter Erneuerungsraten und Wachstums der Infrastrukturnetze.....	69
Figur 45 Entwicklung der Materiallager in der Stadt Zürich für drei Szenarien.....	71
Figur 46 Die zeitliche Entwicklung der totalen Inputflüsse.....	73
Figur 47 Der Inputfluss von Beton.....	73
Figur 48 Die zeitliche Entwicklung der Inputflüsse von Mauerwerk in das System Stadt Zürich.....	74
Figur 49 Die zeitliche Entwicklung der Inputflüsse von Kies/Sand in das System Stadt Zürich.....	74
Figur 50 Die zeitliche Entwicklung der Outputflüsse.....	76
Figur 51 Die zeitliche Entwicklung der Inputflüsse von RC-Beton und RC-Kies.....	77
Figur 52 Die Entwicklung der Verhältnisse der Input- und Outputflüsse für RC-Beton und RC-Kies ...	79
Figur 53 Vergleich zweier Methoden zur Berechnung der Grauen Energie.....	82
Figur 54 Zeitliche Entwicklung der jährliche Änderung des Endenergiebedarfs.....	84
Figur 55 Gegenüberstellung der Entwicklung der Grauen Energie und der Endenergie.....	85
Figur 56 Entwicklung der kumulierten Endenergie.....	86
Figur 57 Das Verhältnis des Inputs von Grauer Energie zur Betriebsenergie.....	87
Figur 58 Die berechneten Geschosshöhen der Gebäude.....	97
Figur 59 Die «typischen» Grössen der Gebäude.....	98
Figur 60 Gebäudevolumen und Anzahl von Sanierungen der MFH und DLG.....	103
Figur 61 Der Input von Masse, Grauer Energie im Szenario SANIEREN.....	104
Figur 62 Der Input von Masse, Grauer Energie im Szenario ERSETZEN.....	105
Figur 63 Der Input von Masse, Grauer Energie im Szenario KOMBINIERT.....	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Die vier Szenarien für die Entwicklung des Gebäudebestandes und ihr Kurzbeschrieb.....	ii
Tabelle 2	Nutzungsspezifische Faktoren zur Berechnung der Bruttogeschossfläche	11
Tabelle 3	Fristen nach Sanierung und Neubau.....	19
Tabelle 4	Die Dimensionen der Infrastruktursysteme in der Stadt Zürich	25
Tabelle 5	Beschreibung aller Szenarien mit Nummer, Name und Erläuterung.	26
Tabelle 6	Werte der Szenarien, welche die Entwicklungen des Gebäudebestandes beschreiben.	28
Tabelle 7	Die Werte für Sanierung und Rückbau.....	29
Tabelle 8	Die eingesetzte Werte für die Graue Energie	33
Tabelle 9	Startwerte und Faktoren zur Berechnung der Szenarien	34
Tabelle 10	Die Energiekennzahlen für die beiden Bereiche «Wohnen» und «Nichtwohnen».....	61
Tabelle 11	Vergleich der Lager der mineralischen Baustoffe	72
Tabelle 12	Berechnete Werte für Flächen-Faktoren der Grauen Energie.....	83
Tabelle 13	Anzahl Einwohner der Stadt Zürich, wie sie für das Modell eingesetzt wurden.....	95
Tabelle 14	Die Werte für den Flächenbedarf aus dem ECO ₂ -Rechner.....	95
Tabelle 15	Anzahl Beschäftigte, wie sie im Modell eingesetzt wurden	96
Tabelle 16	Die Gebäudevolumina wie sie für das Modell verwendet werden.....	99
Tabelle 17	Die Werte der Sanierungs- und Rückbauraten.	100
Tabelle 18	Verschiedene Modell-Parameter.....	100
Tabelle 19	Die eingesetzten Werte der Materialdichten.	101
Tabelle 20	Die Raten von Sanierung und Rückbau aus den Daten von 2000-2005.....	101
Tabelle 21	Die Werte der Materiallager für das Szenario KONSTANT in Mio. Tonnen	102

ANHANG

Tabelle 13 Anzahl Einwohner der Stadt Zürich, wie sie für das Modell eingesetzt wurden.

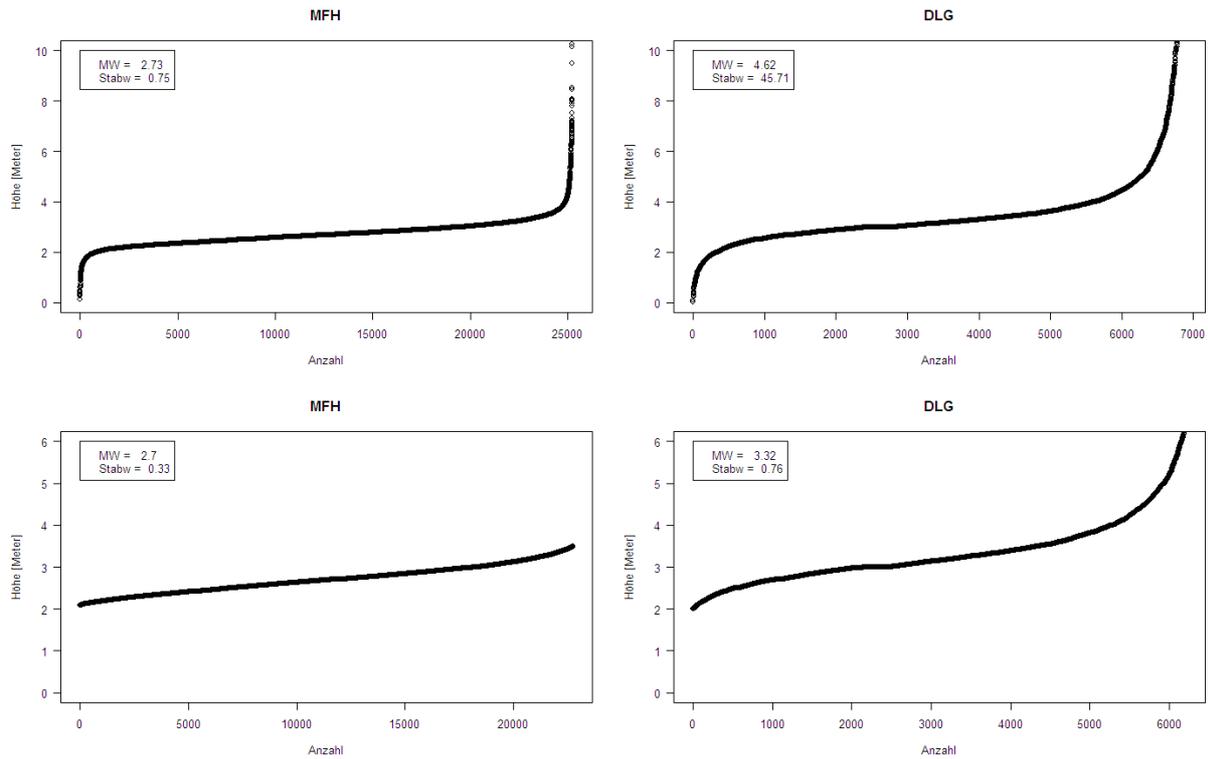
Jahr	Einwohner	Jahr	Einwohner
1995	360'826	2023	398'666
1996	359'648	2024	399'832
1997	358'594	2025	400'958
1998	359'073	2026	402'045
1999	360'704	2027	403'094
2000	360'980	2028	404'106
2001	362'042	2029	405'082
2002	364'558	2030	406'024
2003	364'528	2031	406'932
2004	364'977	2032	407'808
2005	366'809	2033	408'652
2006	370'062	2034	409'466
2007	373'556	2035	410'250
2008	375'529	2036	411'006
2009	377'443	2037	411'734
2010	379'298	2038	412'435
2011	381'097	2039	413'110
2012	382'840	2040	413'761
2013	384'528	2041	414'387
2014	386'162	2042	414'990
2015	387'745	2043	415'571
2016	389'276	2044	416'130
2017	390'757	2045	416'668
2018	392'190	2046	417'186
2019	393'575	2047	417'684
2020	394'914	2048	418'163
2021	396'208	2049	418'625
2022	397'458	2050	419'068

Tabelle 14 Die Werte für den Flächenbedarf aus dem ECO₂-Rechner (Stand 2007).

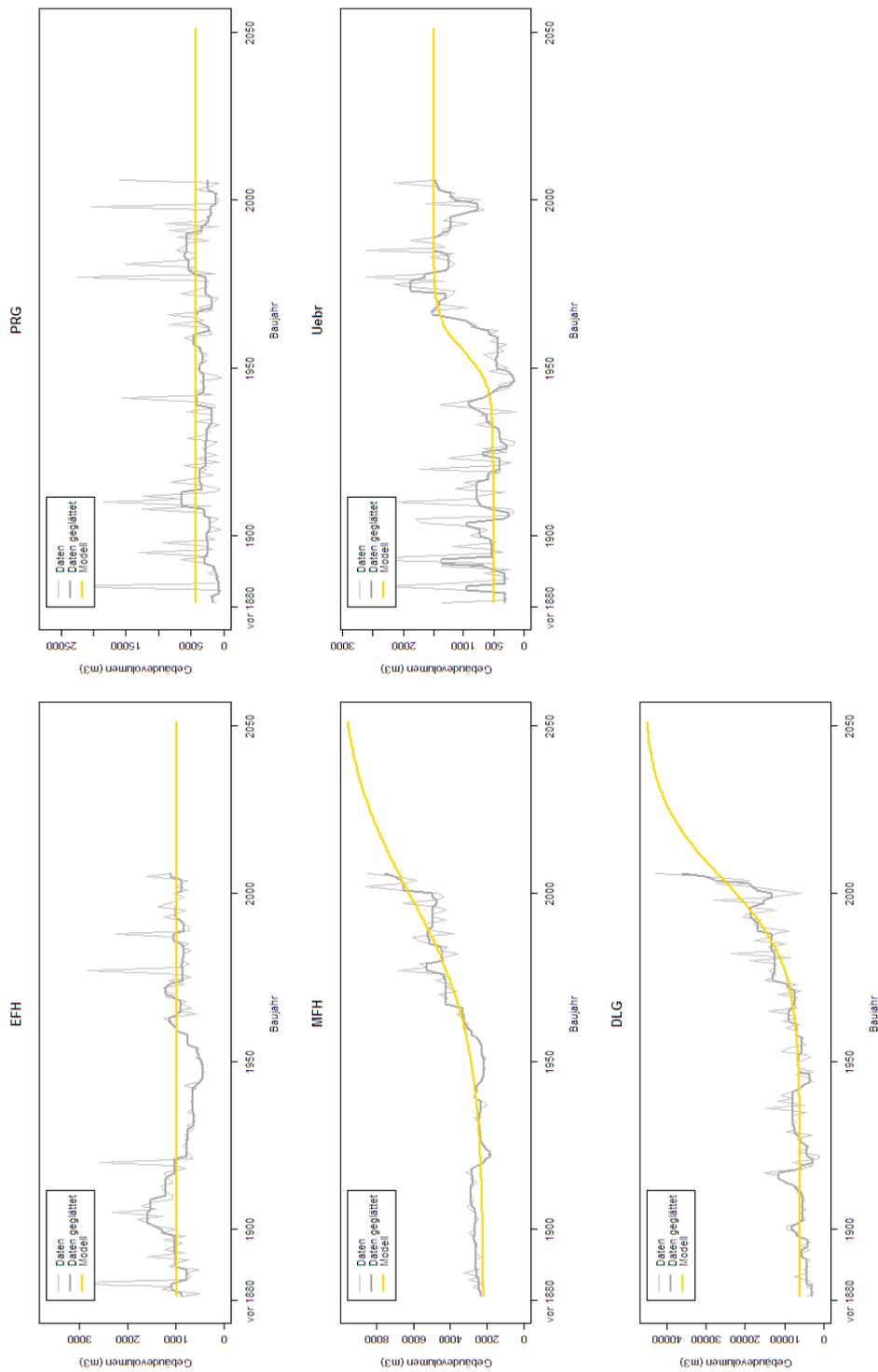
		1992	2005	2020
Wohnen	m ² /Person	51.0	52.7	55.9
Sektor 1	m ² /Beschäftigte	260.5	263.8	332.9
Sektor 2	m ² /Beschäftigte	45.4	45.3	45.0
Sektor 3	m ² /Beschäftigte	41.0	49.3	52.4

Tabelle 15 Anzahl Beschäftigte, wie sie im Modell eingesetzt wurden («Modell») und Vergleichsgrössen aus verschiedene Quellen.

Quelle	1995	1998	2001	2004	2005	2020	2050
Sektor 1							
Modell	200	200	200	200	200	200	200
ECO2					224	187	
Sektor 2							
Modell	56'641	50'389	44'136	37'884	35'800	35'800	35'800
ECO2					46'929	39'197	
Sektor 1 und 2							
Modell	56'841	50'589	44'336	38'084	36'000	36'000	36'000
Stat. Stadt ZH				37'300	35'800		
Stat. JB07	52'629	45'145	42'953				
Sektor 3							
Modell	276'949	282'012	287'075	292'138	293'825	322'601	347'150
ECO2					295'490	316'078	
Stat. Stadt ZH				293'750	292'525		
Stat. JB07	264'659	270'142	296'576				
Total Sektoren 1, 2, und 3							
Modell	333'790	332'601	331'411	330'222	329'825	358'601	383'150
ECO2					342'643	355'462	
Stat. Stadt ZH				331'050	328'325		
Stat. JB07	317'288	315'287	339'529				



Figur 58 Die Figur zeigt die berechneten Geschosshöhen der Gebäude aus den Daten des Gebäudebestandes von 2005, exemplarisch für die MFH (links) und DLG (rechts). Oben sind jeweils alle Werte aufgetragen, für eine bessere Darstellung wurde dabei die Skala gegen oben begrenzt. Für das Modell wurden die grössten und kleinsten 5 % der Werte nicht berücksichtigt. Diese 90 % sind jeweils unten dargestellt. In jeder Grafik sind der Mittelwert (MW) und die Standardabweichung (Stabw) angegeben. Es ist zu sehen, wie die Standardabweichung stark verkleinert wird, wenn die 5 %-Extremwerte weggelassen werden.



Figur 59 Die «typischen» Größen der Gebäude nach den einzelnen Nutzungen, wie sie im Modell eingesetzt wurden (gelbe Linie). Grau die Daten des Bestandes von 2005.

Tabelle 16 Die Gebäudevolumina wie sie als Ergebnis der Berechnung der Nachfrage für das Modell verwendet werden.

Jahr	EFH	MFH	DLG	PRG	Uebr	Total
1995	6'375'340	70'870'171	58'815'273	12'928'026	9'695'820	158'684'630
1996	6'398'290	71'313'207	59'324'326	12'547'945	9'878'852	159'462'620
1997	6'421'240	71'756'243	59'833'378	12'167'864	10'061'884	160'240'610
1998	6'444'190	72'199'279	60'342'431	11'787'783	10'244'916	161'018'600
1999	6'467'141	72'642'316	60'851'484	11'407'702	10'427'948	161'796'590
2000	6'490'091	73'085'352	61'360'537	11'027'621	10'610'980	162'574'580
2001	6'513'041	73'528'388	61'869'590	10'647'540	10'794'012	163'352'570
2002	6'535'991	73'971'424	62'378'643	10'267'459	10'977'044	164'130'560
2003	6'558'941	74'414'460	62'887'696	9'887'378	11'160'076	164'908'550
2004	6'581'891	74'857'496	63'396'749	9'507'297	11'343'108	165'686'540
2005	6'604'841	75'300'532	63'905'801	9'127'216	11'526'140	166'464'530
2006	6'604'841	76'428'198	64'335'566	9'127'216	11'526'140	168'021'961
2007	6'604'841	77'389'844	65'165'247	9'127'216	11'526'140	169'813'288
2008	6'604'841	78'011'276	65'960'613	9'127'216	11'526'140	171'230'086
2009	6'604'841	78'621'151	66'722'635	9'127'216	11'526'140	172'601'984
2010	6'604'841	79'219'635	67'452'317	9'127'216	11'526'140	173'930'149
2011	6'604'841	79'806'905	68'150'675	9'127'216	11'526'140	175'215'777
2012	6'604'841	80'383'141	68'818'743	9'127'216	11'526'140	176'460'082
2013	6'604'841	80'948'536	69'457'555	9'127'216	11'526'140	177'664'288
2014	6'604'841	81'503'283	70'068'147	9'127'216	11'526'140	178'829'627
2015	6'604'841	82'047'584	70'651'546	9'127'216	11'526'140	179'957'327
2016	6'604'841	82'581'642	71'208'772	9'127'216	11'526'140	181'048'611
2017	6'604'841	83'105'667	71'740'827	9'127'216	11'526'140	182'104'692
2018	6'604'841	83'619'870	72'248'700	9'127'216	11'526'140	183'126'767
2019	6'604'841	84'124'463	72'733'358	9'127'216	11'526'140	184'116'018
2020	6'604'841	84'619'661	73'195'745	9'127'216	11'526'140	185'073'603
2021	6'604'841	85'105'681	73'632'747	9'127'216	11'526'140	185'996'626
2022	6'604'841	85'582'740	74'049'298	9'127'216	11'526'140	186'890'235
2023	6'604'841	86'051'053	74'446'268	9'127'216	11'526'140	187'755'517
2024	6'604'841	86'510'836	74'824'501	9'127'216	11'526'140	188'593'534
2025	6'604'841	86'962'306	75'184'814	9'127'216	11'526'140	189'405'317
2026	6'604'841	87'405'676	75'527'997	9'127'216	11'526'140	190'191'869
2027	6'604'841	87'841'158	75'854'811	9'127'216	11'526'140	190'954'167
2028	6'604'841	88'268'964	76'165'992	9'127'216	11'526'140	191'693'153
2029	6'604'841	88'689'302	76'462'246	9'127'216	11'526'140	192'409'745
2030	6'604'841	89'102'378	76'744'254	9'127'216	11'526'140	193'104'829
2031	6'604'841	89'508'395	77'012'670	9'127'216	11'526'140	193'779'262
2032	6'604'841	89'907'554	77'268'120	9'127'216	11'526'140	194'433'871
2033	6'604'841	90'300'052	77'511'208	9'127'216	11'526'140	195'069'457
2034	6'604'841	90'686'084	77'742'510	9'127'216	11'526'140	195'686'791
2035	6'604'841	91'065'840	77'962'580	9'127'216	11'526'140	196'286'617
2036	6'604'841	91'439'507	78'171'947	9'127'216	11'526'140	196'869'651
2037	6'604'841	91'807'271	78'371'117	9'127'216	11'526'140	197'436'585
2038	6'604'841	92'169'309	78'560'575	9'127'216	11'526'140	197'988'082
2039	6'604'841	92'525'799	78'740'785	9'127'216	11'526'140	198'524'781
2040	6'604'841	92'876'914	78'912'188	9'127'216	11'526'140	199'047'299
2041	6'604'841	93'222'821	79'075'207	9'127'216	11'526'140	199'556'226
2042	6'604'841	93'563'686	79'230'246	9'127'216	11'526'140	200'052'129
2043	6'604'841	93'899'669	79'377'690	9'127'216	11'526'140	200'535'556
2044	6'604'841	94'230'927	79'517'905	9'127'216	11'526'140	201'007'029
2045	6'604'841	94'557'613	79'651'242	9'127'216	11'526'140	201'467'052
2046	6'604'841	94'879'876	79'778'036	9'127'216	11'526'140	201'916'109
2047	6'604'841	95'197'861	79'898'603	9'127'216	11'526'140	202'354'661
2048	6'604'841	95'511'710	80'013'249	9'127'216	11'526'140	202'783'155
2049	6'604'841	95'821'559	80'122'260	9'127'216	11'526'140	203'202'016
2050	6'604'841	96'127'543	80'225'914	9'127'216	11'526'140	203'611'654

Tabelle 17 Die Werte der Sanierungs- und Rückbauraten der Figur 18 für die MFH und die DLG. Die Zeile «Parameter» gibt den Input in das Modell, die Zeile DATA sind die bekannten Werte der Jahre 2000–2005 an. Die restlichen Zeilen sind die Resultate der Berechnung für die vier Szenarien.

Parameter	Bezugsgrösse	Sanierung		Rückbau		----- Rate in Prozent pro Jahr -----
		MFH	DLG	MFH	DLG	
Parameter	Anzahl Gebäude	1.39	4.40	0.13	0.50	Grundlage für das Modell
DATA 2000-2005	Gebäudevolumen	1.34	4.23	0.11	0.48	Mittelwert 2000-2005
KONSTANT	Gebäudevolumen	1.33	4.28	0.11	0.48	Mittelwert 2000-2050
SANIEREN	Gebäudevolumen	2.69	5.31	0.11	0.45	Mittelwert 2000-2050
ERSETZEN	Gebäudevolumen	1.32	4.32	0.29	0.95	Mittelwert 2000-2050
KOMBINIERT	Gebäudevolumen	2.69	5.38	0.27	0.95	Mittelwert 2000-2050

Tabelle 18 Verschiedene Modell-Parameter für die Rückbaumaterialien und deren Verteilung in die Deponie.

	2005	2050
Betonabbruch, der bei Sanierung und Neubau in den Mischabbruch geht	50%	50%
Betonabbruch, der beim Rückbau in den Mischabbruch geht	20%	10%
Betonabbruch aus der Infrastruktur in den Strassenaufbruch (Magerbeton)	50%	50%
Anteil Beton im Mischabbruch der Infrastruktur	50%	50%
Betonabbruch, der deponiert wird		
aus Sanierung und Neubau	30%	5%
aus Rückbau	5%	5%
aus Infrastruktur	5%	5%
Mischabbruch, der deponiert wird		
aus Sanierung und Neubau	50%	5%
aus Rückbau	15%	5%
aus Infrastruktur	15%	5%
Strassenaufbruch, der deponiert wird		
aus Sanierung und Neubau	30%	5%
aus Rückbau	5%	5%
aus Infrastruktur	5%	5%
Ausbauasphalt, der deponiert wird		
aus Sanierung und Neubau	30%	5%
aus Rückbau	5%	5%
aus Infrastruktur	5%	5%
Mineralische Restfraktion und Dämmung, die deponiert werden		
aus Sanierung und Neubau	100%	50%
aus Rückbau	100%	50%

Tabelle 19 Die eingesetzten Werte der Materialdichten.

Material	Dichte t/m³
Beton	2.40
Mauerwerk	1.50
Mineralische Restfraktion	1.58
Metall	7.00
Dämmung	0.05
Aushub	1.60
Kies/Sand	1.60
Asphalt	1.60

Tabelle 20 Die Raten von Sanierung und Rückbau aus den Daten von 2000-2005 (Daten von Statistik Stadt Zürich). Angaben in Prozent bezüglich Gebäudevolumen.

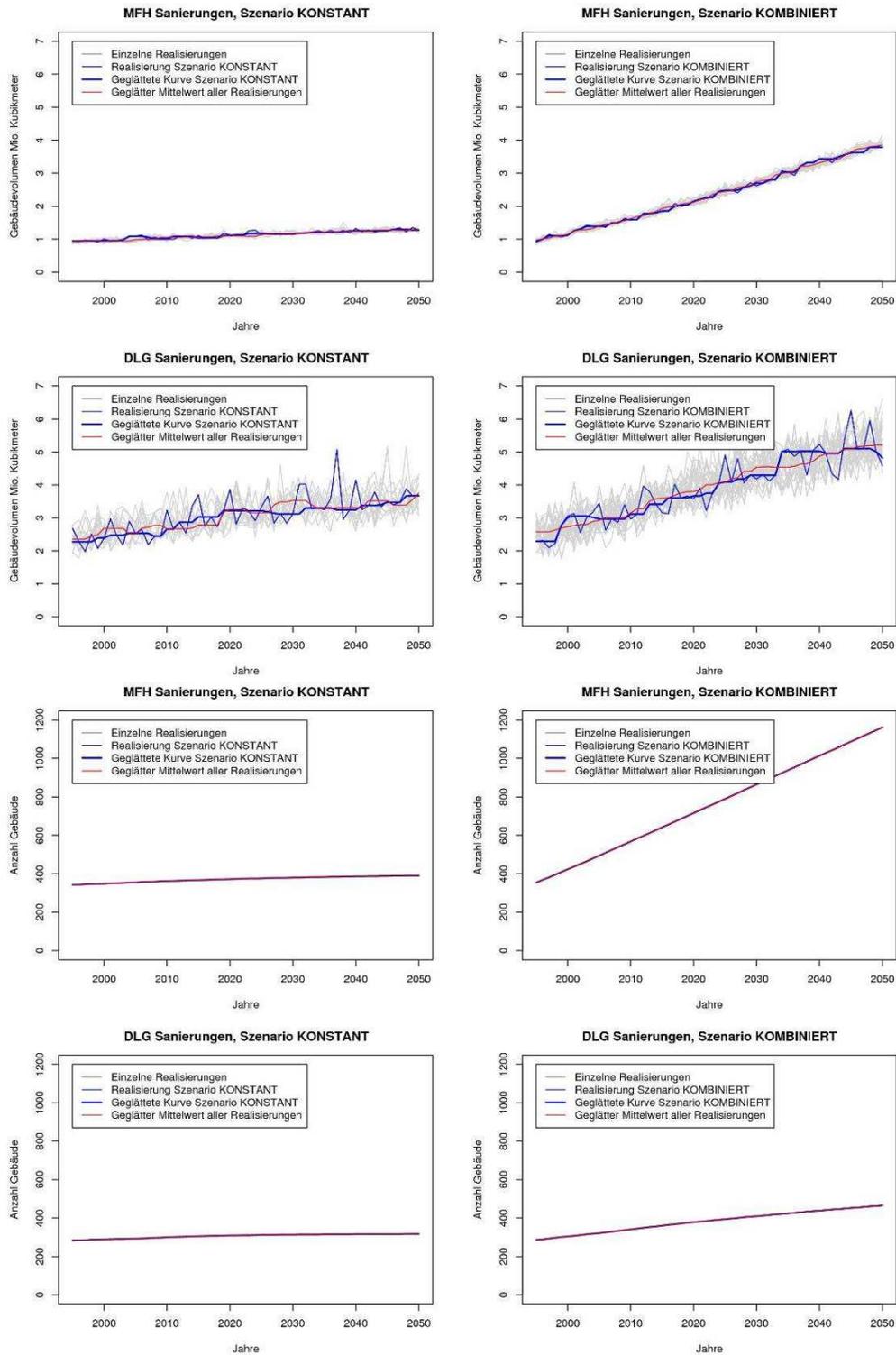
	EFH	MFH	DLG	PRG	Uebr
	Prozent	Prozent	Prozent	Prozent	Prozent
Sanierung					
MW	1.00	1.34	4.23	1.62	0.61
SD	0.39	0.33	0.64	1.81	0.33
Rückbau					
MW	0.39	0.11	0.48	3.54	0.45
SD	0.15	0.06	0.34	1.49	0.27

MW: Mittelwert

SD: Standardabweichung

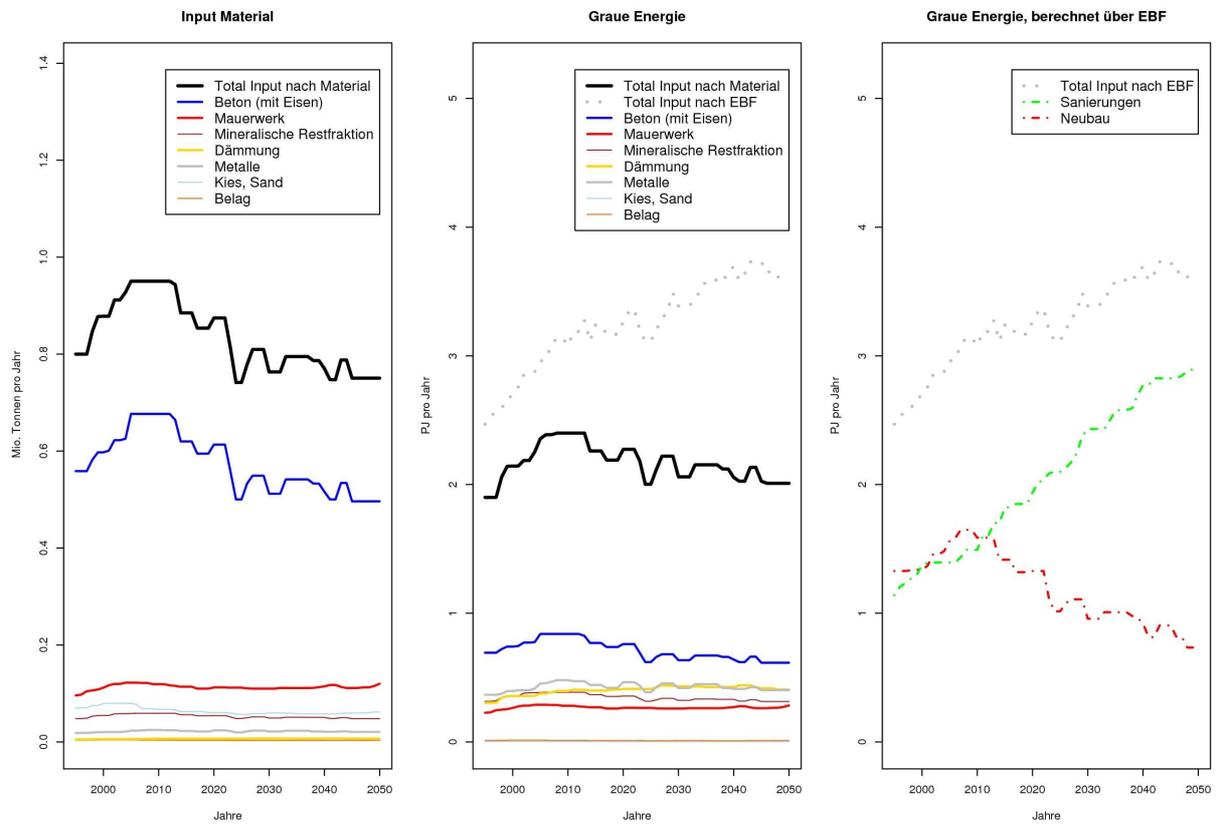
Tabelle 21 Die Werte der Materiallager für das Szenario KONSTANT in Mio. Tonnen. Min.Restfr. = Mineralische Restfraktion.

Jahr	Beton	Mauerwerk	Kies	Belag	Min. Restfr.	Daemmung	Metall	Total
1995	33.3	16.0	26.0	1.99	4.05	0.05	0.93	82.4
1996	33.8	16.1	26.1	1.99	4.09	0.05	0.94	83.0
1997	34.3	16.1	26.1	2.00	4.13	0.05	0.96	83.7
1998	34.7	16.2	26.2	2.00	4.17	0.06	0.97	84.3
1999	35.3	16.3	26.3	2.00	4.21	0.06	0.99	85.1
2000	35.9	16.3	26.3	2.01	4.26	0.07	1.01	85.9
2001	36.5	16.4	26.4	2.01	4.31	0.07	1.03	86.7
2002	37.0	16.5	26.5	2.01	4.35	0.08	1.05	87.4
2003	37.6	16.6	26.5	2.02	4.40	0.08	1.07	88.3
2004	38.2	16.6	26.6	2.02	4.45	0.09	1.09	89.1
2005	38.8	16.7	26.7	2.02	4.50	0.09	1.11	89.9
2006	39.3	16.8	26.7	2.03	4.55	0.10	1.13	90.7
2007	39.9	16.9	26.8	2.03	4.59	0.10	1.14	91.4
2008	40.4	16.9	26.8	2.03	4.63	0.11	1.16	92.1
2009	41.0	17.0	26.9	2.04	4.68	0.11	1.19	92.9
2010	41.5	17.1	26.9	2.04	4.72	0.12	1.20	93.6
2011	42.1	17.2	27.0	2.04	4.77	0.13	1.22	94.4
2012	42.6	17.2	27.0	2.04	4.81	0.13	1.24	95.1
2013	43.1	17.3	27.1	2.05	4.85	0.14	1.26	95.8
2014	43.7	17.4	27.1	2.05	4.90	0.14	1.28	96.6
2015	44.3	17.4	27.2	2.05	4.94	0.15	1.30	97.3
2016	44.7	17.5	27.2	2.05	4.98	0.16	1.32	98.0
2017	45.2	17.6	27.3	2.06	5.02	0.16	1.34	98.7
2018	45.7	17.6	27.3	2.06	5.06	0.17	1.36	99.2
2019	46.1	17.7	27.4	2.06	5.10	0.17	1.38	99.9
2020	46.6	17.7	27.4	2.06	5.13	0.18	1.39	100.5
2021	46.9	17.8	27.5	2.06	5.17	0.18	1.41	101.0
2022	47.5	17.8	27.5	2.07	5.21	0.19	1.43	101.7
2023	47.9	17.9	27.6	2.07	5.24	0.20	1.45	102.3
2024	48.4	18.0	27.6	2.07	5.28	0.20	1.46	102.9
2025	48.8	18.0	27.6	2.07	5.31	0.21	1.48	103.5
2026	49.2	18.1	27.7	2.08	5.35	0.21	1.50	104.1
2027	49.5	18.1	27.7	2.08	5.38	0.22	1.51	104.5
2028	49.9	18.2	27.7	2.08	5.41	0.22	1.53	105.0
2029	50.2	18.2	27.8	2.08	5.44	0.23	1.54	105.5
2030	50.9	18.3	27.8	2.08	5.49	0.23	1.57	106.4
2031	51.2	18.3	27.9	2.09	5.51	0.24	1.58	106.8
2032	51.6	18.4	27.9	2.09	5.54	0.25	1.60	107.3
2033	51.8	18.4	27.9	2.09	5.57	0.25	1.61	107.7
2034	52.2	18.5	28.0	2.09	5.60	0.26	1.62	108.3
2035	52.6	18.5	28.0	2.09	5.63	0.26	1.64	108.7
2036	52.9	18.6	28.0	2.10	5.66	0.27	1.65	109.1
2037	53.2	18.6	28.1	2.10	5.68	0.27	1.67	109.6
2038	53.6	18.7	28.1	2.10	5.72	0.28	1.68	110.2
2039	54.0	18.7	28.1	2.10	5.74	0.28	1.70	110.6
2040	54.3	18.7	28.2	2.10	5.77	0.28	1.71	111.0
2041	54.5	18.8	28.2	2.10	5.79	0.29	1.72	111.4
2042	54.9	18.8	28.2	2.11	5.82	0.29	1.73	111.9
2043	55.2	18.9	28.3	2.11	5.85	0.30	1.75	112.4
2044	55.5	18.9	28.3	2.11	5.87	0.30	1.76	112.7
2045	55.8	19.0	28.3	2.11	5.90	0.31	1.77	113.2
2046	56.1	19.0	28.4	2.11	5.92	0.31	1.78	113.6
2047	56.4	19.0	28.4	2.11	5.95	0.32	1.80	114.0
2048	56.7	19.1	28.4	2.12	5.98	0.32	1.81	114.5
2049	57.0	19.1	28.5	2.12	6.00	0.33	1.83	114.9
2050	57.5	19.2	28.5	2.12	6.04	0.33	1.84	115.5



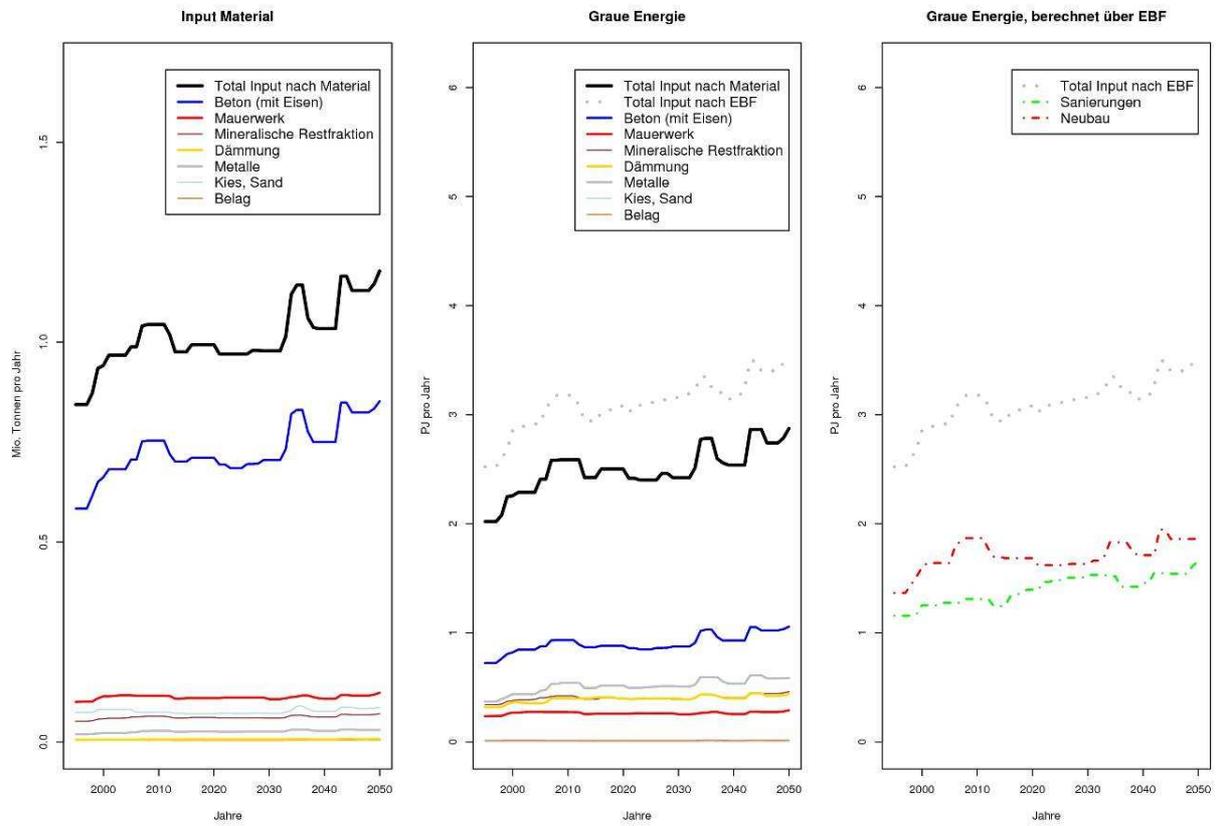
Figur 60 Gebäudevolumen (oben) und Anzahl (unten) von Sanierungen der MFH und DLG für die beiden Szenarien KONSTANT und KOMBINIERT.

Szenario 1.1



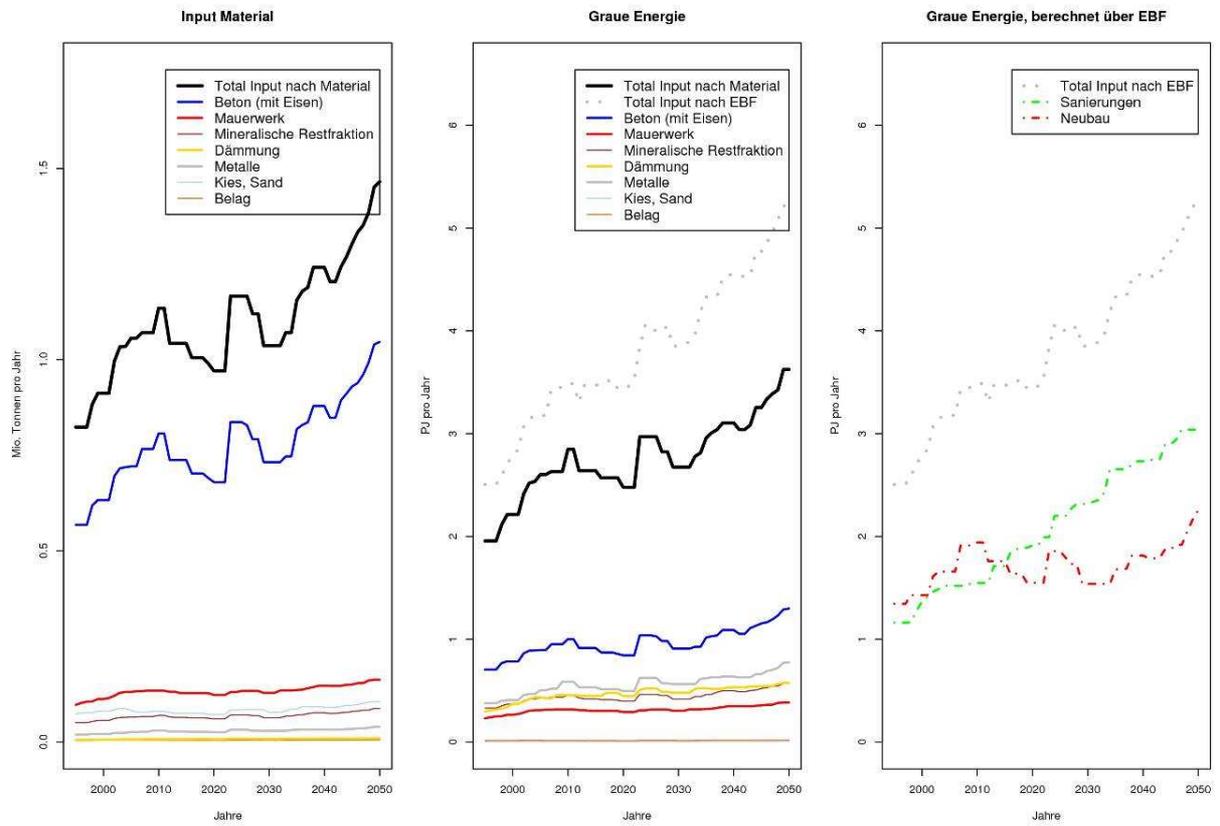
Figur 61 Der Input von Masse (links), Grauer Energie (mitte und rechts) im Szenario SANIEREN.

Szenario 1.2



Figur 62 Der Input von Masse (links), Grauer Energie (mitte und rechts) im Szenario ERSETZEN.

Szenario 1.3



Figur 63 Der Input von Masse (links), Grauer Energie (mitte und rechts) im Szenario KOMBINIERT.

