

Dynamische Modellierung

Das Amt für Hochbauten und das Tiefbauamt der Stadt Zürich erstellen im Rahmen des Legislatorschwerpunktes «Nachhaltige Stadt Zürich – auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft» eine langfristig orientierte Ressourcenstrategie der mineralischen Baustoffe. Das erarbeitete dynamische Ressourcenhaushaltsmodell erlaubt, die zeitliche Entwicklung der Stoffflüsse und -lager in Abhängigkeit von exogenen Faktoren zu erfassen. Damit konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Erneuerungsstrategien des Gebäudeparks der Stadt Zürich durch Sanierung und/oder Ersatzneubauten untersucht und ein stark verbessertes Systemverständnis gewonnen werden. Mit dem dynamischen Modell steht nun ein Instrument zur Verfügung, um die eingeschlagene Ressourcenstrategie zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Im Jahr 2050 könnten demnach nicht mehr die Kiesgrube, sondern der bestehende Gebäudepark die wichtigste Abbaustätte für mineralische Baustoffe darstellen.

VON STEFAN RUBLI, MARTIN SCHNEIDER, HEINRICH GÜGERLI, WILLI ZUBERBÜHLER

Im Rahmen des erwähnten Legislatorschwerpunktes werden Projekte durchgeführt, welche sich unter anderem mit der Frage befassen, wie sich der bestehende Gebäudepark bis ins Jahr 2050 in Richtung der Zielvorstellung einer «2000-W-Gesellschaft» umbauen lässt. Grundsätzlich kann der Umbau in einem energieeffizienten Gebäudepark über die Sanierung, den Ersatzneubau oder über die Kombination dieser Szenarien realisiert werden. Ein Ersatzneubau lässt aus energetischer Sicht effizientere Lösungen zu, ist allerdings deutlich ressourcenintensiver als eine Sanierung. Zudem ist die Umbaugeschwindigkeit von Bedeutung: Lassen sich die energetischen Ziele über den Weg von Sanierung oder Ersatzneubau im betrachteten Zeitraum überhaupt erreichen und welche Mate-

rialflüsse sind damit verbunden? Neben den hier thematisierten mineralischen Baustoffflüssen ist das Modell zudem in der Lage, die zeitliche Entwicklung der grauen Energie und der Betriebsenergie (Heizen und Warmwasser) zu ermitteln. Damit wird eine umfassende Beurteilung des Ressourcenbedarfs für den Bau, Unterhalt und Betrieb des Gebäudeparks in der Stadt Zürich möglich.

Grundlagen der dynamischen Modellierung

Derartige Fragestellungen lassen sich mit statischen Modellen nicht beantworten. Die hohe Komplexität des zu untersuchenden Systems sowie die langen Verweilzeiten der Materialien erforderten die Entwicklung eines dynamischen Ressourcenhaushaltsmodells, welches auf der Methode des statischen Modells [Schneider, Rubli 2007] basiert. Die Programmierung des dynamischen Modells sowie alle statis-

tischen Auswertungen erfolgten mit dem Softwareprogramm «R».

Kern des dynamischen Modells ist die Beschreibung der zeitlichen Veränderung des Gebäudebestandes in Abhängigkeit von exogenen Faktoren zwischen 1995 und 2050. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Erneuerungsstrategien abzubilden, wurden vier Szenarien formuliert. Im Referenzszenario «Konstant» werden die Sanierungs- und Rückbauraten über den betrachteten Zeitraum konstant auf dem Ausgangswert (Durchschnitt 2000 bis 2005) belassen (vgl. Tabelle 1). Hervorzuheben ist hier der Fakt, dass die Rückbauraten sowohl für «Wohnen» als auch «Nichtwohnen» um etwa eine Grössenordnung tiefer liegen als die entsprechenden Sanierungsraten. Beim Szenario «Sanieren» werden die Sanierungsraten jeweils linear bis ins Jahr 2050 um die Faktoren 1,5 bzw. 3 erhöht und für das Szenario «Ersetzen» die Rückbauraten um den Faktor 3 bzw. 4 angehoben. Im Szenario «Kombiniert»

Stefan Rubli

Dr. sc. techn. ETH, ist Geschäftsführer der Firma Wertstoff-Börse GmbH.

Martin Schneider

Dipl. Umwelt-Ing. ETH, ist Projektmitarbeiter in der Firma Wertstoff-Börse GmbH.

Dr. Heinrich Gugerli

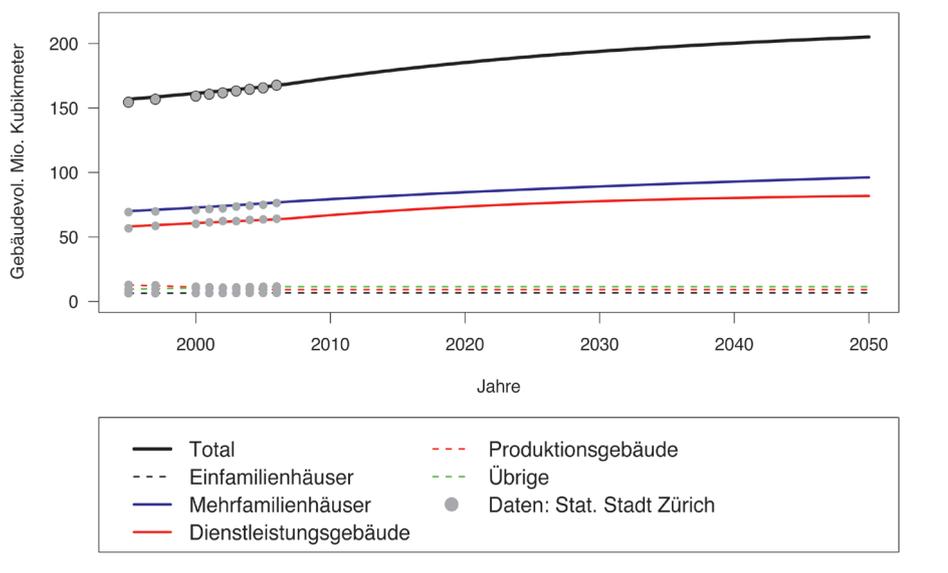
Dipl. Ing. ETH/SIA, ist Leiter Fachstelle nachhaltiges Bauen, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich.

Willi Zuberbühler

Projektleiter Werterhaltung, Tiefbauamt der Stadt Zürich.

	Startwerte 1995	Endwerte 2050	Endwerte 2050	Endwerte 2050	Endwerte 2050
	für alle Szenarien	KONSTANT	SANIEREN	ERSETZEN	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

Tabelle 1: Eingesetzte Werte für die vier Szenarien zur Entwicklung des Gebäudebestandes. Die Startwerte sind für alle Szenarien die gleichen. Sie werden bis ins Jahr 2050 jeweils linear bis zu den Endwerten erhöht.



Figur 1: Die Entwicklung des Gebäudevolumens nach Nutzungsarten als Grundlage für das Gebäudebestandsmodell. Bei den grauen Punkten handelt es sich um die effektiven Werte ab 1995 bis 2006.

werden sowohl die Sanierungs- als auch die Rückbauraten um die jeweiligen Faktoren erhöht.

Die zugrunde gelegte Entwicklung des Gebäudebestandes orientiert sich an der zukünftigen Nachfrage nach Wohnraum und Arbeitsplätzen. Diese ist abhängig von der Entwicklung der Wohnbevölkerung, der Arbeitsplätze sowie deren jeweiligem spezifischen Flächenbedarf. Die entsprechenden Funktionen basieren auf bestehenden Prognosen [ECO2, 2007], [Stat. JB

07], welche bis ins Jahr 2025 reichen und mit eigenen Annahmen bis ins Jahr 2050 fortgeschrieben wurden. Daraus lässt sich das Gebäudevolumen berechnen. In der Figur 2 ist die Entwicklung nach den verschiedenen Nutzungsarten dargestellt. Mit Hilfe bekannter Daten (Punkte) aus dem Zeitraum 1995 bis 2006 konnte das Modell validiert werden.

Im Modell wird der Gebäudebestand ab dem Jahr 1995 virtuell fortgeschrieben, indem ein Angebot an Ge-

bäudevolumen generiert wird, welches die oben beschriebene Nachfrage decken soll. Das Angebot kann durch Ersatzneubauten oder durch Neubauten gedeckt werden. In vier Schritten werden dann die Rückbau-, Sanierungs-, Ersatzneubau- und Neubautätigkeit auf Jahresbasis durchgerechnet. Bei jedem Eingriff in ein Gebäude (Sanierung, Neubau) wird im Übrigen auch dessen Energiestandard mitbestimmt. Sind die Veränderungen des Gebäudebestandes bekannt, können die Materiallager und Flüsse ermittelt werden. Für die Gebäude wurde eine typische Materialisierung berücksichtigt, welche von Baujahr, Nutzung und Energiestandard abhängig ist. Die zugrunde liegende Methode und die Daten zu den Infrastruktursystemen werden vollumfänglich aus dem statischen Modell übernommen [Schneider, Rubli 2007].

Szenarien zum Gebäudebestand

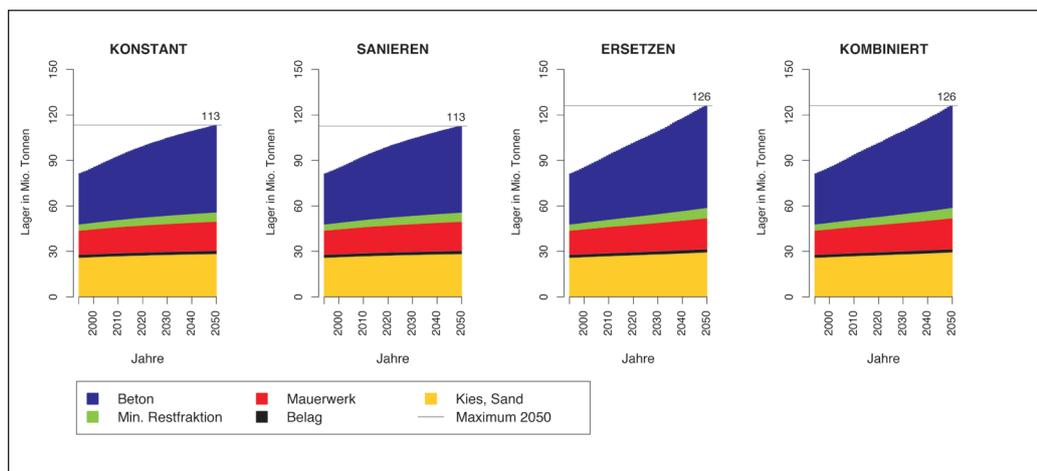
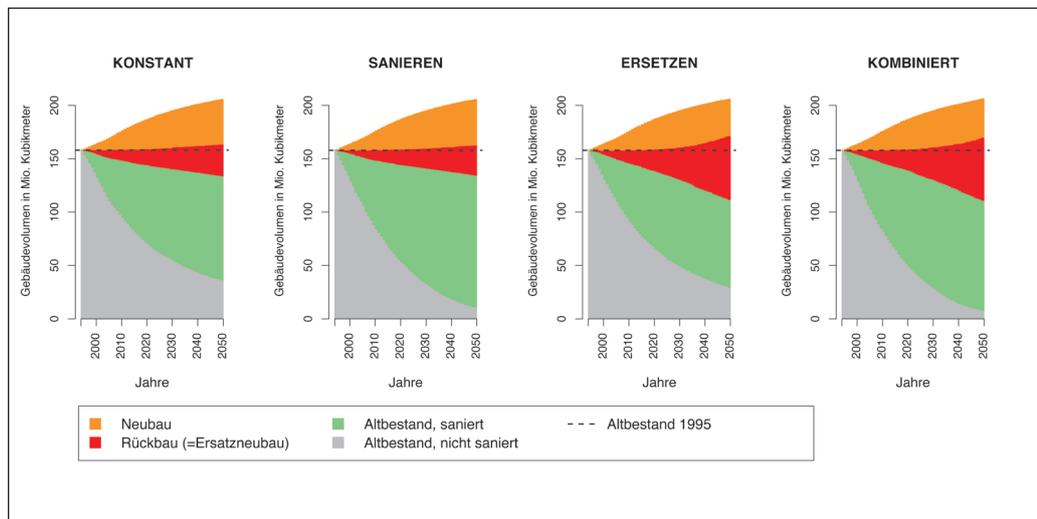
In allen Szenarien wächst das Gebäudevolumen bis 2050 von 156 auf 205 Millionen Kubikmeter (Mio. m³) an, was einer Zunahme von über 30% entspricht (Figur 2, oben). Erfolgt die Bewirtschaftung des Gebäudebestandes mit den heutigen Sanierungs- und Rückbauraten (Referenzszenario «Konstant»), ergibt sich für das Jahr 2050 ein

nicht saniertes Gebäudevolumen von rund 40 Mio. m³ (grau), was einem Anteil von knapp 20% entspricht. Bei einer zunehmenden Sanierungstätigkeit, wie dies im Szenario «Sanieren» vorausgesetzt wird, sinkt der Anteil der nicht sanierten Gebäude im Jahr 2050 auf etwa 5%. Bei zunehmenden Rückbau- bzw. Ersatzneubauraten, wie im Szenario «Ersetzen», verbleiben rund 17% der Gebäude im unsanierten Zustand. Da die Ersatzneubauraten heute viel tiefer liegen als die Sanierungsraten, liefert eine Vervielfachung der Ersatzneubauraten im Vergleich zu erhöhten Sanierungsraten einen deutlich geringeren Beitrag an die Erneuerung des Gebäudeparks. So nehmen zwar beim Szenario «Ersetzen» die Ersatzneubauten (rot) zu, dafür ist die Entwicklung der sanierten Gebäude (grün) weniger stark ausgeprägt. Beim Szenario «Kombiniert» sinkt der unsanierte Anteil (grau) auf den tiefsten Wert.

Lagerentwicklung

Die Darstellung der Lager beinhaltet sämtliche mineralischen Baustoffe aus dem Gebäudepark und der Infrastruktur. Die Konsequenzen der einzelnen Szenarien hinsichtlich der Entwicklung der Materiallager lassen sich anhand der Figur 2 gut aufzeigen. Bei den Szenarien «Konstant» und «Sanieren» steigt das Materiallager von 82 auf über 113 Mio. Tonnen an, wobei sich das Wachstum gegen das Jahr 2050 analog zur Entwicklung des Gebäudevolumens verlangsamt. Das Wachstum ist grösstenteils auf den Zuwachs des Betonlagers aufgrund der Erstellung von Neubauten und Ersatzneubauten zurückzuführen. Zwischen dem Szenario «Konstant» und «Sanieren» bestehen keine Unterschiede, weil beim Szenario «Sanieren» davon ausgegangen wird, dass bei der Sanierung eines Gebäudes rund 10% Material ausgetauscht wird. Damit gelangen keine zusätzlichen Materialmengen ins System.

Steigen die Ersatzneubauraten wie



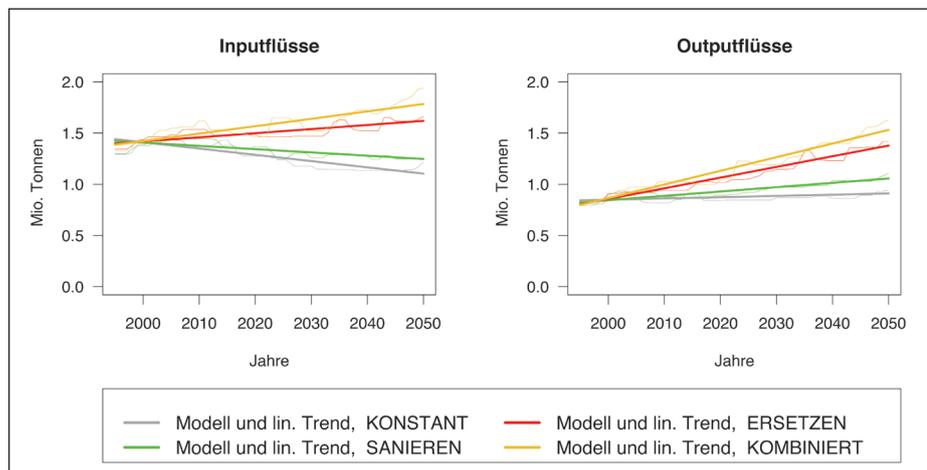
Figur 2: Entwicklung des Gebäudevolumens (oben) und der Materiallager (unten) in der Stadt Zürich für die Szenarien «Konstant», «Sanieren», «Ersetzen» und «Kombiniert».

in den Szenarien «Ersetzen» oder «Kombiniert» stark an, so ist einerseits eine starke Erhöhung der Lagermengen auf 126 Mio. Tonnen zu verzeichnen, andererseits flacht das Wachstum bei diesen Szenarien nicht ab. Dies lässt sich damit begründen, dass die materialintensive Ersatzneubautätigkeit bis ins Jahr 2050 leicht überproportional ansteigt (vgl. rotes Feld bei Gebäudevolumenentwicklung). Anhand der Szenarien kann damit sehr gut aufgezeigt werden, welchen Einfluss die verschie-

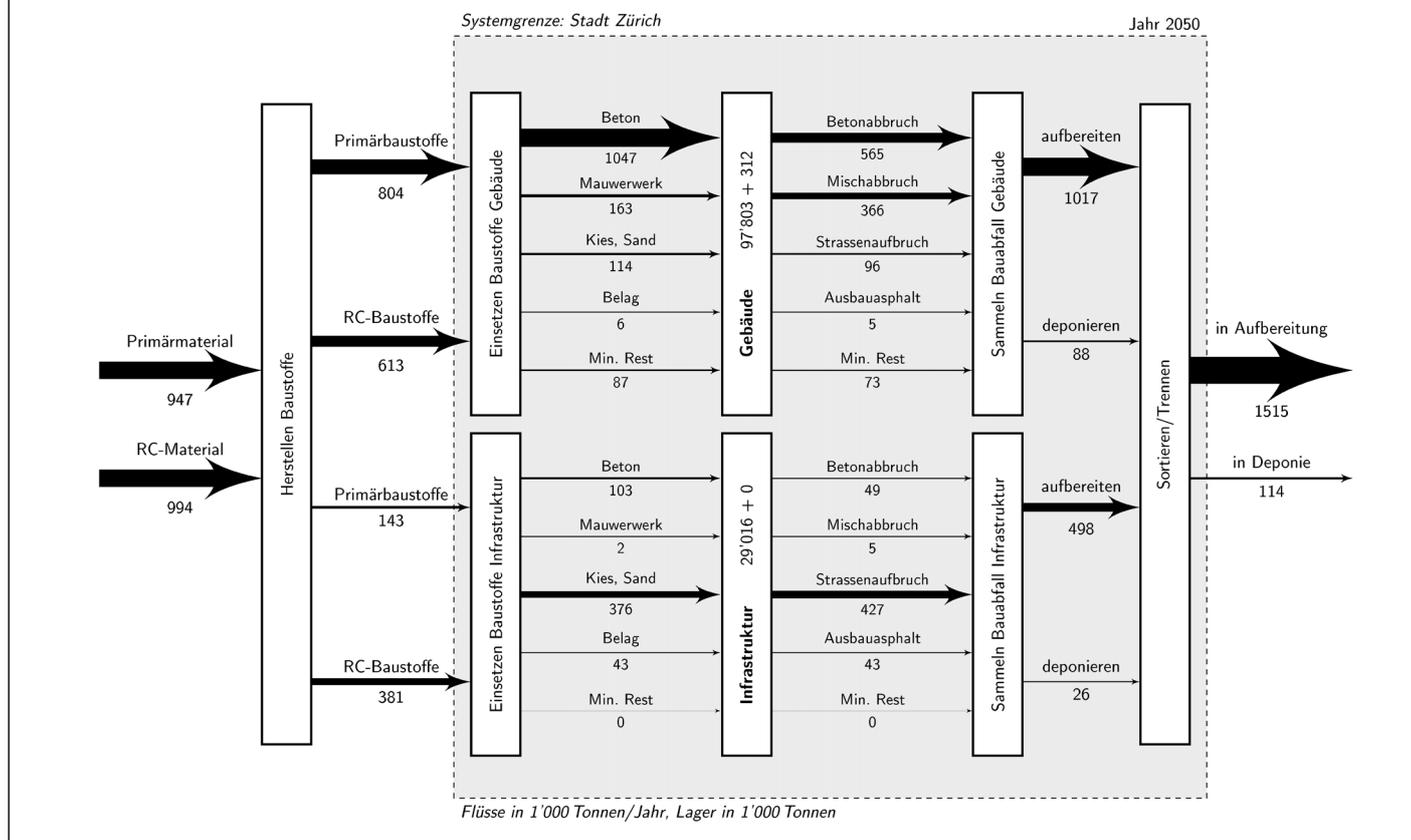
denen Erneuerungsstrategien auf die Lagerentwicklung und damit verbunden auf den mineralischen Ressourcenbedarf haben können. Bei den Szenarien «Ersetzen» oder «Kombiniert» ergibt sich ein um 13 Mio. Tonnen grösseres Materiallager. Dies entspricht einem zusätzlichen Materialbedarf von durchschnittlich 260000 Tonnen pro Jahr gegenüber den weniger materialintensiven Szenarien.

Materialflüsse

Für die Entwicklung einer Ressourcenstrategie spielen neben den Inputflüssen vor allem die Outputflüsse, welche in Form von Rückbaumaterialien anfallen, eine wesentliche Rolle. In der Figur 3 ist die Entwicklung der Input- und Outputflüsse sowie deren Trends für die einzelnen Szenarien aufgezeigt. Beim Vergleich der Input- und Outputflüsse ist zu erkennen, dass heute die Inputflüsse mit 1,4 bis 1,5 Mio. Tonnen pro Jahr rund doppelt so hoch sind wie die Outputflüsse. Die Trends zeigen aber, dass sich diese Differenz bei allen Szenarien bis 2050 verkleinert. Ein Hauptgrund dafür ist der noch immer anwachsende Gebäudebestand. Dies führt dazu, dass auch



Figur 3: Input- und Outputflüsse in Abhängigkeit der vier Szenarien.



Figur 4: Mineralisches Materiallager und -flüsse im Szenario «Kombiniert» für das Jahr 2050. Etwa zwei Drittel der aufbereiteten Materialien fließen als RC-Baustoffe zurück in die Stadt. Damit besteht noch weiteres Potenzial.

bei gleichbleibenden Sanierungs- und Rückbauraten, aber grösserem Gebäudebestand im zeitlichen Verlauf mehr Rückbaumaterial anfallen wird.

Werden die einzelnen Szenarien betrachtet, sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Während bei den Szenarien «Konstant» und «Sanieren» die Inputflüsse aufgrund der nachlassenden Wachstumsgeschwindigkeit im Gebäudepark eher abnehmen, sind bei den Szenarien «Ersetzen» oder «Kombiniert» moderate bis erhebliche Zunahmen zu erwarten. Beinahe dramatisch ist der Anstieg der Outputflüsse, welche bis 2050 von etwa 0,8 auf rund 1,4 Mio. Tonnen pro Jahr («Ersetzen») bzw. 1,6 Mio. Tonnen pro Jahr («Kombiniert») zunehmen. Unter solchen Voraussetzungen muss das anfallende Rückbaumaterial viel intensiver als heute bewirtschaftet werden. Dies bedeutet, dass die Kapazität im Baustoffrecycling stark ausgebaut und der Einsatz von Recycling-Baustoffen massgeblich gefördert werden muss. Nur so wird es möglich sein, die Materialflüsse in der Stadt Zürich nachhaltig zu bewirtschaften.

In der Figur 4 sind die Lager und Flüsse für das Szenario «Kombiniert» und das Bezugsjahr 2050 zusammengefasst. Der Input in das System beträgt knapp 2 Mio. Tonnen pro Jahr. Jeweils 50% des Inputmaterials bestehen aus Primär- bzw. Recyclingmaterial. Der totale Outputfluss liegt bei über 1,6 Mio. Tonnen pro Jahr, wobei über 90% des Outputs in den Aufbereitungspro-

zess gelangen. Auch 2050 wird noch kein Fließgleichgewicht (Input = Output) erreicht. Die Lagerbildung liegt bei diesem Szenario im Bereich von 0,4 Mio. Tonnen pro Jahr. Der Vergleich des Outputflusses in die Aufbereitung, mit dem Recycling-Materialinput zeigt, dass nur rund zwei Drittel der Recycling-Materialmenge wieder in die Stadt Zürich zurückfliessen werden. Grundsätzlich könnte aus Sicht der Stoffflüsse sämtliches Recycling-Material wieder in die Stadt Zürich zurückgeführt werden. Allerdings würde dies bedeuten, dass Recycling-Betonprodukte sehr hohe Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung aufweisen müssten, was zum heutigen Zeitpunkt noch nicht gegeben ist. Es besteht aber durchaus die Chance, dass sich dies bis 2050 ändern wird. In diesem Fall lässt sich der Primärressourcenbedarf von mineralischen Baustoffen im Vergleich zu heute erheblich reduzieren.

Fazit

Das erarbeitete Modell und die Resultate aus der dynamischen Modellierung der Szenarien bilden eine wichtige Basis für nachhaltiges Ressourcenmanagement in der Stadt Zürich. Anhand der Szenarien lassen sich die langfristigen Auswirkungen von verschiedenen Umbaustrategien auf die Materialflüsse und Lager quantifizieren. In einem weiteren Schritt wurden die Graue Energie und die Betriebsenergie aus der Nutzung des Gebäudeparks in das dynamische Modell integriert. Damit

lässt sich nun die Frage, wie der bestehende Gebäudepark bis ins Jahr 2050 in Richtung der Zielvorstellung einer «2000-W-Gesellschaft» umgebaut werden kann, trotz der hohen Komplexität des Systems umfassend beurteilen. So kann beispielsweise gezeigt werden, dass sich diese Ziele nicht ausschliesslich mit der Erhöhung der Ersatzneubauraten erreichen lassen [Schneider und Rubli 2009]. Erfolgsversprechender ist die Kombination von erhöhten Sanierungs- und Ersatzneubauraten, weil damit eine genügend hohe Umbaugeschwindigkeit erreicht wird. Allerdings muss unter diesen Bedingungen das Ressourcenmanagement im Bereich der mineralischen Baustoffe erheblich optimiert werden.

www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen

Literatur

- [ECO2, 2007] ECO2-Rechner für die Stadt Zürich.
- [Schneider, Rubli 2007] Umwelt Perspektiven, Dezember 2007. Baustoffmanagement: Entwicklung eines Ressourcenmodells für mineralische Baustoffe für die Stadt Zürich, Illnau.
- [Schneider und Rubli, 2009] Amt für Hochbauten und Tiefbauamt der Stadt Zürich, 2009. Ressourcenmodell der mineralischen Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich: Dynamische Modellierung 1995–2050, Zürich.
- [Stat. JB07] Statistik Stadt Zürich, 2007. Statistisches Jahrbuch der Stadt Zürich 2007. Zürich