



Vorzüge nachhaltigen Bauens mit Beton



Susanne Kytzia

Aldo Rota

Felix Wenk

Ulrich Stüssi

Simon Lier

Nina Bless

Hochschule für Technik Rapperswil

31.12.2009

Abstract

Projektdauer: 1.3.09 bis 31.12.09

Kontakt: Prof. Dr. Susanne Kytzia (skytzia@hsr.ch)

Beton ist heute einer der wichtigsten Baustoffe überhaupt. Die Verwendungsmöglichkeiten scheinen unbegrenzt, sei es im Hoch- und Industriebau, Wasser-, Tief- und Tunnelbau oder Brücken- und Verkehrswegbau. Jährlich werden weltweit 5 km³ Beton produziert. Ein nachhaltiger Umgang mit diesem Baustoff ist deshalb unerlässlich. Und zwar auf ökologischer, gesellschaftlicher und ökonomischer Ebene.

In der bisherigen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion stehen die ökologischen Auswirkungen in Herstellung und Entsorgung von Beton im Vordergrund. Mögliche wirtschaftliche und gesellschaftlich relevante Vorteile in der Nutzung dieses Baustoffs werden hingegen kaum diskutiert. Das vorliegende Projekt soll diese Lücke schliessen. Dazu wird untersucht, wie die Eigenschaften des Bauprodukts Beton in den heute vorhandenen Publikationen und von Experten in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung beurteilt werden (Arbeitspaket 1). Anschliessend wird anhand von Fallbeispielen und Modellrechnungen die Relevanz dieser Eigenschaften für die Verwendung von Beton im Hochbau herausgearbeitet und gezeigt, wie sie sich bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau auswirken (Arbeitspakete 2 und 3). In einer Synthese werden die Schwerpunkte einer weiteren Entwicklung von Beton und seinen Einsatzmöglichkeiten aus Sicht einer nachhaltigen Entwicklung herausgeschält.

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 1 (Dokumentenanalyse und Expertenworkshop) zeigen, dass sich Beton in Bezug auf seinen Beitrag zum nachhaltigen Bauen weder als besonders negativ, noch als besonders positiv auszeichnet. Beton ist in der Schweiz gut verfügbar, breit und flexibel einsetzbar und bietet Vorteile beim Schutz vor Gefahren und bei der Werterhaltung. Er wird als «naturfern» wahrgenommen, aber seine Produktion und Nutzung ist nicht mit gravierenden Schäden von Menschen und/oder der Tieren und Pflanzen verbunden. Die wesentlichen ökologischen Probleme ergeben sich aus den Kohlendioxidemissionen bei der Zementproduktion und aus der Grösse der insgesamt umgesetzten Mengen (Transporte, Flächenversiegelung, Staub etc.).

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden wird die Relevanz der Baustoffe für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Dimension bislang nicht berücksichtigt. Dieser Aspekt wird von den Experten/innen betont. Beton werde sehr breit eingesetzt und sein Einsatz sei verhältnismässig einfach, lautete das übereinstimmende Urteil. Dies führe dazu, dass die Möglichkeiten des Baustoffs nicht optimal ausgenutzt werden könnten – sowie planerisch, konstruktiv als auch gestalterisch.

Im Arbeitspaket 2 (Fallbeispiele) werden drei Hochschulgebäude mit unterschiedlichen Materialien in der Tragwerkkonstruktion nach Kriterien des nachhaltigen Bauens verglichen (basierend auf der SIA 112/2). Es zeigt sich, dass die Wahl der Tragwerkskonstruktion die Nachhaltigkeit des Gebäudes kaum beeinflusst. Massgeblich für die Bewertung sind andere Faktoren wie das Gebäudealter, die Erschliessung mit öffentlichem Verkehr, das Raumkonzept, die Nutzungsflexibilität, die Erweiterungsmöglichkeiten am Standort, die Raumluftqualität und der sommerliche Wärmeschutz. Die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion beeinflusst in den gewählten Fallbeispielen die Wahrnehmung und die Nutzungsmöglichkeiten von Aussen- und Innenraum und bestimmt damit die Bewertung in den Themen «Gemeinschaft» und «Gestaltung» mit. Der Zusammenhang zum Themengebiet «Umweltbelastungen aus der Herstellung der Baustoffe» ergibt sich aus dem hohen Anteil des Tragwerks an der Gesamtmasse des Gebäudes. Die Stahlkonstruktion schneidet hier schlechter ab als die Stahlbetonkonstruktion und deutlich schlechter als die Holzkonstruktion.

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 3 (Modellrechnungen) untermauern die Aussage, dass die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion keinen entscheidenden Einfluss auf die Nachhaltigkeit von Gebäuden hat. Der Anteil des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch beträgt für eine Tragwerkskonstruktion aus Stahlbeton rund 7%. Stahlbeton liegt hier zwischen der besten Variante «Holz» und der schlechtesten Variante «Stahl». Die Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton ist jedoch doppelt so schwer wie die beiden anderen Varianten. Damit kompensiert die Masse den relativ geringen spezifischen Primärenergieaufwand des Stahlbetons. In Bezug auf die Baukosten ist die Variante «Stahlbeton» ungefähr gleich teuer wie Holz aber günstiger wie Stahl.

Als Fazit ergibt sich die Erkenntnis, dass man auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie weder spezifische Vorzüge noch Nachteile des Baustoffs «Beton» im nachhaltigen Bauen herausstellen kann. Die Autoren empfehlen der Zement- und Betonindustrie, die Entwicklung von Konzepten für Bau und Planung zu unterstützen, mit denen die lange technische Lebensdauer von Bauteilen aus Beton – als traditionelle Stärke des Baustoffs – nutzbringend für ein nachhaltiges Bauen eingesetzt werden kann. Ausserdem empfehlen sie, den Baustoff Beton als einen möglichen Baustoff im nachhaltigen Bauen zu begreifen und der Frage nachzugehen, wo dieser Baustoff am besten eingesetzt werden sollte.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	7
2. Übersicht über das Gesamtprojekt	16
2.1. Ausgangslage	16
2.2. Zielsetzung	16
2.3. Aufgaben und Arbeitspakete	17
2.3.1. Arbeitspaket 1: Eigenschaften von Beton	17
2.3.2. Arbeitspaket 2: Nachhaltigkeit von Gebäuden aus Beton	17
2.3.3. Arbeitspaket 3: Entwicklung von Modellgebäuden	18
2.4. Produkte	18
3. Stand des Wissens – Ergebnisse aus Arbeitspaket 1	19
3.1. Einleitung: Beton im Kontext des nachhaltigen Bauens	19
3.1.1. Nachhaltiges Bauen geht nur mit «nachhaltigem Beton»	19
3.1.2. Ziel der vorliegenden Untersuchung	21
3.1.3. Vorgehen	21
3.2. Ergebnisse: Eigenschaften von Beton in Hinblick auf die Nachhaltigkeit	23
3.2.1. Umwelt	25
3.2.1.1. Ressourcen schonen: Ressourcenverbrauch	25
3.2.1.2. Umwelt schützen / Lebensraum erhalten	30
3.2.1.3. Nachhaltiges Design unterstützen	33
3.2.2. Gesellschaft	36
3.2.2.1. Gesundheit schützen / Wohlbefinden fördern	36
3.2.2.2. Nachhaltiges Design unterstützen	40
3.2.3. Wirtschaft	43
3.2.3.1. Lokale Wirtschaft fördern	43
3.2.3.2. Kosteneffiziente Produktion	45
3.2.3.3. Lebenszykluskosten	45
3.2.3.4. Werterhaltung	47
3.3. Ergebnisse des Expertenworkshops	49
4. Nachhaltigkeit von Gebäuden aus Beton – Ergebnisse aus Arbeitspaket 2	53
4.1. Einleitung: Rolle der Baustoffe bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden	53
4.1.1. Ziel der vorliegenden Untersuchung	53
4.1.2. Vorgehen	53
4.2. Beschreibung der Fallbeispiele	57
4.2.1. Stahlkonstruktion: Hochschule Rapperswil	57

4.2.2.	Holzkonstruktion: Schweizerische Hochschule für Holzwirtschaft Biel.....	57
4.2.3.	Betonkonstruktion: Universität St. Gallen	58
4.3.	Ergebnisse	59
4.3.1.	Stahlkonstruktion: Hochschule Rapperswil.....	59
4.3.2.	Holzkonstruktion: Schweizerische Hochschule für Holzwirtschaft Biel.....	61
4.3.3.	Betonkonstruktion: Universität St. Gallen	63
4.3.4.	Vergleich der Gebäude	66
4.4.	Diskussion und Schlussfolgerungen	68
5.	Parametervariationen in Modellgebäuden – Ergebnisse aus Arbeitspaket 3	69
5.1.	Einleitung: Warum zeichnet sich Beton nicht besonders aus?	69
5.1.1.	Ziel der vorliegenden Untersuchung	70
5.1.2.	Vorgehen.....	70
5.2.	Ergebnisse der Modellrechnungen für die Dimension «Umwelt»	77
5.2.1.	Ergebnisse für das Modellhaus mit einer Grundfläche von 100 m ²	77
5.2.1.1.	Vergleich des Rohbaus (ohne Nutzung und Erneuerung)	77
5.2.1.2.	Vergleich einschliesslich Nutzung und Erneuerung.....	80
5.2.2.	Ergebnisse der Parametervariation	81
5.3.	Ergebnisse der Modellrechnungen für die Dimension «Wirtschaft»	83
5.3.1.	Ergebnisse für das Modellhaus mit einer Grundfläche von 100 m ²	83
5.3.2.	Ergebnisse der Parametervariation	85
5.4.	Ergebnisse für die Dimension «Gesellschaft»	86
5.5.	Schlussfolgerungen.....	86
6.	Schlussfolgerungen	89
7.	Referenzen.....	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ergebnisse der Auswertung der Befragung der Experten, orange = Nachteile von Beton; grün = Vorteile von Beton (eigene Darstellung)	8
Abbildung 2: Erkenntnisse aus der Dokumentenanalyse (eigene Darstellung)	9
Abbildung 3: Ergebnisse des Vergleich des Fallbeispiele (eigene Darstellung)	11
Abbildung 4: Aufteilung des Primärenergieverbrauchs der verschiedenen Varianten des Modellhauses mit einer Grundfläche von 100 m ² während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren auf verschiedene Bauteile und die Heizenergie. Quelle: eigene Darstellung	13
Abbildung 5: Materialflüsse von mineralischen Rohstoffen (Kies und Beton) und Biomasse (Holz) für die Aktivität «Wohnen und Arbeiten» einer Schweizer Region im Mittelland in Tonnen pro Einwohner und Jahr (bei Holz in Tonnen Trockensubstanz). Eigene Darstellung auf der Grundlage von Müller (1998) und Redle (1999)	19
Abbildung 6: Anteile von Beton an der Gesamtmasse ausgewählter Häuser in Deutschland mit unterschiedlichen Nutzungen. Wobei: «DLG» = Dienstleistungsgebäude; «EFH» = Einfamilienhäuser; «Lager» = Lager; «MFH» = Mehrfamilienhäuser. Eigene Darstellung auf der Grundlage von Gruhler et al. (2002) und Matasci (2006)	20
Abbildung 7: Übersicht über den Ablauf des Expertenworkshops vom 18.8.2009.	22
Abbildung 8: Konzept zur Beschreibung der Nachhaltigkeit von Baustoffen im Kontext der Bauwerksentwicklung, eigene Darstellung	24
Abbildung 9: Vergleich der Materialzusammensetzung von alternativen Aussenwänden eines Einfamilienhauses aus Porenbetonsteinen (oben) oder in Holzelementbauweise (unten). Quelle: Knauff und Graubner (2008)	27
Abbildung 10: Entwicklung des «Direct Material Input» (DMI) in der Schweiz. Darunter versteht man die Summe aus der inländischen Ressourcenentnahme (in Tonnen) und dem importierten Material (in Tonnen). Quelle: BFS (2005), S. 26	28
Abbildung 11: Gegenüberstellung der Umweltbelastungspunkte UBP (pro kg) und den durchschnittlichen Massenanteilen der in Einfamilienhäusern eingesetzten Baumaterialien. Eigene Darstellung auf Grundlage von Althaus, Lehmann, Kellenberger (2008) und Gruhler, Böhm, Deilmann, Schiller (2002)..	30
Abbildung 12: Handlungsmöglichkeiten der Zement und Betonindustrie zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen. Quelle: Kytzia und Seyler 2009	32
Abbildung 13: Ökologische Bewertung von Eisenbahnschwellen in der Schweiz. Streckenschwellen aus vorgespanntem Beton, Profilstahl und teerölimprägniertem Buchenholz. Quelle: Künniger und Richter (1998)	34
Abbildung 14: Vergleich der Treibhausgasemissionen zweier alternativer Systeme der Böschungsstabilisierung. Der Begriff «Tecco» steht für ein Produkt der Firma Geobrugg AG, dass ein Stahlnetz verwendet. Quelle: Kytzia et al. (2008)	34
Abbildung 15: Luft- und Trittschall verschiedener Deckensysteme. Quelle: DAfStb (2007)	38
Abbildung 16: Anteil in % der Bruttowertschöpfung der Baubranche an der Gesamtwirtschaft in den Schweizer MS-Regionen, 2006	43
Abbildung 17: Marktanteile in den Tragkonstruktionen Bei EFH, Neubau 2006. (Quelle: KMU Zentrum Holz [2006])	44
Abbildung 18: Materielle Zusammensetzung eines Einfamilienhauses. Quelle: Haag 2008	45
Abbildung 19: Übersicht Lebenszykluskosten. Quelle: Preisig & Kasser (2005)	46
Abbildung 20: Ergebnisse der Auswertung der Befragung der Experten (eigene Darstellung)	51
Abbildung 21: Fassadenansicht und Eingangsbereich Schulgebäude 1 an der Hochschule für Technik Rapperswil	57

Abbildung 22: Fassadenansichten der Hochschule für Holzwirtschaft in Biel.....	58
Abbildung 23: Verstärkende Massnahmen betreffend Erdbebensicherheit (links) und sichtlich guter Zustand der Original-Treppe (rechts)	59
Abbildung 24: Überblick über den Vergleich der drei Fallbeispiele.....	66
Abbildung 25: Detaillierter Vergleich der Beurteilungsergebnisse der drei Fallbeispiele	67
Abbildung 26: Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Lebenszyklusanalyse für ein Einfamilienhaus in den Varianten «Holzbauweise» und «Massivbauweise» in der Wirkungskategorie «Treibhauseffekt» Quelle: Knauff und Graubner, 2008, S. 26.	69
Abbildung 27: Skizze des Musterobjektes, eigene Darstellung.....	71
Abbildung 28: Skizze Aufbau mit Beton (ohne Dampfbremse und Abdichtung), eigene Darstellung.....	73
Abbildung 29: Skizze Aufbau mit Holz (ohne Dampfbremse und Abdichtung), eigene Darstellung.....	74
Abbildung 30: Skizze Aufbau mit Stahl (ohne Dampfbremse und Abdichtung), eigene Darstellung.....	74
Abbildung 31: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung der Bauteile für die drei Varianten in Megajoule: Holzkonstruktion (oben), Stahlbetonkonstruktion (Mitte) und Stahlkonstruktion (unten). In der linken oberen Ecke ist jeweils der gesamte Verbrauch von Primärenergie für das Bereitstellen der Bauteile angegeben. Quelle: eigene Darstellung.	78
Abbildung 32: Anteile der verschiedenen Materialien am Primärenergieverbrauch der Bereitstellung der Bauteile bzw. an der Masse für die drei Varianten: Holzkonstruktion (oben), Stahlbetonkonstruktion (Mitte) und Stahlkonstruktion (unten). In der rechten oberen Ecke ist jeweils der gesamte Masse der hier betrachteten Bauteile. Die Abkürzung PE steht für Primärenergie. Quelle: eigene Darstellung.	79
Abbildung 33: Aufteilung des Primärenergieverbrauchs der verschiedenen Varianten des Modellhauses mit einer Grundfläche von 100 m ² während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren auf verschiedene Bauteile und die Heizenergie. Quelle: eigene Darstellung.	80
Abbildung 34: Variation des Anteils des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Grösse des Gebäudes (bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren). Die Abkürzung PE steht für Primärenergie. Quelle: eigene Darstellung.	81
Abbildung 35: Variation des Anteils des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer (bei einer Gebäudegrösse von 300 m ² Geschossfläche). Die Abkürzung PE steht für Primärenergie. Quelle: eigene Darstellung.	82
Abbildung 36: Anteil der Primärenergie (PE) der Bereitstellung der Bauteile in den Geschossdecken am gesamten Primärenergieaufwand der Bereitstellung der Bauteile (ohne Nutzung und Erneuerung) für drei Varianten mit unterschiedlicher Gebäudegrösse. Quelle: eigene Darstellung.....	82
Abbildung 37: Kosten der Bauteile für die drei Varianten in Schweizer Franken (CHF): Holzkonstruktion (oben), Stahlbetonkonstruktion (Mitte) und Stahlkonstruktion (unten). In der linken oberen Ecke ist jeweils der Gesamtbetrag der Baukosten für die hier betrachteten Bauteile angegeben. Quelle: eigene Darstellung.....	84
Abbildung 38: Anteil der Kosten der Geschossdecken an den Gesamtkosten des Rohbaus für drei Varianten mit unterschiedlicher Gebäudegrösse. Quelle: eigene Darstellung.	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse des Vergleich der Varianten des Modellhauses (eigene Darstellung)	12
Tabelle 2: Zuordnung der Oberkategorien gemäss Abbildung 8 zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit. Die in der Tabelle genannten Kriterien zur Bewertung sind als Beispiel für mögliche Bewertungskriterien zu verstehen.	25
Tabelle 3: Graue Energie verschiedener Baustoffe. Quelle: Althaus et al. 2008.	26
Tabelle 4: Lebensdauer Bauteile. Quelle: IFB (2004), eigene Darstellung	48
Tabelle 5: Ergebnisse Dokumentenanalyse, Bereich «Wirtschaft»	49
Tabelle 6: Ergebnisse Dokumentenanalyse, Bereich «Ökologie»	50
Tabelle 7: Ergebnisse Dokumentenanalyse, Bereich «Gesellschaft»	50
Tabelle 8: Quellen zur Beschreibung der drei Fallbeispiele	56
Tabelle 9: Beurteilung des Fallbeispiels Rapperswil in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1).....	60
Tabelle 10: Beurteilung des Fallbeispiels Rapperswil in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1).....	61
Tabelle 11: Beurteilung des Fallbeispiels Biel in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)	62
Tabelle 12: Beurteilung des Fallbeispiels Biel in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)	63
Tabelle 13: Beurteilung des Fallbeispiels St. Gallen in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1).....	64
Tabelle 14: Beurteilung des Fallbeispiels St. Gallen in den Kriterien «Gesellschaft» und «Wirtschaft» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)	65
Tabelle 15: Aufbau der Bauteile des Modellhauses, eigene Darstellung	72
Tabelle 16: Annahmen zur Variation der Bauteile in Abhängigkeit von der Gebäudelänge	75
Tabelle 17: Annahmen zu Betrieb und Erneuerung	75
Tabelle 18: Übersicht über die gewählten Bewertungskriterien	76
Tabelle 19: Ausgewählte Entwurfsregeln im nachhaltigen Bauen und die Bewertung des Einsatzes von Beton. Quelle: eigene Darstellung.....	90

1. Zusammenfassung

Beton ist heute einer der wichtigsten Baustoffe überhaupt. Die Verwendungsmöglichkeiten scheinen unbegrenzt, sei es im Hoch- und Industriebau, Wasser-, Tief- und Tunnelbau oder Brücken- und Verkehrswegbau. Jährlich werden weltweit fünf Milliarden Kubikmeter Beton produziert. Ein nachhaltiger Umgang mit diesem Baustoff ist deshalb unerlässlich. Und zwar auf ökologischer, gesellschaftlicher und ökonomischer Ebene.

Ziel des vorliegenden Projektes ist gemäss Ausschreibung der cemsuisse «... einerseits die Ermittlung der Stärken und Schwächen von Beton als Bauprodukt und andererseits bei dessen Verwendung im Gebäude unter Berücksichtigung des gesamten Prozesses von der Herstellung bis zu Rückbau und Wiederverwertung.» Um dieses Ziel zu erreichen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- a. Welche Eigenschaften des Bauprodukts Beton bestimmen seinen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung?
- b. Wie werden diese Eigenschaften in den heute vorhandenen Publikationen und von Experten in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung beurteilt?
- c. Wie relevant sind diese Eigenschaften für die Verwendung von Beton im Hochbau?
- d. Wie wirken sich diese Eigenschaften von Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau aus?
- e. Welche Schwerpunkte ergeben sich für die weitere Entwicklung von Beton und seinen Einsatzmöglichkeiten aus Sicht einer nachhaltigen Entwicklung?

Das Projekt hat grundsätzlich einen explorativen Charakter. Es geht darum, die Stärken und Schwächen des Bauprodukts Beton möglichst umfassend zu erfassen und zu beschreiben. Dazu werden drei unterschiedliche Ansätze gewählt.

In einem ersten Arbeitspaket werden die ersten drei Fragen des Projektes untersucht, die auf eine Analyse der Relevanz der Betoneigenschaften für die nachhaltige Entwicklung abzielen. Dazu werden Dokumente analysiert, die in den vergangenen Jahren von Instituten in der Schweiz und in anderen Ländern publiziert wurden. Ausserdem wird ein Expertenworkshop durchgeführt mit der Begleitgruppe und dem Projektteam.

Im zweiten und dritten Arbeitspaket wird der vierten Frage des Projektes nachgegangen, die sich mit den Auswirkungen der Eigenschaften von Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau beschäftigt.

Dazu werden im zweiten Arbeitspaket drei unterschiedliche Hochschulgebäude als Fallbeispiele untersucht, um zu zeigen, wie sich ein konkretes Gebäude aus Beton von anderen Gebäuden gleicher Nutzung unterscheidet, in denen die massgeblichen Funktionen der Betonbauteile durch Bauteile aus anderen Materialien erfüllt werden (vor allem Stahl und Holz). Dabei wird von den Bewertungskriterien der SIA Empfehlung 112/1 «Nachhaltiges Bauen - Hochbau» ausgegangen.

Im dritten Arbeitspaket wird mit Hilfe von Modellrechnungen untersucht, wie sich die Bewertung ausgewählter Kriterien des nachhaltigen Bauens in Abhängigkeit von der Materialwahl in der Tragwerkskonstruktion verändert, wenn man ausserdem einzelne Gebäudeeigenschaften variiert wie beispielsweise die Grösse oder die Nutzungsdauer. Grundlage dieser Untersuchung ist die Definition eines Modellgebäudes, das durch verschiedene Parameter definiert ist wie Grösse, Form, Nutzung, Nutzungsdauer oder klimatische Bedingungen des Standorts. Im zu entwickelnden Modell wird der Rohbau dieses Gebäudes abgebildet. Das Modell wird so gewählt, dass man eine beliebige Anzahl von plausiblen und realisierbaren Varianten des Gebäudes generieren kann, die sich durch die Wahl der Bauprodukte für die unterschiedlichen Bauteile unterscheiden.

a. Stand des Wissens – Ergebnisse aus Arbeitspaket 1

Die Dokumentenanalyse zeigt, dass sich Beton in Bezug auf seinen Beitrag zum nachhaltigen Bauen weder als besonders negativ, noch als besonders positiv auszeichnet. Als zentrale Ergebnisse werden die in Abbildung 2 beschriebenen Merkmale des Baustoffs Beton identifiziert, die in den analysierten Dokumenten

als Vor- bzw. Nachteile im Nachhaltigen Bauen eingestuft werden. Diese Merkmale wurden im Rahmen des Expertenworkshops hinsichtlich einerseits ihrer Bedeutung und andererseits dem Vorhandensein von Verbesserungspotenzialen gewichtet.

In den in Abbildung 1 dargestellten Ergebnissen wird deutlich, dass dem Potenzial der Nutzung von Beton als Wärmespeicher eine grosse Bedeutung zugewiesen wird. Hinsichtlich des Vorhandenseins von Verbesserungspotenzialen in diesem Bereich gehen die Meinungen der Experten jedoch stark auseinander (siehe Anhang A). Als weitere bedeutende Vorteile werden die Lebensdauer, die Varietät/Formbarkeit und die Schutzwirkung angesehen. Allerdings sieht man hier kaum Verbesserungspotenziale. Grosse Verbesserungspotenziale sehen die Experten beim Einsatz von Sekundärrohstoffen und dem geringen spezifischen Energieverbrauch des Materials. Ihre Einschätzungen der Bedeutung dieser Vorteile sind jedoch eher mässig. Als wesentlichen Nachteil sieht man die CO₂-Emissionen verbunden mit einem relativ grossen Verbesserungspotenzial. Die Erneuerungsrate der Rohstoffe wird als weiterer wichtiger Nachteil gesehen – an dem man aber nicht viel verändern kann.

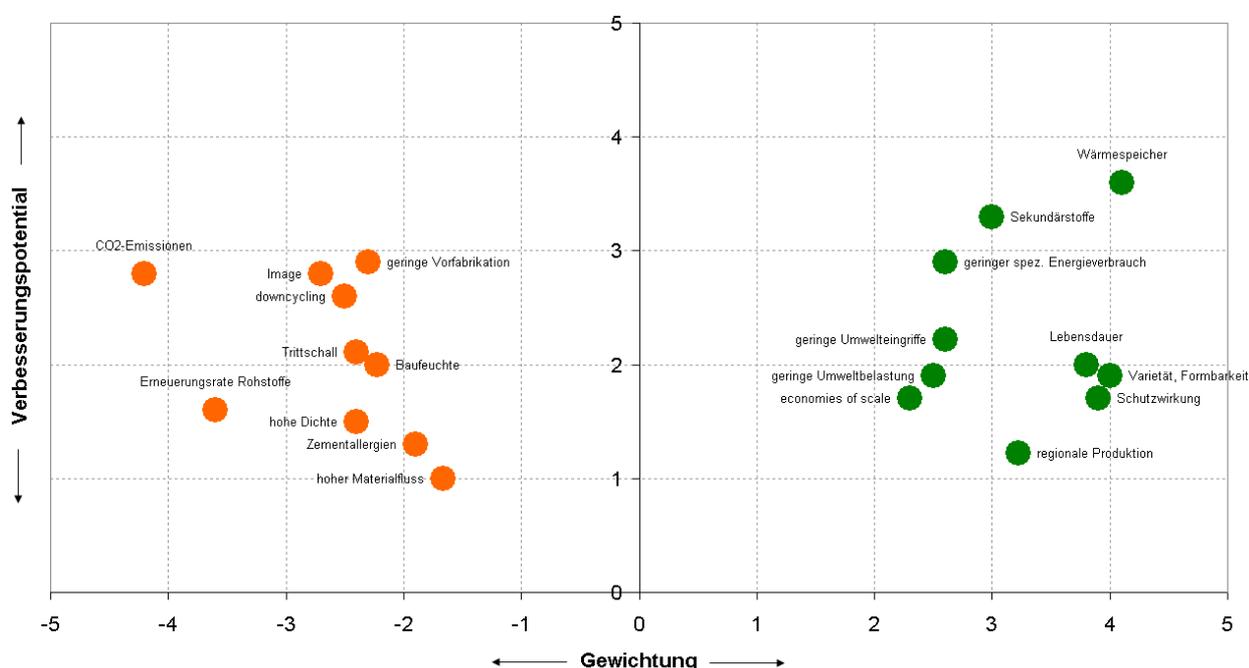


Abbildung 1: Ergebnisse der Auswertung der Befragung der Experten, orange = Nachteile von Beton; grün = Vorteile von Beton (eigene Darstellung)

(Gewichtung: -5 = sehr grosser Nachteil; +5 = sehr grosser Vorteil; 0 = kein Nach- resp. Vorteil. Verbesserungspotential: 0 = keine Verbesserungsmöglichkeiten, 5 = sehr grosse Verbesserungsmöglichkeiten; Fachrichtungen der am Workshop befragten Experten: Beton-/Zementtechnologie, Architektur, Baubiologie, Energie/Umwelt)

In diesen Ergebnissen bestätigt sich der Eindruck aus der Dokumentenanalyse, dass das Thema «nachhaltiges Bauen mit Beton» bislang vor allem auf der Ebene der ökologischen Vor- und Nachteile des Baustoffs Beton behandelt wird. Auch in der Diskussion der Experten/innen zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen einem «nachhaltigen Baustoff» und einem «nachhaltigen Gebäuden» nicht klar ist. Von den anwesenden Architekten wurde der Wunsch geäussert «die Betonindustrie soll einen möglichst nachhaltigen Beton herstellen, dann machen wir daraus nachhaltige Gebäude», mit dem Hinweis die Baumaterialwahl sei durch andere Faktoren vorgegeben (Fundamente, Erdbebensicherheit, Brandschutz) und bestimme die Möglichkeiten eines nachhaltigen Designs nicht («man kann heute mit (fast) jedem Material eine bestimmte Gebäudeeigenschaft erreichen»).

		Vorteile	Nachteile
Gesellschaft	Emissionen im Lebensweg	Es sind keine humantoxischen Emissionen während der Nutzung bekannt [S.36]	Hautkontakt mit nassem Zement kann Ekzeme und Allergien hervorrufen [S.36]
	Schallschutz	gute Abschirmung gegen Luftschall [S.38]	schlechte Abschirmung gegen Trittschall [S.38]
	Wärme	hohe Wärmespeicherfähigkeit gute Wärmedämmung [S.36]	hohe Wärmeleitfähigkeit [S.36]
	Sorptionsverhalten		schlechte Wasserdampf-Absorptionsfähigkeit [S.37]
	Dampfdiffusion		relativ hoher Diffusionswiderstandsfaktor [S.37]
	Baufeuchte / Austrocknungsdauer		hohe Baufeuchte bei Neubauten, lange Austrocknungsdauer [S.37]
	Abschirmung von elektrischen und magnetischen Feldern	im Vergleich zu anderen Baustoffen keine Abschirmungseigenschaften [S.38 ff.]	besseren oder schlechteren
	Gestaltung	hohe Varietät und Anwendungsbreite, Formbarkeit [S.40], hohe Nutzungsflexibilität möglich [S.41]	schlechtes Image in Bevölkerung, Erscheinungsbild von Beton = massig, nüchtern, kalt [S.41]
	Sicherheit	hoher Schutz vor Feuer, Hochwasser, Erdbeben, Explosionen [S.42]	
Wirtschaft	lokale Wirtschaftsförderung	regionale Betonproduktion [S.44]	
	kosteneffiziente Produktion	«economies of scale» aufgrund von Massenproduktion [S.45]	Kostenvorteile durch Vorfabrikation nur selten genutzt, Mehrkosten durch hohe Baufeuchte [S.45]
	Lebenszykluskosten	Baustoffwahl spielt bei Lebenszykluskosten untergeordnete Rolle. Bei Erstellungskosten keine Unterschiede zwischen Massiv- und Leichtbauweise feststellbar. [S.45 ff.]	
	Werterhaltung	Lebensdauer von Bauteilen aus Beton nur unwesentlich grösser als bei Holzbauteilen [S.48]. Entscheidender als das Material ist die Abstimmung der Lebensdauer der Bauteile untereinander zwecks Verringerung von Instandhaltungskosten. Leichte Vorteile von Massivbauten bei Wiederverkaufspreis, Vermarktungsdauer und Vermarktungschance [S.48]	
Umwelt	Energieverbrauch	Geringer spezifischer Verbrauch (MJ/kg). [S.26] Möglichkeit einer Nutzung von Bauteilen als Wärmespeicher (z.B. durch thermische Bauteilaktivierung). [S.35]	Hohe spezifische Dichte (kg pro m ³ umbauter Raum). [S.26]
	Materialverbrauch	Rohstoffe in der Schweiz gut verfügbar (mit Ausnahme der Brennstoffe) [S.29]	Rohstoffe erneuern sich sehr langsam («nicht erneuerbar»). [S.29]
		Es werden grosse Mengen an Sekundärroh- und -brennstoffen eingesetzt. [S.30]	Wiederverwertung nur als «down-cycling» möglich. [S.29]
		Kaum Verluste bei der Materialgewinnung, «versteckte Flüsse». [S.28]	Mineralische Baustoffe bestimmen 50% des Materialumsatzes der Schweiz. [S.28]
	Umweltbelastungen	Relativ wenig Belastungen im Bereich Ökotoxizität, Überdüngung, Versauerung u.ä. während der Lebensdauer. In der Regel kaum bleibende, unerwünschte Eingriffe in Landschaft und Wasserhaushalt in der Schweiz. [S.30 ff]	Erhebliche Emissionen an Kohlendioxid. [S.31]
	Nachhaltiges Design	Bauteile haben eine lange technische Lebensdauer. [S.33]	Bauteile haben ein erhebliches Gewicht. [S.33]

Abbildung 2: Erkenntnisse aus der Dokumentenanalyse (eigene Darstellung)

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden wird die Relevanz der Baustoffe für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Dimension jedoch bislang nicht berücksichtigt. Dieser Aspekt zeigt sich in den Ergebnissen der Dokumentenanalyse, er wurde aber auch von den Experten/innen betont. Beton

werde sehr breit eingesetzt und sein Einsatz sei verhältnismässig einfach, lautete das übereinstimmende Urteil. Dies führe dazu, dass die Möglichkeiten des Baustoffs nicht optimal ausgenutzt werden könnten – sowie planerisch, konstruktiv als auch gestalterisch. Uneinig war man sich hingegen über die Konsequenz aus dieser Erkenntnis. Während eine Reihe von Experten/innen die Meinung vertrat, man solle die Anwendung von Beton möglich einfach halten, damit man Fehler vermeiden könne, vertraten andere Experten/innen die Auffassung, das man die Möglichkeiten von technologischen Entwicklungen des Baustoffs möglichst vorantreiben und durch entsprechende Qualifizierungsmassnahmen ihre Verbreitung forcieren sollte.

b. Nachhaltigkeit von Gebäuden aus Beton – Ergebnisse aus Arbeitspaket 2

Eine vergleichende Bewertung von drei Hochschulgebäuden mit unterschiedlichen Materialien in der Tragwerkkonstruktion nach Kriterien des nachhaltigen Bauens zeigt, dass sich diese Gebäude im Bereich «Umwelt» am deutlichsten unterschieden. Hier schneidet das Gebäude mit einer Tragwerkkonstruktion aus Holz am besten ab; am schlechtesten wird das Gebäude mit einer Tragwerkkonstruktion aus Stahl bewertet. Die Unterschiede im Bereich «Wirtschaft» sind deutlich kleiner, im Bereich «Gesellschaft» zeigen sich nahezu keine Unterschiede in der Gesamtbetrachtung.

Massgeblich für die beobachteten Unterschiede sind folgende Faktoren:

- **Gebäudealter:** Die beiden älteren Gebäude – Rapperswil und St. Gallen – haben einen relativ hohen Betriebsenergieverbrauch, waren von unerwarteten Instandsetzungsmassnahmen zur Entfernung kritischer Baustoffe (Asbest, PCB) betroffen und nutzen die Grundfläche relativ schlecht aus. Das jüngere Gebäude in Biel ist hier klar im Vorteil, da der Energiestandard im Neubau höher war, keine bislang als kritisch bekannten Baustoffe eingesetzt wurden und das Bauland knapp war.
- **Erschliessung mit öffentlichem Verkehr:** Während die Hochschule Rapperswil hervorragend erschlossen ist, stellen die Anreisewege zu den Hochschulgebäuden in Biel und St. Gallen mit dem öffentlichen Verkehr eine Einschränkung dar. Dies wirkt sich auf die Beurteilung in den Bereichen «Gesellschaft» und «Umwelt» aus.
- **Offenes Raumkonzept:** Die Gebäude der Hochschulen Rapperswil und St. Gallen haben ein relativ offenes Raumkonzept im Vergleich zum Gebäude in Biel. Dies wirkt sich vor allem im Bereich «Gesellschaft» positiv aus.
- **Nutzungsflexibilität/Erweiterungsmöglichkeiten am Standort:** Hier zeichnet sich das Gebäude in Rapperswil positiv aus, während die anderen beiden Gebäude deutlich abfallen.
- **Raumluftqualität/Sommerlicher Wärmeschutz:** Hier zeichnet sich das Gebäude in St. Gallen positiv aus, während bei den beiden anderen Gebäuden Probleme auftreten.
- **Rohstoffe/Umweltbelastungen bei der Materialherstellung:** Hier fällt vor allem die Stahlkonstruktion in Rapperswil negativ auf, während sich die Holzkonstruktion in Biel positiv abhebt.

Kaum Unterschiede gibt es hingegen bei der räumlichen Identität/Wiedererkennung, da alle drei Gebäude durch ihre jeweils spezifische Konstruktion auffallen. Sie unterscheiden sich darin jedoch von durchschnittlichen Gebäuden. Ebenso durchgehend positiv wird die Ausstattung der Gebäude bewertet.

Durchgehend negativ fällt der Anteil an erneuerbaren Energien auf. Hier sind alle drei Gebäude eher konservativ und haben erhebliche Optimierungspotenziale. In diesem Vergleich zeigen sich Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Bewertung und der Materialwahl der Tragwerkkonstruktion in den Themen «Gemeinschaft», «Gestaltung» und «Baustoffe».

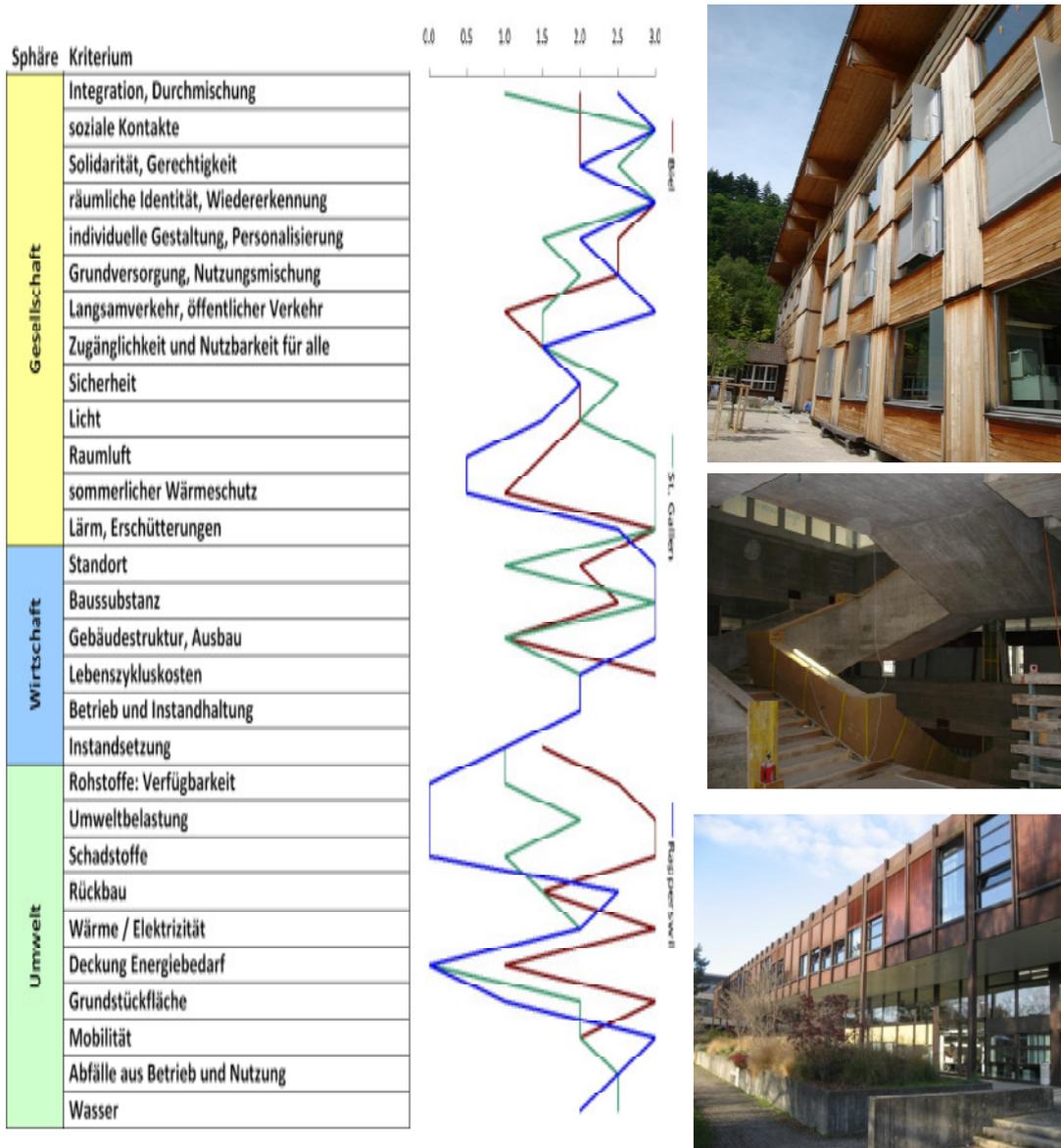


Abbildung 3: Ergebnisse des Vergleichs des Fallbeispiels (eigene Darstellung)

Die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion beeinflusst in den gewählten Fallbeispielen die Wahrnehmung von Aussen- und Innenraum und bestimmt damit die Bewertung in den Themen «Gemeinschaft» und «Gestaltung» mit. Da aber bei allen drei Fallbeispielen die Materialwahl den Aussen- und Innenraum prägt, treten hier kaum Unterschiede zwischen den Fallbeispielen auf und es wird keine positive oder negative Wertung der unterschiedlichen Materialien vorgenommen. Einzig bei dem Gebäude in Biel bieten sich aufgrund seiner Nutzung als Holzfachschule grössere Identifikationsmöglichkeiten durch die Nutzer. In St. Gallen hingegen wirkt das Gebäude im Quartier eher störend – wobei hier die Nutzung wahrscheinlich massgeblicher ist als die Gestaltung.

Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit der Aneignung der Gebäude durch die Nutzer. Dieser Aspekt wird in St. Gallen schlechter beurteilt als in den anderen beiden Gebäuden, da es sich um einen Sichtbetonbau handelt, der relativ wenig flexibel nutzbar ist. Es findet hier kaum eine Aneignung durch die Nutzer statt. Entscheidend für diese Zusammenhänge ist jedoch das Zusammenwirken von Gestaltung – vor allem dem Raumkonzept – und der Materialwahl.

Der Zusammenhang zwischen Materialwahl und der Bewertung im Themengebiet «Baustoffe» ist sehr deutlich, da ein erheblicher Anteil der Gesamtmasse der Baustoffe im Tragwerk steckt. Damit schneidet die Stahlkonstruktion hier schlechter ab als die Stahlbetonkonstruktion und deutlich schlechter als die

Holzkonstruktion. Auf die Betriebsenergie hat dies aber keinen Einfluss. Hier sind das Baujahr und der damit verbundene Energiestandard massgeblich.

c. Nachhaltigkeit von Gebäuden aus Beton – Ergebnisse aus Arbeitspaket 3

Im Vergleich verschiedener Materialien in der Tragwerkskonstruktion werden bezogen auf den Gebäuderohbau Unterschiede zwischen alternativen Materialien sichtbar (Tabelle 1).

	Primärenergieaufwand	Baukosten
Stahl	... hat einen deutlich höheren Primärenergieaufwand als die Alternativen. Der Unterschied wird tendenziell überschätzt, da die Stahlmenge im Modellhaus sehr grosszügig bemessen wird. Der Unterschied im Primärenergieaufwand ist jedoch fast 50% gegenüber dem Stahlbeton und knapp 100% gegenüber dem Holz, so dass wir davon ausgehen können, dass diese Aussage robust ist.	... liegen rund 65% höher als die Alternativen, so dass wir davon ausgehen können, dass diese Aussage auch angesichts möglicher Fehler in den Abschätzungen robust ist.
Holz	... hat einen deutlich geringeren Primärenergieaufwand als die Alternativen. Der Unterschied zum Stahlbeton beträgt jedoch nur rund 30%. Dies ist aber auch dadurch bedingt, dass einerseits die Holzmenge tendenziell überschätzt wird. Andererseits wird ein Dämmstoff gewählt, dessen spezifischer Primärenergieaufwand relativ gross ist. In der Variante mit einer Tragwerkskonstruktion aus Holz dominiert der Primärenergieaufwand dieses Dämmstoffs die Ergebnisse. Würde man einen weniger energieintensiven Dämmstoff wählen, so vergrösserte sich der Abstand zur Stahlbetonkonstruktion.	... ungefähr gleich teuer wie Stahlbeton aber günstiger wie Stahl.
Stahlbeton	... liegt damit in Bezug auf seinen Primärenergieaufwand zwischen den beiden Alternativen. Es zeichnet sich aus durch seine grosse Masse: es ist doppelt so schwer wie die beiden anderen Varianten. Damit kompensiert die Masse den relativ geringen spezifischen Primärenergieaufwand des Stahlbetons.	... ungefähr gleich teuer wie Holz aber günstiger wie Stahl.

Tabelle 1: Ergebnisse des Vergleich der Varianten des Modellhauses (eigene Darstellung)

Mit zunehmender Nutzungsdauer der Gebäude sinkt die Relevanz der Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien in der Tragwerkskonstruktion. Aber die Relevanz dieser Unterschiede ist generell klein (siehe Abbildung 1).

Der Anteil des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch ist für eine Tragwerkskonstruktion aus Holz ab einer Nutzungsdauer von 30 Jahren kleiner als 5% (bei einer Gebäudegrösse von 300 m² Geschossfläche). Er sinkt mit zunehmender Nutzungsdauer auf unter 2% bei 90 Jahren. Bei einer Tragwerkskonstruktion aus Stahlbeton liegt diese Spannweite – unter den sonst gleichen Annahmen - zwischen 10% (bei 30 Jahren) und 5% (bei 90 Jahren). Bei der Variante «Stahl» sind es 25% (bei 30 Jahren) und 10% (bei 90 Jahren). Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist zu berücksichtigen, dass wir von einem Neubau mit gutem Energiestandard ausgehen. Daher können wir davon ausgehen, dass der Materialwahl in der Tragwerkkonstruktion bei der Optimierung des Primärenergieaufwands eines Gebäudes keine grosse Priorität zukommt. Insbesondere für Gebäude mit langer Nutzungsdauer ist weder die Materialwahl noch die Materialmenge im Tragwerk entscheidend. Es sollte vielmehr die Nutzungsdauer und der Betriebsenergieverbrauch optimiert werden.

Bei den Lebenszykluskosten dominieren die Baukosten die Ergebnisse der Analyse, da sich diese unmittelbar auf die Kapitalkosten auswirken. Die Kosten der Betriebsenergie sind vernachlässigbar. Damit ist die Tragwerkskonstruktion aus Stahlbeton die günstigste. In dieser Variante übersteigen jedoch bereits nach 30 Jahren die Kosten der Erneuerung der Fenster, die Baukosten der Tragwerkkonstruktion (unter der Annahme, dass die Teuerung der Baukosten nicht wesentlich höher ist als der zur Berechnung der

Lebenszykluskosten angenommene Diskontierungssatz). Bei der Variante mit Holzkonstruktion sind die Kosten der Fenster nach 30 Jahren in der gleichen Grössenordnung wie die Kosten des Holzes; bei der Variante mit Stahlkonstruktion ist dies allerdings erst nach 90 Jahren der Fall. Hier bleibt der Stahl der dominierende Baustoff. Aus diesen Ergebnissen folgern wir, dass auch bei der Optimierung der Lebenszykluskosten für Gebäude mit langer Nutzungsdauer weder die Materialwahl noch die Materialmenge im Tragwerk entscheidend sind. Es sollten vielmehr die Nutzungsdauer und die Instandhaltung/-setzung optimiert werden.

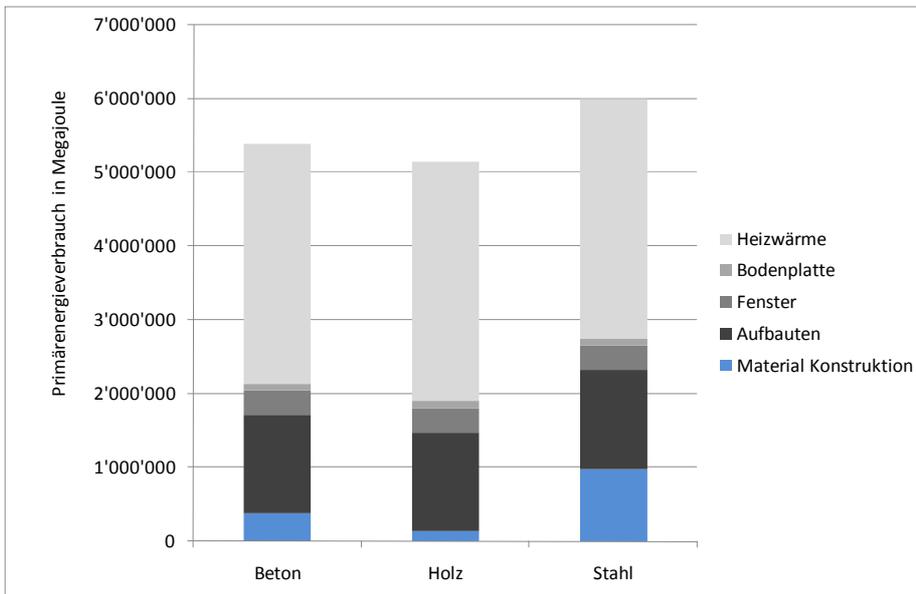


Abbildung 4: Aufteilung des Primärenergieverbrauchs der verschiedenen Varianten des Modellhauses mit einer Grundfläche von 100 m² während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren auf verschiedene Bauteile und die Heizenergie. Quelle: eigene Darstellung.

Mit zunehmender Grösse des Gebäudes steigt die Relevanz der Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien in der Tragwerkskonstruktion. Diese Zunahme der Relevanz ist einerseits darauf zurück zu führen, dass grössere und kompaktere Gebäude energieeffizienter sind – damit nimmt die relative Bedeutung des Betriebsenergieverbrauchs ab. Andererseits sinkt die relative Bedeutung der Materialien der Aussenhülle, die einen hohen spezifischen Primärenergieverbrauch haben bzw. relativ teuer sind. Die relative Bedeutung der Geschossdecken hingegen nimmt zu.

Dieser Zusammenhang zeigt sich sowohl beim Primärenergieverbrauch als auch bei den Lebenszykluskosten. Beim Primärenergieverbrauch ist er deutlicher, da die Betriebsenergie hier eine grössere Rolle spielt. Wir schliessen daraus, dass die Materialwahl und die Materialmenge im Tragwerk – insbesondere in den Geschossdecken - bei grösseren Gebäuden entscheidender ist als bei kleineren Gebäuden. Dies spricht dafür, dass Optimierungsanstrengungen hier anzusetzen sind.

Ein möglicher Ansatzpunkt ist Reduktion der Materialmenge in den Geschossdecken. Dies könnte beispielsweise durch Stützen oder tragende Zwischenwände erreicht werden – was aber die Nutzungsflexibilität des Gebäudes einschränken würde. Andererseits könnte man die verschiedenen Materialien stärker kombinieren und so leichtere Geschossdecken konstruieren.

d. Schlussfolgerungen

Beton zeichnet sich nach dem heutigen Kenntnisstand in Bezug auf seinen Beitrag zum nachhaltigen Bauen weder als besonders negativ, noch als besonders positiv aus. Beton ist in der Schweiz gut verfügbar, breit und flexibel einsetzbar und bietet Vorteile beim Schutz vor Gefahren und bei der Werterhaltung. Er wird als «naturfern» wahrgenommen, aber seine Produktion und Nutzung ist nicht mit gravierenden Schäden von Menschen und/oder der Tieren und Pflanzen verbunden. Die wesentlichen ökologischen Probleme ergeben

sich aus den Kohlendioxidemissionen bei der Zementproduktion und aus der Grösse der insgesamt umgesetzten Mengen (Transporte, Flächenversiegelung, Staub etc.).

Beton ist nicht besser und nicht schlechter als andere Baustoffe. Er hebt sich positiv ab gegenüber Stahl, schneidet aber tendenziell schlechter ab als Holz. Bei der Bewertung von Gebäuden zeigt sich die relativ geringe Bedeutung der Materialwahl im Tragwerk. Hier sind andere Faktoren massgeblich wie die Betriebsenergie, die Kosten von Instandhaltung/-setzung, die Nutzungspotenziale (des Gebäudes und des Standorts) oder das Raumkonzept.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie kann man jedoch keine Vorzüge des Baustoffs «Beton» im nachhaltigen Bauen herausstellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich heute kein schlüssiges Konzept für ein nachhaltiges Bauen mit Beton erkennen lässt. Vielmehr scheinen sich Entwicklungen in diese Richtung in widersprüchlichen Zielen zu verstricken. Betonbauten sollen einerseits leichter werden und andererseits Betonbauteile als Wärmespeicher nutzen. Sie sollen zum einen durch thermische Aktivierung von Bauteilen Betriebsenergie sparen und möglichst leicht sein. Zum anderen sollen diese Bauwerke aber flexibel nutz- und erweiterbar sein und den Ansprüchen der Nutzer über Generationen gerecht werden. Dies alles vor dem Hintergrund der Forderung nach einem nachhaltigen Baustoff Beton mit möglichst wenig Klinker und möglichst viel rezyklierter Gesteinskörnung.

Andererseits besteht immer noch das Images des Baustoffs als «unnatürlicher, kalter Stein» und als «Massenware» und damit Sinnbild einer zu schnell wachsenden Siedlung ohne besondere Qualitäten.

Wie kann diese Situation verbessert werden? Wir empfehlen der Zement- und Betonindustrie sich auf eine traditionelle Stärke des Baustoffs Beton zu beziehen und der Bedeutung dieser Stärke im nachhaltigen Bauen nachzugehen. Dies ist die Dauerhaftigkeit – oder konkreter: die lange technische Lebensdauer von Bauteilen aus Beton. Die Relevanz dieser langen technischen Lebensdauer im nachhaltigen Bauen ist längst nicht mehr unbestritten. Der Zement- und Betonindustrie muss es gelingen zu zeigen, wie man die lange technische Lebensdauer nutzen kann, um eine lange Nutzungsdauer zu realisieren (insbesondere in Bezug auf Nutzungsvariabilität und –flexibilität von Gebäuden). Dazu empfehlen wir, den folgenden drei Fragen vertieft nachzugehen

- Wie kann man durch geeignete Instrumente und Konzepte des Life-Cycle-Managements die Vorteile der Verwendung von Beton im nachhaltigen Design von Bauwerken unterstützen und die Auswirkungen möglicher Nachteile minimieren (einschliesslich wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Kriterien)?
- Welche Erkenntnisse liefern ein besseres Verständnis und Wissen über die Verwendung von Beton im heutigen Gebäudebestand für eine nachhaltige Bestandsentwicklung und was kann man daraus für den Neubau lernen?
- Wie kann man durch eine geeignete Kombination von Materialwahl (Tragwerk und Innenausbau), Raumkonzept und Konzepte zur Versorgung mit Tageslicht, Luft und Wärme, Gebäude erstellen, die die Ansprüche der heutigen und der zukünftigen Nutzer optimal befriedigen? Wo liegen die Vor- bzw. die Nachteile von Beton als Baustoff in derartigen Kombinationen?

Als zweiten Ansatzpunkt empfehlen wir der Zement- und Betonindustrie, den Baustoff Beton als einen möglichen Baustoff im nachhaltigen Bauen zu begreifen und der Frage nachzugehen, wo dieser Baustoff am besten eingesetzt werden sollte. Dazu sollte sie der Frage nachgehen,

- In welchen Bauteilen/Bauwerken zeichnet sich der Baustoff Beton durch vergleichsweise positive Ausprägungen in den ökologischen, sozialen und ökonomischen Merkmalen des nachhaltigen Bauens aus? Bei welchen Bauteilen/Bauwerken sind andere Baustoffe vorzuziehen?

Antworten auf diese Frage liefern Ansatzpunkte für eine bessere Positionierung von Beton im nachhaltigen Bauen ebenso wie Ideen für eine Kombination von Beton mit anderen Baustoffen. Auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchung kann man beispielsweise folgern, dass sich Beton für grössere Gebäude mit einer langen Nutzungsdauer eignet – insbesondere für Nutzungen mit einem erhöhten Sicherheitsbedürfnis

der Nutzer. Gleichzeitig bieten die Geschossdecken ein interessantes Feld für die Entwicklung neuer Bauteile, zur Reduktion des Gewichts, Erhöhung der Lebensdauer und Verminderung des Betriebsenergiebedarfs – beispielsweise durch Bauteilaktivierung.

2. Übersicht über das Gesamtprojekt

2.1. Ausgangslage

«Beton – Es kommt darauf an, was man daraus macht!» Mit diesem Werbslogan warb ein Deutscher Betonhersteller in den achtziger Jahren für ein positives Image dieses Bauprodukts. Diese Aussage gilt auch für den Beitrag von Beton zu einer nachhaltigen Entwicklung. Bauwerke, in denen Beton verwendet wird, können nachhaltiger sein als alternative Lösungen mit anderen Baustoffen – sie müssen aber nicht. Vorhandene Arbeiten in diesem Zusammenhang fokussieren auf einzelne Eigenschaften von Beton als Baustoff – beispielsweise seine Rezyklierbarkeitⁱ, die Umweltbelastungen im Lebensweg von Betonⁱⁱ oder die Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken, in denen Beton verwendet wirdⁱⁱⁱ. Sie erlauben aber kaum verallgemeinerbare Aussagen zur Bewertung der Verwendung von Beton in konkreten Bauprojekten. Teilweise werden sogar Handlungsanweisungen gegeben, die eine wenig differenzierte Beurteilung des Baustoffs Betons widerspiegeln, wie beispielsweise die Forderung einer Verwendung von Recyclingbeton als Voraussetzung für den Erhalt von ökologischen Gebäude-Labeln^{iv}. So wird das Augenmerk auf die negativen Eigenschaften dieses Baustoffs gelenkt, während seine positiven Eigenschaften wie Langlebigkeit, Speicherfähigkeit von Wärme/Kälte oder das relativ geringe Risiko im Brand- oder Erdbebenfall nicht explizit angesprochen werden.

Diese Situation erschwert eine proaktive Ausrichtung der Zement- und Betonindustrie auf eine nachhaltige Produktentwicklung. Eine solche Ausrichtung sollte sich primär darauf konzentrieren, die Stärken von Beton als nachhaltigen Baustoff zu fördern, und erst in einem zweiten Schritt dazu beitragen, dass die identifizierbaren Schwächen den Erfolg des Produktes möglichst wenig beeinträchtigen. Hier setzt das vorgeschlagene Projekt an.

Das Projekt steht vor der Herausforderung, die Brücke zu schlagen zwischen dem Bauprodukt einerseits (und seinen besonderen Eigenschaften) und seiner Verwendung zur Erstellung von Bauwerken andererseits, welche bestimmte Funktionen für die Nutzer erfüllen müssen. Gelingt dieser Brückenschlag, dann leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag für eine bessere Kommunikation zwischen Baustoffherstellern und Projektentwicklern im Hochbau und wird zu einer gezielten Entwicklung von nachhaltigen Bauprodukten beitragen.

2.2. Zielsetzung

Ziel des vorliegenden Projektes ist gemäss Ausschreibung «... einerseits die Ermittlung der Stärken und Schwächen von Beton als Bauprodukt und andererseits bei dessen Verwendung im Gebäude unter Berücksichtigung des gesamten Prozesses von der Herstellung bis zu Rückbau und Wiederverwertung.» Um dieses Ziel zu erreichen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- a. Welche Eigenschaften des Bauprodukts Beton bestimmen seinen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung^v?
- b. Wie werden diese Eigenschaften in den heute vorhandenen Publikationen und von Experten in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung beurteilt?
- c. Wie relevant sind diese Eigenschaften für die Verwendung von Beton im Hochbau?
- d. Wie wirken sich diese Eigenschaften von Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau aus?

ⁱ Moser et al. (2004), Baustoffmanagement 21. Stand des Wissens und Forschungsbedarf. EMPA Dübendorf.

ⁱⁱ Künniger et al. (2001), Ökologische Bewertung von Kies, Zement und Beton in der Schweiz. EMPA Dübendorf.

ⁱⁱⁱ Kytzia et al. (2008), CO₂ – Footprint. Böschungsstabilitätsverfahren: Tecco System (Netz) im Vergleich zu Spritzbeton. Bericht Hochschule Rapperswil im Auftrag der Firma Geobrugg AG.

^{iv} Z.B. im Rahmen des Gebäude-Labels «Minergie Eco».

^v Der Begriff der Nachhaltigen Entwicklung umfasst in dieser Projektskizze – sofern nicht explizit auf eine Beschränkung auf ausgewählte Kriterien verwiesen wird - immer alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

- e. Welche Schwerpunkte ergeben sich für die weitere Entwicklung von Beton und seinen Einsatzmöglichkeiten aus Sicht einer nachhaltigen Entwicklung?

Bei der Beantwortung der Fragen c. und d. wird berücksichtigt, welche anderen Baustoffe im Hochbau zum Einsatz kommen (alternativ zu - oder in Kombination mit - Beton), wie Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit relativ zu diesen anderen Baustoffen abschneidet und worauf Unterschiede in der Beurteilung zurückzuführen sind.

2.3. Aufgaben und Arbeitspakete

Das Projekt hat grundsätzlich einen explorativen Charakter. Es geht darum, die Stärken und Schwächen des Bauprodukts Beton möglichst umfassend zu erfassen und zu beschreiben. Hier werden zwei Ansätze gewählt: Einerseits wird das Bauprodukt Beton unter Berücksichtigung aller relevanten Anwendungen betrachtet (inkl. Infrastrukturbauten). Andererseits wird der Hochbau als eine mögliche Anwendung ausgewählt und ausgehend von konkreten Bauprojekten detailliert untersucht. Diese Analysen liefern eine Übersicht über die möglichen Stärken und Schwächen von Beton, erlauben aber noch keine Einschätzung ihrer Bedeutung für die Nachhaltigkeit von Hochbauten. Diese Lücke soll durch das Entwickeln und die Analyse von Modellgebäuden geschlossen werden. In dieser Analyse werden ausgewählte Kriterien des nachhaltigen Bauens gezielt untersucht und ermittelt, wie der Einsatz von Beton die Bewertung von der Nachhaltigkeit von Hochbauten beeinflusst. Für die Untersuchung werden drei Arbeitspakete bearbeitet, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

2.3.1. Arbeitspaket 1: Eigenschaften von Beton

In diesem Arbeitspaket werden die ersten drei Fragen des Projektes untersucht, die auf eine Analyse der Relevanz der Betoneigenschaften für die nachhaltige Entwicklung abzielen. Dazu werden Dokumente analysiert, die in den vergangenen Jahren von Instituten in der Schweiz und in anderen Ländern publiziert wurden. Ausserdem wird ein Expertenworkshop durchgeführt mit der Begleitgruppe und dem Projektteam.

Als Ergebnisse liefert dieses Arbeitspaket einerseits eine Übersicht über das vorhandene Wissen zum Thema «Nachhaltigkeit von Beton» und andererseits eine Reihe von Hypothesen über die Betoneigenschaften, die sich auf eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Hochbauten auswirken können.

2.3.2. Arbeitspaket 2: Nachhaltigkeit von Gebäuden aus Beton

In diesem Arbeitspaket wird die vierte Frage des Projektes untersucht, die sich mit den Auswirkungen der Eigenschaften von Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau beschäftigt.

Dabei wird ein Bewertungsverfahren ausgewählt: Die SIA Empfehlung 112/1 «Nachhaltiges Bauen - Hochbau». Dieser Kriterienkatalogs wird zur Bewertung von Fallbeispielen angewandt, um zu untersuchen, wie sich ein Gebäude aus Beton von Gebäuden unterscheidet, in denen die massgeblichen Funktionen der Betonbauteile durch Bauteile aus anderen Materialien erfüllt werden (vor allem Stahl und Holz). In diesem Arbeitspaket werden Dokumente zu den verschiedenen Fallbeispielen analysiert, eine Begehung durchgeführt und Interviews mit den Verantwortlichen geführt.

Als Ergebnis liegt eine vergleichende Bewertung von drei Gebäuden vor, die sich vor allem durch die in der Konstruktion verwendeten Baustoffe unterscheiden. Andererseits liefert es eine Reihe von Hypothesen über die Betoneigenschaften, die sich auf eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Hochbauten auswirken können.

2.3.3. Arbeitspaket 3: Entwicklung von Modellgebäuden

In diesem Arbeitspaket wird untersucht, wie sich die Bewertung ausgewählter Kriterien des nachhaltigen Bauens in Abhängigkeit von der Materialwahl in der Tragwerkkonstruktion verändert, wenn man ausserdem einzelne Gebäudeeigenschaften variiert wie beispielsweise die Grösse oder die Nutzungsdauer.

Grundlage dieser Untersuchung ist die Definition eines Modellgebäudes, das durch verschiedene Parameter definiert ist wie Grösse, Form, Nutzung, Nutzungsdauer oder klimatische Bedingungen des Standorts. Im zu entwickelnden Modell wird der Rohbau dieses Gebäudes abgebildet. Das Modell wird so gewählt, dass man eine beliebige Anzahl von plausiblen und realisierbaren Varianten des Gebäudes generieren kann, die sich durch die Wahl der Bauprodukte für die unterschiedlichen Bauteile unterscheiden. Dabei werden die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Elementen der Konstruktion möglichst weitgehend berücksichtigt (z.B. die Dicke der Geschossdecken in Abhängigkeit von der Grundfläche). Auf dieser Grundlage kann man nun durch Variantenvergleich gezielte Aussagen ableiten über die Veränderung der Nachhaltigkeit des Gebäudes in Abhängigkeit von der Wahl des Baustoffs.

Als Ergebnis liegt eine vergleichende Bewertung von relevanten Varianten zur Gestaltung eines Modellhauses vor, auf deren Grundlage man differenzierte und nachvollziehbare Aussagen ableiten kann über die Verwendung des Baustoffs Beton im Hochbau in Bezug auf ausgewählte Kriterien des nachhaltigen Bauens.

2.4. Produkte

Dieses Projekt liefert vor allem eine umfangreiche Materialsammlung zur Beurteilung des Baustoffs Beton für ein nachhaltiges Bauen und erste Erfahrungen mit dem Anwenden von unterschiedlichen Methoden zur Untersuchung dieser Fragestellung: Eine Dokumentenanalyse, eine Analyse von Fallbeispielen und die Modellierung eines Gebäudes im Rohbau.

Im Verlauf der Untersuchung gelingt es, eine Reihe von Erkenntnissen zu verdichten und weiter zu differenzieren. Auf dieser Grundlage werden einige Fragen identifiziert, die für weitere Untersuchungen in diesem Themenfeld interessant sind und zu einer Verbesserung der Eigenschaften von Bauwerken aus Beton beitragen können. Diese Fragen werden in den Schlussfolgerungen im letzten Kapitel dieses Berichts zusammengefasst.

3. Stand des Wissens – Ergebnisse aus Arbeitspaket 1

3.1. Einleitung: Beton im Kontext des nachhaltigen Bauens

3.1.1. Nachhaltiges Bauen geht nur mit «nachhaltigem Beton»

Der Baustoff Beton wird im nachhaltigen Bauen in der Zukunft eine massgebliche Rolle spielen. Diese Aussage mag provozieren, wenn man von einer Konzeption des nachhaltigen Bauens als «gesundes» und «ökologisches» Bauen ausgeht. Gleichzeitig ist jedoch Beton der meist verwendete Baustoff weltweit mit einer jährlichen Produktionsmenge von 5 Mrd. m³ (Glavind [2002]) und einem Materialverbrauch von 1.6 Milliarden Tonnen Zement, 10 Milliarden Tonnen von Kies und Sand sowie einer Milliarde Tonnen von Wasser (Calkins [2009]). In Bezug auf die Gesamtmasse der weltweit produzierten Güter ist Beton nach Wasser das zweitwichtigste Gut (Calkins [2009]). Angesichts dieser Zahlen ist es nicht überraschend, dass Beton auch massgeblich zu globalen und regionalen Umweltbelastungen beiträgt, insbesondere zum Klimawandel mit 8% des weltweit jährlich emittierten Kohlendioxids (Nixon [2002]) und zum Abfallaufkommen mit regional über 50% der Gesamtmenge (Nixon [2002]).

Angesichts des Bevölkerungswachstums, der steigenden Konsumbedürfnisse und der Verfügbarkeit von natürlichen Ressourcen gibt es kaum Alternativen zum Baustoff Beton. Dies wird bereits bei der Analyse einer Schweizer Region deutlich (Abbildung 5). Für mineralische Baustoffe – Kies, Sand und Beton – beobachtet man eine Verschiebung des Materiallagers aus der Natur in das Bauwerk. Für Holz (Biomasse) beobachtet man wachsende Materiallager sowohl im Wald wie auch im Bauwerk. Aber einer intensiveren Nutzung des nachwachsenden Rohstoffes «Holz» im Bau sind enge Grenzen gesetzt, denn das gesamte Wachstum des Bauwerks ist deutlich grösser als der Zuwachs von Holz im Wald. Da Holz ausserdem nur langsam wächst, kann eine zunehmende Holzproduktion den kurz- und mittelfristigen Bedarf an Baumaterialien nicht decken (Müller [1998]). Vor dem Hintergrund der aktuell geforderten Erneuerung des Bauwerksbestands der Schweiz mit energieeffizienten Gebäuden muss man mit einem anhaltend hohen Verbrauch von Beton rechnen. Redle (1999) spricht hier von einem Zielkonflikt zwischen der angestrebten Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen einerseits und der Schonung der natürlichen Kiesressourcen andererseits und fordert als Lösung ein Schliessen der Kreisläufe von mineralischen Baustoffen.

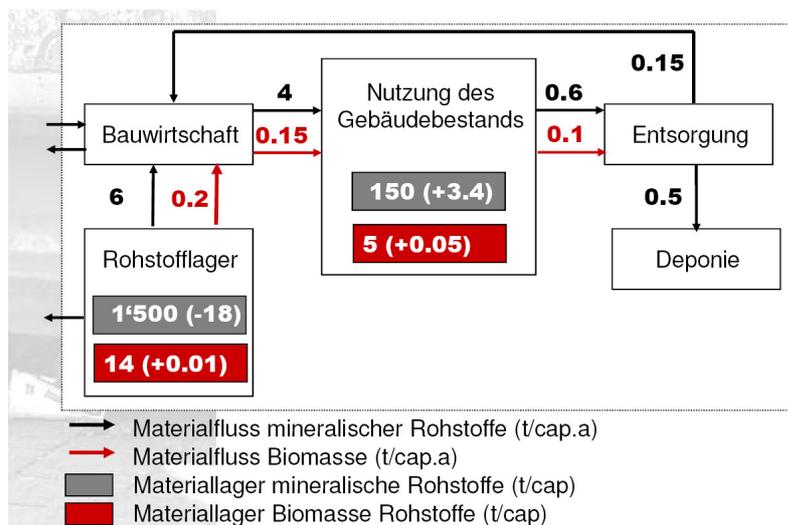


Abbildung 5: Materialflüsse von mineralischen Rohstoffen (Kies und Beton) und Biomasse (Holz) für die Aktivität «Wohnen und Arbeiten» einer Schweizer Region im Mittelland in Tonnen pro Einwohner und Jahr (bei Holz in Tonnen Trockensubstanz). Eigene Darstellung auf der Grundlage von Müller (1998) und Redle (1999).

Weltweit ist heute eine deutliche Übernutzung von Wäldern zu beobachten – nicht nur zur Nutzung von Holz als Baumaterial. Die Abholzung der Wälder trägt dabei direkt zur Klimaerwärmung bei mit geschätzten 20% der gesamten durch Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen (Calkins [2009]).

Vor diesem Hintergrund stellt sich nicht mehr die Frage «Holz oder Beton?», die man vielleicht aus der traditionellen Diskussion zum ökologischen Bauen her kennt. Wir müssen vielmehr davon ausgehen, dass man auch in der Zukunft in grossem Masse Beton einsetzen wird. Für zahlreiche Anwendungen ist dieser Baustoff technisch deutlich überlegen (z.B. im Wasserbau oder Tunnelbau). Für andere Anwendungen ist er kostengünstig oder entspricht einfach der gängigen Baupraxis bzw. den Anforderungen der Bauherren. Eine Analyse der Materialzusammensetzung von Gebäuden zeigt, dass Beton heute zwischen 30% und 80% der Masse von Bauwerken ausmacht (siehe Abbildung 6). Tendenziell ist der Betonanteil höher bei jüngeren Gebäuden (Baujahr ab 1970) und bei grösseren Gebäuden (Mehrfamilienhäuser und Bürogebäude). Es ist aber interessant, dass auch kleine Gebäude mit anderen Tragkonstruktionen (Mauerwerk oder Holz) einen Betonanteil zwischen 30-50% aufweisen – vor allem im Fundament der Gebäude (siehe dazu auch Kohler [2004]).

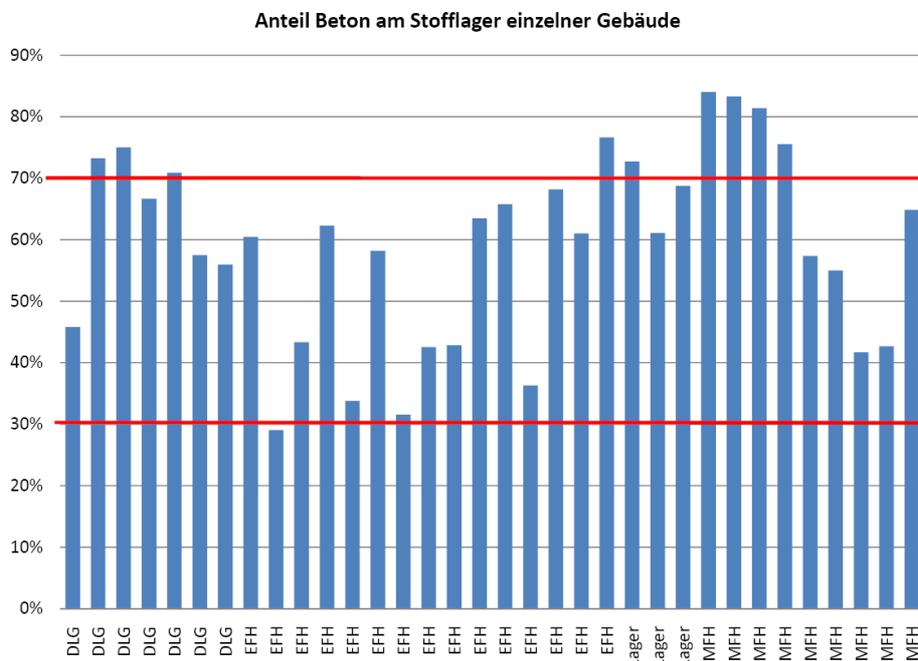


Abbildung 6: Anteile von Beton an der Gesamtmasse ausgewählter Häuser in Deutschland mit unterschiedlichen Nutzungen. Wobei: «DLG» = Dienstleistungsgebäude; «EFH» = Einfamilienhäuser; «Lager» = Lager; «MFH» = Mehrfamilienhäuser. Eigene Darstellung auf der Grundlage von Gruhler et al. (2002) und Matasci (2006).

Damit können die Ziele eines nachhaltigen Bauens mit Beton wie folgt eingegrenzt werden:

1. Wenn wir auch in Zukunft mit Beton bauen werden, dann sollte die Entwicklung darauf abzielen, Beton möglichst nachhaltig herzustellen, zu nutzen und zu entsorgen.
2. Im Kontext der gesamten Bauwerksentwicklung sollte Beton vor allem dort eingesetzt werden, wo seine spezifischen Vorteile – z.B. Flexibilität in der Anwendung, Dauerhaftigkeit und Sicherheit – das «Design» von nachhaltigen Bauwerken möglichst weitgehend unterstützen. Dies kann bei einer Anwendung im Fundament eines Holzgebäudes ebenso der Fall sein, wie eine Anwendung als Wärmepuffer in einem Betongebäude.

3.1.2. Ziel der vorliegenden Untersuchung

Ziel des vorliegenden Projektes ist gemäss Ausschreibung der cemsuisse «... einerseits die Ermittlung der Stärken und Schwächen von Beton als Bauprodukt und andererseits bei dessen Verwendung im Gebäude unter Berücksichtigung des gesamten Prozesses von der Herstellung bis zu Rückbau und Wiederverwertung.» Um dieses Ziel zu erreichen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- a. Welche Eigenschaften des Bauprodukts Beton bestimmen seinen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung?
- b. Wie werden diese Eigenschaften in den heute vorhandenen Publikationen und von Experten in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung beurteilt?
- c. Wie relevant sind diese Eigenschaften für die Verwendung von Beton im Hochbau?

3.1.3. Vorgehen

Um diese Fragen zu beantworten wird in zwei Schritten vorgegangen: In einem ersten Schritt werden Dokumente zu Fragen des nachhaltigen Bauens mit Beton analysiert. Die Ergebnisse der Dokumentenanalyse werden in einem kurzen Bericht zusammen gefasst und an eine Reihe von Experten verschickt. In einem gemeinsamen workshop mit diesen Experten werden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert, ergänzt und kritisch gewürdigt. Die Ergebnisse des Expertenworkshops fliessen dann in die Überarbeitung des Berichts ein.

a. Dokumentenanalyse

Eine erste Sichtung der Dokumente zum hier untersuchten Thema zeigt zwei grosse Gruppen: Eine Beurteilung aus Sicht des Baustoffs (vgl. dazu Galkins 2009, Althaus et al. 2008, Graubner et al. 2007, Kasser et al. 1999, Schwarz 1991) und eine Beurteilung aus der Sicht des Bauwerks (vgl. dazu Empfehlung SIA 112/1, US Green Building Council 2002, BREEAM 2009, DGNB 2009). Dabei ergibt sich das Problem, dass in Publikationen der ersten Gruppe unzureichend deutlich wird, wie relevant eine bestimmte Baustoffeigenschaft in Bezug auf die Bewertung von Bauwerken ist. Für den Vergleich zwischen unterschiedlichen Baustoffen werden kaum Aussagen darüber gemacht, in welchen Anwendungen bestimmte Baustoffe tatsächlich in Konkurrenz stehen. Im Gegensatz dazu, machen Publikationen aus der zweiten Gruppe kaum konkrete Aussagen zu Baustoffen. Hier werden Merkmale von nachhaltigen Gebäuden beschrieben. Die Frage, mit welchen Baustoffen diese Gebäudeeigenschaften erreicht werden können, bleibt jedoch offen. Für eine Reihe von Kriterien des nachhaltigen Bauens, kann man diesen Gebäudeeigenschaften eindeutig auch Baustoffeigenschaften zuordnen, beispielsweise für die «graue Energie». Für die meisten Gebäudeeigenschaften im nachhaltigen Bauen, ist jedoch keine eindeutige Zuordnung möglich. Dies betrifft vor allem die Eigenschaften im Zusammenhang mit der sozialen und wirtschaftlichen Dimension der Nachhaltigkeit. Diese Dimensionen sind zudem bei der Beurteilung aus der Sicht der Baustoffe von stark untergeordneter Bedeutung. Die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Baustoffen fokussiert in der aktuellen Literatur deutlich auf die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit.

Vor diesem Hintergrund wird folgendes Vorgehen gewählt: Bei der Analyse der vorliegenden Dokumente gehen wir von Studien zur Nachhaltigkeit von Baustoffen aus (erste Gruppe) und beschreiben die vorliegenden Erkenntnisse bzw. den Diskussionsstand zu den hier genannten Kriterien (siehe Einleitung zu 3.2). Dabei werden die Erkenntnisse aus Studien zur Nachhaltigkeit von Bauwerken (zweite Gruppe) ergänzt und dem Diskussionsstand zur Bewertung der Baustoffe gegenüber gestellt.

Die Suche und Auswahl der analysierten Dokumente stützt sich auf Internet- und Bibliotheksrecherchen sowie auf Experteninterviews. Wir erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, gehen aber davon aus, die wichtigsten Dokumente im deutschsprachigen Raum gesichtet zu haben.

b. Expertenworkshop

Folgende Fachexperten wurden zu einem vierstündigen workshop am 18.8.2009 an die Hochschule Rapperswil eingeladen:

Fachexperten (extern):

Christoph Bolliger, Energiekonzepte AG Zürich
Cathleen Hoffmann, EMPA Dübendorf
Niklaus Kohler, Professor i.R. Universität Karlsruhe
Urs Maurer, Bildungsstelle Baubiologie
Robert Pelizzari, Büro Dachtler Partner Zürich

Begleitgruppe:

Sonja Paulsen, Holcim Schweiz, Begleitgruppe cemsuisse
Alex Piel, Jura Zement, Begleitgruppe cemsuisse
Gerhard Rytz, Vigier Cement, Begleitgruppe cemsuisse
Heiner Widmer, cemsuisse, Begleitgruppe cemsuisse

Projektteam:

Susanne Kytzia, Nachhaltigkeit im Bauwesen, IBU-HSR
Aldo Rota, Materialtechnologie in Bauwesen, IBU-HSR
Felix Wenk, Erhaltung in Bauwesen, IBU-HSR

Vor dem workshop wurde eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Dokumentenanalyse versandt. Ausserdem erhielten die Experten den Auftrag, ausgewählte Erkenntnisse aus der Dokumentenanalyse zu bewerten. Dazu wurde vor dem workshop ein Fragebogen versandt und ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Befragung wurden dann mit den Experten diskutiert.

Abbildung 7 zeigt den Ablauf des workshops. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3.3 zusammen gefasst.

13.15	Begrüssung, Vorstellungsrunde
1. Block: Ausgangslage	
13.30	Präsentation der Ergebnisse der Literaturstudie
13.45	Erste Feedback-Runde
2. Block: Bewertung der Vor- und Nachteile des Baustoffs Beton	
14.00	Präsentation der Ergebnisse der «Hausaufgabe»
14.10	Diskussion
- <i>Pause</i> -	
3. Block: Ein Blick in die Zukunft	
15.15	Aktuelle Trends zur Verwendung von Beton im nachhaltigen Bauen
4. Block: Stossrichtungen für die weitere Entwicklung	
15.45	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse
16.15	Welchen Fragen / Ideen sollte man mit hoher Priorität weiter nachgehen?
16.45	Zweite Feedback.Runde

Abbildung 7: Übersicht über den Ablauf des Expertenworkshops vom 18.8.2009.

3.2. Ergebnisse: Eigenschaften von Beton in Hinblick auf die Nachhaltigkeit

In den vergangenen fünfzehn Jahren sind zahlreiche Studien entstanden zur Frage der Nachhaltigkeit von Baustoffen, Baukonstruktionen und Bauwerken. Ausgehend von der allgemeinen Definition der Nachhaltigkeit – zumeist in Anlehnung an die Definition des Brundtland Berichts von 1987^{vi} - werden in der Regel verschiedene Kriterien für das nachhaltige Bauen abgeleitet. Diese werden teilweise als Entwurfsregeln dargestellt, z.B. «Re-use existing built assets» (Nixon [2002]), teilweise aber auch als Bewertungskriterien, z.B. «Treibhauspotenzial» (DGNB [2009], S. 14). Sie können sich auf verschiedene Phasen im Lebenszyklus der Baustoffe, Baukonstruktionen und Bauwerke beziehen, z.B. die Recyclingfähigkeit als Kriterium für den Rückbau oder das Baustofflabel des «Forest Stewardship Council» als Kriterium für die Rohstoffherstellung. Und, sie berücksichtigen die unterschiedlichen Dimensionen der Nachhaltigkeit: Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.

Tendenziell wird für die Bewertung von Bauwerken mit möglichst umfassenden Konzepten zur Beschreibung der Nachhaltigkeit gearbeitet, bei denen aber häufig die Kriterien eher in Form von Entwurfsregeln formuliert werden (z.B. auch die SIA 112/1). «Umfassend» bedeutet hier das Berücksichtigen aller drei Dimensionen sowie möglichst des gesamten Lebenswegs des Bauwerks. Diese Konzepte werden bei der Entwicklung von Bauprojekten eingesetzt und führen teilweise zur Vergabe von Labeln für ein nachhaltiges Bauen. Sie sollen die Spielräume der Planenden bei der Entwicklung von nachhaltigen Gebäuden möglichst wenig einschränken. Daher werden nur in Einzelfällen konkrete Aussagen zu einzelnen Baustoffen gemacht (z.B. die Empfehlung der Verwendung von Materialien aus Recyclingbaustoffen oder von Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft).

Bei der Bewertung von Baustoffen hingegen konzentrieren sich viele Studien auf die ökologischen Kriterien der Nachhaltigkeit mit Schwerpunkt auf die Materialherstellung und -entsorgung. Dies ist darauf zurück zu führen, dass viele Baustoffe auf ganz unterschiedliche Weise verwendet werden können. Und gerade die Art der Verwendung bestimmt Lebenszykluskosten – vielfach das zentrale Kriterium der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit – ebenso wie die gesellschaftlichen Auswirkungen des Bauens. Diese Bewertungskonzepte werden in der Regel erst in der Ausführungsplanung eingesetzt, um die Wahl von geeigneten Baumaterialien zu unterstützen. Allerdings sind zu diesem Zeitpunkt der Projektentwicklung viele Entscheide bereits gefällt, die die Wahl der Baumaterialien bestimmen. Dies betrifft insbesondere die Materialien der Tragwerke wie beispielsweise Beton.

Konzepte zur Bewertung von Bauteilen und Baukonstruktionen sind hingegen bislang kaum vorhanden. Die vorliegenden Studien fokussieren ausserdem auf die ökologischen Kriterien der Nachhaltigkeit. Zu nennen ist hier beispielsweise eine Studie zum Vergleich zwischen Massiv- und Leichtbauweise (vgl. u.a. Knauff und Graubner [2008]) bzw. Studien zum Vergleich unterschiedlicher Fassadenkonstruktionen (vgl. u.a. SIA [2004]), oder verschiedener Deckenkonstruktionen (vgl. u.a. Hegger et al. [1997]). Derartige Studien beeinflussen die Formulierung von Entwurfsregeln für nachhaltiges Bauen, z.B. «Glas-Stahl-Fassade sind ökologisch bedenklich» oder «Kompakt bauen ist besser». Sie fliessen jedoch selten direkt in Planungsprozesse ein. Eine neuere Studie für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Dämmstoffen zeigt hier einen neuen Weg auf (Kasser [2009]). Sie verbindet die Bewertung von Baustoffen mit der Bewertung von Bauteilen und erlaubt es so, anwendungsspezifische Unterschiede zu berücksichtigen. Für die Beurteilung von Beton sind jedoch bislang keine vergleichbaren Studien durchgeführt worden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird versucht, möglichst alle dieser Ansätze zu berücksichtigen und möglichst systematisch in einen Kontext zu setzen. Dazu wird zunächst ein Konzept zur Beschreibung der Nachhaltigkeit von Baustoffen, Bauteilen, Baukonstruktionen und Bauwerken entwickelt, mit dem man möglichst alle relevanten Aspekte der Nachhaltigkeit von Bauwerken in Bezug auf die verwendeten Baustoffe darstellen kann. Dieses Konzept wird in Abbildung 8 dargestellt. Es basiert auf der Beschreibung

^{vi} Bericht der UNO Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED), Unsere gemeinsame Zukunft. 1987.

der Nachhaltigkeit von Baumaterialien, die Calkins (2009) vorstellt. Sie unterscheidet darin vier Kategorien der Bewertung.

Durch Wahl eines nachhaltigen Baumaterials sollen

1. **Die natürlichen und wirtschaftlichen Ressourcen geschont werden.** Dies geschieht durch eine effiziente Produktion des Baumaterials, eine möglichst lange Nutzungsdauer dieses Baumaterials im Bauwerk sowie das Gewährleisten der Wiederverwendung des Baumaterials nach Ende der Nutzung.
2. **Die Umwelt geschützt und Lebensräume für Menschen und Tiere erhalten werden.** Dies geschieht einerseits durch einen nachhaltigen Abbau der verwendeten Rohstoffe andererseits durch eine möglichst emissionsarme Produktion, Nutzung und Entsorgung. Unter der Annahme, dass die Energiebereitstellung in der Regel mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden ist, soll ausserdem der Energieverbrauch im Lebensweg des Bauwerks minimiert werden. Gleichzeitig werden die Auswirkungen der Baumaterialherstellung auf die wirtschaftliche Entwicklung berücksichtigt.
3. **Die Gesundheit der Menschen geschützt werden.** Dies beinhaltet eine möglichst geringe Emission von Schadstoffen, Strahlungen und Lärm während aller Phasen des Lebenswegs eines Baumaterials.
4. **Die Voraussetzungen für ein nachhaltiges Design des Bauwerks geschaffen werden.** Dies beinhaltet eine Vielzahl unterschiedlicher Merkmale des Bauwerks wie beispielsweise den Energieverbrauch im Betrieb, die Sicherheit bei Erdbeben oder Brand, die Möglichkeiten des Baumaterials zur Versickerung von Oberflächenwasser oder die Barrierefreiheit des Bauwerks.

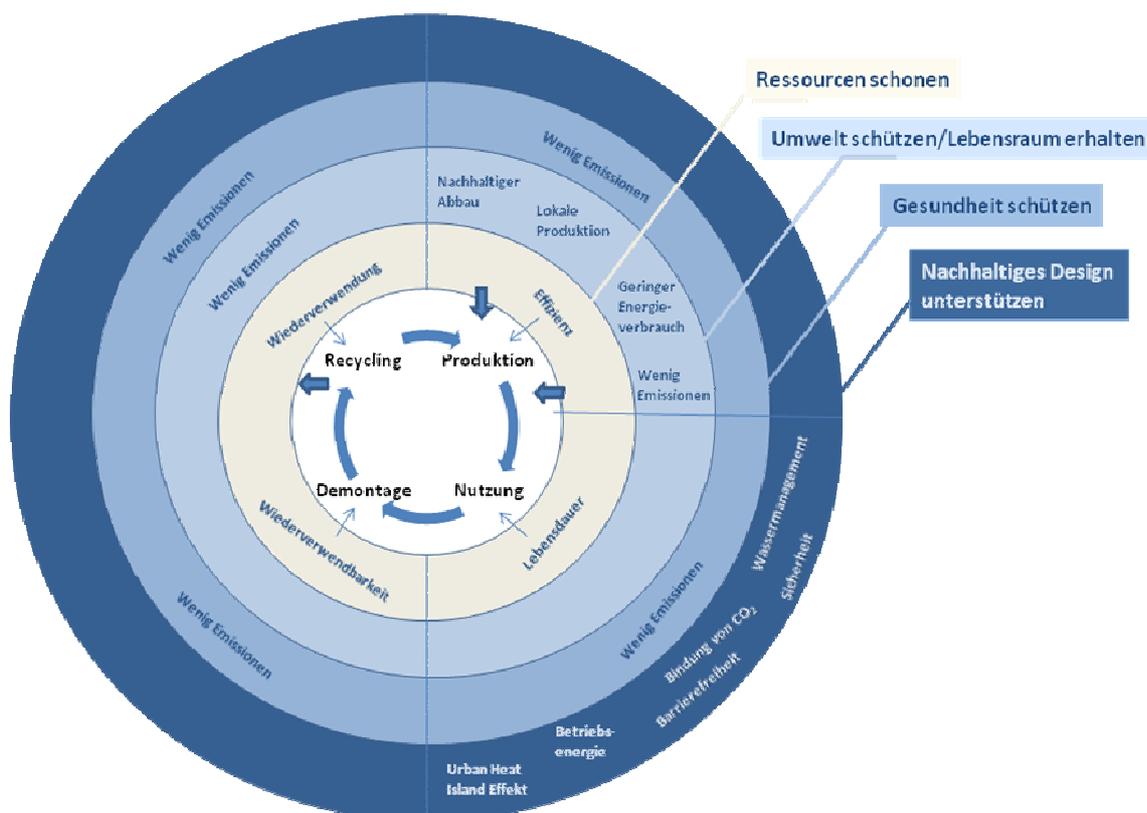


Abbildung 8: Konzept zur Beschreibung der Nachhaltigkeit von Baustoffen im Kontext der Bauwerksentwicklung, eigene Darstellung

Damit bezieht dieses Konzept gezielt alle Phasen des Lebenswegs von Baustoffen mit ein. Über die Kategorie «Nachhaltiges Design unterstützen» wird ein Bezug zum Gesamtbauwerk gewährleistet.

Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit - Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft – werden jedoch nicht direkt adressiert. In der nachfolgenden Tabelle werden die verschiedenen Kategorien und die möglichen Bewertungskriterien diesen drei Dimensionen zugeordnet.

Tabelle 2: Zuordnung der Oberkategorien gemäss Abbildung 8 zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit. Die in der Tabelle genannten Kriterien zur Bewertung sind als Beispiel für mögliche Bewertungskriterien zu verstehen.

	Umwelt	Gesellschaft	Wirtschaft
Ressourcen schonen	Ressourcenverbrauch		Kosteneffiziente Produktion
Umwelt schützen/ Lebensraum erhalten	Umweltzerstörung bei der Rohstoffgewinnung; Emissionen im Lebensweg		Lokale Wirtschaft fördern
Gesundheit schützen / Wohlbefinden fördern		Emissionen im Lebensweg, Raumklima / Behaglichkeit	
Nachhaltiges Design unterstützen	Wasserhaushalt am Standort; Bindung von Kohlendioxid; Betriebsenergie	Gestaltung, Nutzungsvariabilität und –flexibilität, Sicherheit	Lebenszykluskosten, Werterhaltung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird die Darstellung des Stands des Wissens nach den drei Dimensionen gegliedert. Innerhalb jeder Dimension wird weiter nach den Kategorien unterschieden. Welche Kriterien innerhalb dieser Kategorien genau verwendet werden, wird im jeweiligen Abschnitt beschrieben.

3.2.1. Umwelt

3.2.1.1. Ressourcen schonen: Ressourcenverbrauch

Beim Ressourcenschutz wird unterschieden zwischen dem Energieverbrauch einerseits und dem Materialverbrauch andererseits.

3.2.1.1.1. Energieverbrauch

Der Energieverbrauch bezieht sich im Allgemeinen auf den Verbrauch fossiler Energieträger, deren Vorräte weltweit begrenzt sind. Im Kontext von Baustoffen wird der Primärenergieverbrauch im Lebensweg der Baustoffe erfasst und zur Bewertung ihrer Umweltbelastungen heran gezogen – beispielsweise mit dem Verfahren des kumulierten Energieverbrauchs (KEA oder KEV) basierend auf der Richtlinie 4600 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). Dabei kann man unterscheiden zwischen dem Primärenergieverbrauch von nicht erneuerbaren und erneuerbaren Ressourcen. Konzeptionell ist der KEA vergleichbar mit dem in der Schweiz besser bekannten Konzept der «grauen Energie» z.B. aus dem Tabellenwerk «Graue Energie von Baustoffen» von Kasser und Pöll (1999).

Konzeptionell wird der KEA auch als so genannter Stellvertreterindikator betrachtet. Dies sind Indikatoren, deren Werte Aussagen über eine ganze Reihe von Umweltbelastungen ermöglichen. Im Falle der Energie sind dies Eingriffe in die Natur bei der Rohstoffgewinnung, dem Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen und eine Vielzahl von Emissionen aus der Verbrennung, die zu aktuellen Problemen wie dem Treibhauseffekt, dem «sauren Regen» und der gesundheitlichen Belastung der Menschen beitragen. Es wird

argumentiert, dass der KEA sich gut als Stellvertreterindikator eignet, da er sich in bisherigen Studien als richtungssicher erwiesen hat. Mit anderen Worten: Viele Produkte mit einem hohen Energieverbrauch im gesamten Lebensweg erwiesen sich in Bezug zu der Mehrzahl von Indikatoren für Umweltbelastungen als schlechter.

Beton schneidet im Vergleich zu anderen Baustoffen hinsichtlich der grauen Energie pro Kilogramm (spezifischer Energieverbrauch) sehr gut ab (vgl. Tabelle 3). Ein Kilogramm Beton braucht im Durchschnitt 3 Mal weniger Graue Energie als ein Kilogramm Mauerstein oder ein Kilogramm Massivholz und 15 Mal weniger Graue Energie als ein Kilogramm Stahlprofil.

Tabelle 3: Graue Energie verschiedener Baustoffe. Quelle: Althaus et al. 2008.

Baustoff <i>Auswahl aus der ökologischen Baustoffliste</i>	Graue Energie (Herstellung + Entsorgung) <i>In Megajoule pro Kilogramm</i>
Beton (Durchschnitt)	0.704
Mauersteine (Durchschnitt)	2.54
Armierungsstahl	13.5
Kupferblech, blank	51.9
Stahlprofil, blank	15.7
Hartfaserplatte	12.9
Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, gehobelt	2.56
Spanplatte, UF-gebunden, beschichtet, Trockenbereich	10.3
Glaswolle	44.7
Polystyrol expandiert (EPS)	105

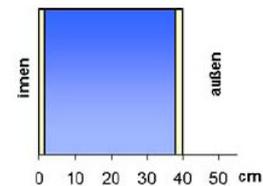
Dieser Vergleich ist aber insofern trügerisch, als dass:

- Beton in vielen Fällen als Stahlbeton eingesetzt wird. Damit steigt die spezifische Menge an Grauer Energie je nach Bewehrung nochmals deutlich an (z.B. bei Beton mit 60 kg Armierungsstahl pro Kubikmeter um circa +50%).
- Beton viel schwerer als andere Baustoffe ist, sodass Betonbauteile und –konstruktionen mehr Gewicht aufweisen. Zur Illustration wird in der nachfolgenden Abbildung 9 eine Aussenwand dargestellt, die für ein Einfamilienhaus konstruiert wurde. Die Konstruktion mit Porenbetonsteinen ist hier circa 15% schwerer als eine vergleichbare Konstruktion in Holzelementbauweise. Andere Publikationen beziehen derartige Vergleiche nicht direkt auf Beton, sondern allgemeiner als Vergleich zwischen Massiv- und Leichtbauweise. Tichelmann (2007) beschreibt beispielsweise, dass ein Gebäude in Leichtbauweise nur 35% des Gewichts eines vergleichbaren Gebäudes in Massivbauweise hat. Auch das Bewertungsinstrument SNARC (Systematik zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Architekturprojekten für den Bereich Umwelt) unterscheidet bei der Berechnung der Grauen Energie von Baustoffen zwischen «Leichtbauweise mit Holz», «gemischte Bauweise» und «Massivbauweise», wobei der «Massivbauweise» circa 50% mehr Graue Energie zugewiesen wird als der «Leichtbauweise mit Holz» (siehe SIA Dokumentation D0200). Allerdings muss man an dieser Stelle anfügen, dass die zur Betonherstellung benötigten Ressourcen in der Schweiz in grossen Mengen vorhanden sind, wohingegen die Verfügbarkeit von bspw. Holz auf nationaler Ebene sehr begrenzt ist. Vor diesem Hintergrund ist das Kriterium der Masse zur Beurteilung eines ressourcenschonenden Einsatzes differenziert zu betrachten.

Knauff und Graubner (2008) zeigen, dass beim Vergleich der grauen Energie von Wohngebäuden während ihrer gesamten Lebensdauer, vielfach kein Unterscheid zwischen Varianten der Konstruktionen festzustellen ist, die unterschiedliche Baustoffe einsetzen (z.B. Holz, Mauersteine oder Beton). Hier dominiert einerseits

die Betriebsenergie und andererseits fällt die Graue Energie von Aktivitäten in der Instandhaltung/-setzung ins Gewicht. Bei der Instandhaltung/-setzung wiederum spielen die tragenden Bauteile der Konstruktion nur eine untergeordnete Rolle. Hier dominieren Bauteile wie Fenster oder auch der gesamte Innenausbau (Teppiche etc.).

Material	Schichtdicke	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes	Wärmedurchgangswiderstand
v.i.n.a.	d	ρ	λ	R
	cm	kg/m ³	W/(mK)	
Wärmeübergangswiderstand innen R _{si}				0,13
Wandfarbe	0,02	1500		
Tapete	0,1	1200		
Kalkgipsputz	1,5	1400	0,7	0,02
Porenbetonstein	36,5	400	0,08	4,56
mineralischer Leichtputz	2	700	0,31	0,06
Außenfarbe	0,04	1500		
Wärmeübergangswiderstand außen R _{se}				0,04
Wanddicke [cm]	40		U=	0,21 W/m²K



Material	Schichtdicke	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes	Wärmedurchgangswiderstand
v.i.n.a.	d	ρ	λ	R
	cm	kg/m ³	W/(mK)	m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand innen R _{si}				0,13
Wandfarbe	0,02	1500		
Tapete	0,1	1200		
Gipskartonbauplatte	0,95	900	0,21	0,05
Lattung 40/60	4	450	0,13	
Installationsebene				siehe Nebenrechnung
Mineralfolledämmung	4	40	0,04	
Holzwerkstoffplatte	1,6	600	0,13	
PE-Folie	0,02	1290		
Holzständer 6/16 alle 62,5cm	16	450	0,13	
Mineralfolledämmung	16	40	0,04	siehe Nebenrechnung
Holzwoleleichtbauplatte	3,5	250	0,093	0,38
Kalkzementputz	1,5	2000	0,87	0,02
Außenfarbe	0,04	1500		
Wärmeübergangswiderstand außen R _{se}				0,04
Wanddicke [cm]	27,55		U=	0,21 W/m²K

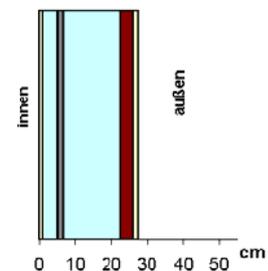


Abbildung 9: Vergleich der Materialzusammensetzung von alternativen Aussenwänden eines Einfamilienhauses aus Porenbetonsteinen (oben) oder in Holzelementbauweise (unten). Quelle: Knauff und Graubner (2008).

Woher kommt die graue Energie im Beton? Müller (2001) und Künniger et al. (2001) zeigen, dass die Herstellung des Zements hier massgeblich ist (mit circa 75% des KEA im Beispiel aus Müller (2001, S. 29)), gefolgt von den Kiestransporte (mit circa 17% im oben genannten Beispiel).

Die Zementindustrie verfolgt verschiedene Strategien, diesen Energieverbrauch zu senken. Sie stehen in engem Zusammenhang mit Strategien zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen und werden daher in Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben.

3.2.1.1.2. Materialverbrauch

Im Zusammenhang mit dem Materialverbrauch werden verschiedene Aspekte diskutiert: (i) der Materialumsatz, (ii) die Erneuerungsraten und (iii) das Schliessens von Materialkreisläufen.

(i) Materialumsatz

Seit einigen Jahren sind Materialbilanzen zum Bestandteil der Umweltberichterstattung auf nationaler Ebene geworden (BFS [2005]). Man geht dabei davon aus, dass die Gesamtmenge der umgesetzten Materialien als Stellvertreterindikator für die Umweltbelastungen eines Landes betrachtet werden kann. Je mehr Masse umgesetzt wird, desto stärker wird die Umwelt durch Rohstoffabbau, Transporte, Verarbeitung und Abfallbehandlung belastet. Gleichzeitig dient dieser Indikator dazu, die Materialeffizienz von Ländern zu bewerten – verstanden als Relation zwischen Bruttoinlandprodukt und Materialverbrauch.

Für die Schweiz zeigt sich – ebenso wie für viele andere Länder – dass Baumineralien mehr als 50% des nationalen Materialumsatzes ausmachen. Dies sind vor allem Kies und Sand, die u.a. in der Betonproduktion eingesetzt werden. Kytzia et al. (2008) folgern daraus, dass die Betonindustrie eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung der Materialeffizienz der Schweiz hat.

In dieser Betrachtung werden jedoch die «versteckten» Materialflüsse nicht berücksichtigt. Dies sind beispielsweise die Materialverbräuche, die bei der Herstellung von importierten Produkten im Ausland anfallen. Dies sind insbesondere bei Metallen erhebliche Mengen. So werden beispielsweise für die Produktion von einer Tonne Aluminium, die in die Schweiz importiert wird, im Ausland 6.41 Tonnen Material umgesetzt (vgl. BFS [2005], S. 50). Erste Abschätzungen dieser «versteckten» Materialflüsse zeigen, dass die Materialmenge, die zur Herstellung von in die Schweiz importieren Gütern im Ausland umgesetzt wird, mindestens gleich gross ist, wie der Materialumsatz der Schweiz. Verantwortlich dafür sind vor allem Nicht-Eisen-Metalle. Diese Überlegungen relativieren die Bedeutung des Materialumsatzes von mineralischen Baustoffen deutlich.

DMI in der Schweiz zwischen 1981 und 2001
Gliederung nach Materialkategorie

G 9

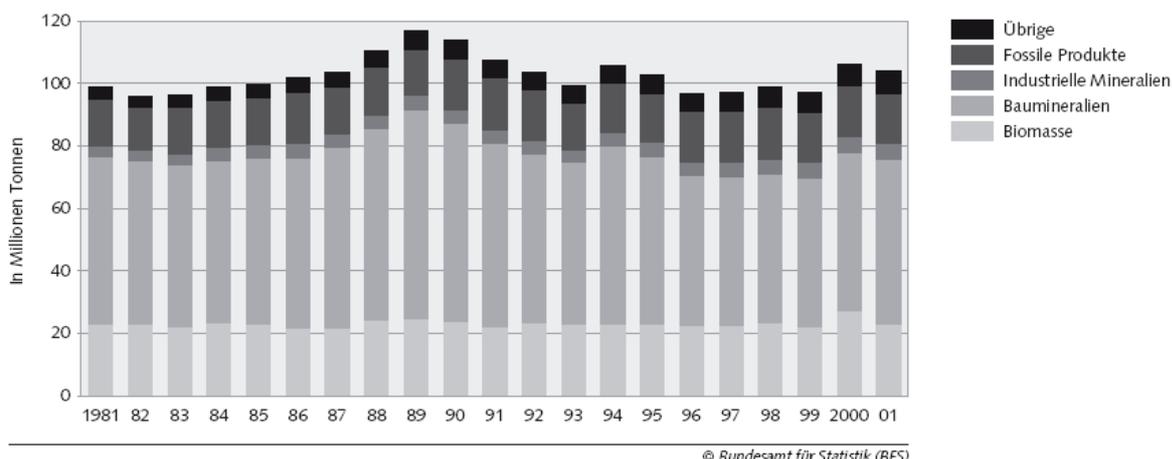


Abbildung 10: Entwicklung des «Direct Material Input» (DMI) in der Schweiz. Darunter versteht man die Summe aus der inländischen Ressourcenentnahme (in Tonnen) und dem importierten Material (in Tonnen). Quelle: BFS (2005), S. 26.

(ii) Erneuerungsraten

Die für die Produktion von Beton eingesetzten Rohstoffe erneuern sich nur sehr langsam. Aus diesem Grund gelten sie als «nicht erneuerbar». Diese Überlegung gilt auch für viele andere Baustoffe – vor allem auch für Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen und Metalle. Baustoffe auf der Basis von Biomasse erneuern sich teilweise wesentlich schneller. Im Falle von Holz umfasst die Erneuerungsdauer aber immerhin Jahrzehnte. Eine kurzfristige Erhöhung der Holznachfrage führt daher häufig zur Übernutzung der Wälder.

Ausserdem benötigt auch die Produktion von Biomasse Fläche und (fossile) Energie. Diese beiden Ressourcen sind ebenfalls begrenzt.

Die für die Produktion von Beton eingesetzten Rohstoffe reichen in vielen Regionen der Welt noch für mehrere Generationen – wie beispielsweise in der Schweiz. Für die Produktion von Stahlbeton spielt jedoch auch noch die Verfügbarkeit von Eisen eine Rolle. Die Vorkommen an Eisenerz, die man nach den heute geltenden betriebswirtschaftlichen Bedingungen auszubeuten bereit ist, sind weltweit begrenzt. Aber durch Recycling von Eisenschrott kann ein erheblicher Teil des Bedarfs an Armierungsstahl in der Schweiz gedeckt werden.

(iii) Schliessen von Materialkreisläufen

In der Schweiz wird ein sehr grosser Teil der mineralischen Bauabfälle rezykliert (novatlantis [2004]). Dennoch ist es bislang nicht gelungen, die Materialkreisläufe tatsächlich zu schliessen. Der wesentliche Grund dafür ist die Diskrepanz zwischen der im Bau eingesetzten Betonmenge und der durch Erneuerungsmassnahmen anfallenden Mengen an Betonabbruch. Kytzia et al. (2008) zeigen, dass die jährlich verbauten Betonmenge in der Schweiz dreimal so gross ist wie die anfallende Menge an Betonabbruch. Man geht zwar heute von steigenden Mengen an Betonabbruch in den kommenden Jahrzehnten aus (BUWAL [2001]), aber zum jetzigen Zeitpunkt müssen Primärressourcen eingesetzt werden, um die Baunachfrage zu decken. Das Gestalten des Übergangs zu einer Kreislaufwirtschaft ist eine der wesentlichen Herausforderungen der Branche (vgl. dazu Müller [2006]).

Ausserdem tritt beim Beton-Recycling das Problem auf, dass man (fast) zwangsläufig ein «downcycling» betreiben muss. Dies bedeutet, dass das Recycling-Produkt – in diesem Fall Betongranulat – nicht genauso viel wert ist, wie das ursprüngliche Produkt – Beton. Ursache dafür ist, dass der eingesetzte Zement nicht zurückgewonnen werden kann. Um aus Betongranulat neuen Beton zu machen, benötigt man wieder neuen Zement. Da aber die Zementherstellung die Umweltbelastungen im Lebensweg von Beton dominiert, verbessert der Einsatz von Betongranulat die Ökobilanz von Beton nur unwesentlich. Müller (2001) zeigt sogar, dass Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (der so genannte Recycling-Beton) zu mehr Umweltbelastungen führt als Beton mit natürlicher Gesteinskörnung. Dies ist auf einen erhöhten Einsatz von Zement bei der Produktion von Recycling-Beton zurück zu führen. Als eine Massnahme zur Verbesserung der Ökobilanz von Betonrecycling diskutieren beispielsweise Ionescu und Hodisan (2002) das Wiederverwenden von Betonbauteilen. Dies wird jedoch bislang in der Praxis kaum durchgeführt. Ein Grund dafür ist sicher die oben geschilderte Diskrepanz zwischen Betonbedarf und Betonabbruch. Solange zu wenige Betonbauteile abgebrochen werden, ist es einfacher, neue Bauteile zu produzieren als passende «gebrauchte» Bauteile zu beschaffen. Ausserdem liegt die Lebensdauer von Betonbauteilen und – konstruktionen bei mehreren Jahrzehnten. In diesen Zeiträumen verändert sich die Baupraxis und abgebrochene Betonbauteile werden nur schwerlich dem aktuellen «Stand der Technik» oder auch dem aktuellen «Geschmack» entsprechen.

Andere Baumaterialien hingegen – vor allem die Metalle - zeichnen sich nicht nur durch sehr hohe Recyclingraten aus. Hier gelingt es auch, durch das Recycling die Umweltbelastungen der Produktion deutlich zu senken. Bei Kupfer ist der Energieeinsatz für das Recycling zwischen 80 und 92 Prozent niedriger als bei der Metallgewinnung aus Erzen (Deutsches Kupferinstitut [2000]). Rezykliertes Aluminium benötigt rund 90 Prozent weniger Energie als die Herstellung von neuem Aluminium und die Eisenherstellung aus Schrotten benötigt nur etwa 60 % der Energie der Herstellung von Eisen aus Erzen

(Kopytziok, 2005). Holz und Kunststoffe hingegen werden in der Regel nicht stofflich rezykliert, sondern thermisch verwertet. Bei Mauersteinen hingegen ist nahezu kein Recycling möglich.

In vielen Publikationen wird ausserdem darauf hingewiesen, dass die Zement- und Betonproduktion dazu beiträgt, erhebliche Mengen an Abfallstoffen einer weiteren Verwertung zuzuführen (z.B. Müller [2001], oder Calkins [2009]). Dabei geht es zum einen um die thermische Verwertung von brennbaren Abfällen – wie Altreifen oder Kunststoffe – im Zementofen. Andererseits können aber auch Abfälle stofflich genutzt werden wie beispielsweise Hüttensand oder Flugasche. Auf diese Thematik wird in Abschnitt 3.2.1.2 im Kontext der Reduktion von Kohlendioxidemissionen bei der Zementherstellung ausführlich eingegangen. Mit dieser Art der Verwertung werden zwar keine Materialkreisläufe im engeren Sinne geschlossen, sie trägt aber zur Erhöhung der Material- und Energieeffizienz von Industrieländern bei. Dieses Phänomen kann man nur bei der Zement- und Betonherstellung beobachten. Keine andere Baustoffproduktion kann in vergleichbarem Ausmass Abfallstoffe aus anderen Bereichen einsetzen, ohne dass dadurch die Qualität der Baustoffe wesentlich vermindert wird und/oder erhebliche Belastungen für die natürliche Umwelt entstehen.

3.2.1.2. Umwelt schützen / Lebensraum erhalten

Eine vergleichende ökologische Bewertung von Baustoffen nach der Methode der Ökobilanzierung ergibt ein ähnliches Bild, wie der in Abschnitt 3.2.1.1.1 gezeigte Vergleich der Grauen Energie. Die Herstellung von Beton führt zu vergleichsweise geringen Umweltbelastungen (ca. 85 Umweltbelastungspunkte pro kg Beton, berechnet nach Methode *UBP 06*), aber es wird viel Beton beispielsweise in Gebäuden eingesetzt (rund 45% der gesamten Gebäudemasse bei Einfamilienhäusern besteht aus Beton, vgl. Abbildung 11).

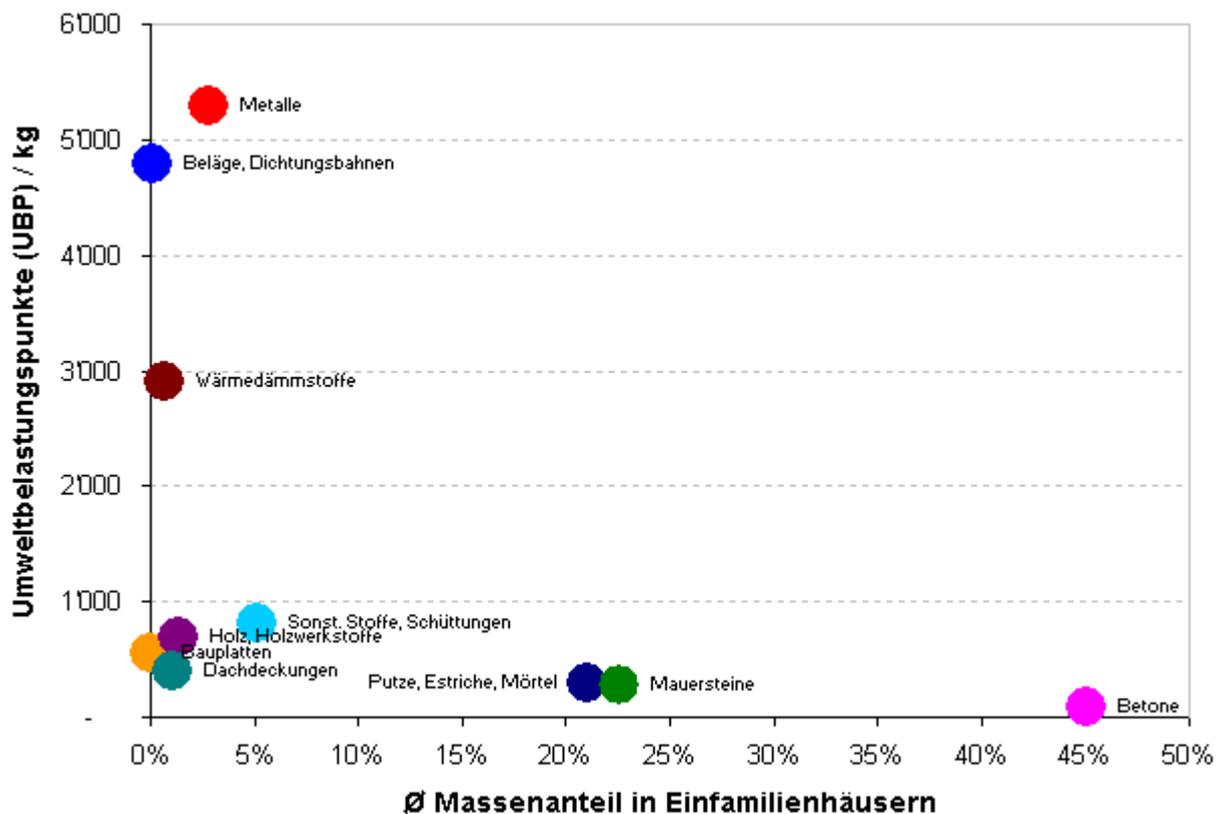


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Umweltbelastungspunkte UBP (pro kg) und den durchschnittlichen Massenanteilen der in Einfamilienhäusern eingesetzten Baumaterialien. Eigene Darstellung auf Grundlage von Althaus, Lehmann, Kellenberger (2008) und Gruhler, Böhm, Deilmann, Schiller (2002).

Auch hier kommen bei der Ökobilanzierung ganzer Gebäude während ihrer Lebensdauer der Betriebsenergieverbrauch und die Erneuerungstätigkeit als massgebliche weitere Einflussfaktoren hinzu. Die Erneuerungstätigkeit ist tendenziell noch wichtiger in der ökologischen Bewertung als bei der Bewertung der

Grauen Energie, da hier Materialien eingesetzt werden, deren Herstellung, Nutzung und Entsorgung die Umwelt stärker belasten, beispielsweise Holzschutzmittel, Glas oder Kunststoffe (vgl. Matasci [2006]).

Wie auch bei der Bewertung mit der Grauen Energie dominiert die Zementherstellung die Umweltbelastungen im Lebensweg von Beton. Verantwortlich dafür ist neben der Verbrennung fossiler Energieträger im Zementofen vor allem der Ausstoss von Kohlendioxid beim Brennen («Kalzinieren») von gemahlenem Kalkstein zu Klinker. Diese Emissionen werden auch als «geogene CO₂-Emissionen» bezeichnet – in Abgrenzung zu den «fossilen CO₂-Emissionen» aus der Verbrennung von Schweröl oder Kohle. Die energiebedingten CO₂-Emissionen pro Kilogramm Zement machen ca. ein Drittel der gesamten CO₂-Emissionen aus (ohne Einsatz von Sekundärbrennstoffen). Die restlichen zwei Drittel sind rohstoffbedingt (VDZ [2005], S.16).

Die Zement- und Betonindustrie versucht diese Emissionen von Kohlendioxid durch den Einsatz von sogenannten Sekundärbrenn- und rohstoffen in der Produktionskette von Beton zu senken (siehe Abbildung 12). Vereinfachend betrachtet besteht die Produktionskette der Zement- und Betonproduktion aus drei Schritten: Der Klinkerproduktion, der Zementproduktion und der Betonproduktion. Im ersten Schritt wird in einem Hochtemperaturprozess Rohmehl zu Klinker verarbeitet. Im Rohmehl können die Primärressourcen, Kalk und Mergel, durch Sekundärrohstoffe wie kontaminiertes Erdreich oder Trockenklärschlamm ersetzt werden. Zur Feuerung des Ofens können neben den Primärressourcen, Kohle und Schweröl, auch Sekundärbrennstoffe wie Tiermehl, Trockenklärschlamm, Altreifen, Altöl oder Lösungsmittel und Kunststoffabfälle eingesetzt werden. Im zweiten Produktionsschritt – der Zementherstellung – wird der Klinker mit Zuschlagstoffen gemischt. Dies ist beispielsweise Kalkstein; aber auch hier können Sekundärrohstoffe eingesetzt werden, die teilweise als Rückstände anderer Hochtemperaturprozesse ähnlich zementöse Eigenschaften haben wie der Klinker – beispielsweise Hüttensand aus Hochöfen oder Flugasche aus Kohlekraftwerken. Im dritten Produktionsschritt, der Betonproduktion werden Zement, Kies, Sand und Wasser sowie in speziellen Fällen auch Zusatzstoffe wie z.B. Flugasche eingesetzt. Hier können Kiessande aus dem Abbau natürlicher Kieslager durch Gesteinskörnungen aus Betonabbruch ersetzt werden.

Für die Reduktion der CO₂-Emissionen bietet der zweite Produktionsschritt die grössten Möglichkeiten. Dies ist darauf zurück zu führen, dass der massgebliche Teil der CO₂-Emissionen bei der Klinkerproduktion entsteht. Gelingt die Reduktion des Anteils von Klinker pro Tonne Zement, dann werden sowohl die geogenen als auch die fossilen CO₂-Emissionen gesenkt. Klinker kann durch so genannte Zusatzstoffe ersetzt werden wie Kalkstein oder auch Hüttensand oder Flugasche. Dadurch entstehen neue Zementarten, deren Einsatz die Qualität des Betons beeinflusst. In der Schweiz am weitesten verbreitet ist Portlandkalksteinzement mit einem Klinkeranteil von rund 80%. Zusatzstoffe wie Hüttensand und Flugasche, die klinkerähnliche Eigenschaften aufweisen, ermöglichen eine noch weitergehende Substitution des Klinkers. Die dadurch entstehenden Zementarten werden aber bislang vor allem für Spezialanwendungen eingesetzt. Diese Strategie des Klinkerersatzes wird in internationalen Publikationen zur Nachhaltigkeit von Zement sehr breit diskutiert (z.B. in Müller [2001], Hauser et al. [2007], Calkins [2009], Naik [2002]). Die Schweizer Zement- und Betonindustrie jedoch hat in dieser Entwicklung eine denkbar schlechte Ausgangslage, da in der Schweiz weder Stahlwerke noch Kohlekraftwerke vorhanden sind. Hüttensande und Flugaschen müssen über weite Distanzen importiert werden. Daher wurde in der Schweiz insbesondere der Portlandkalksteinzement gefördert. Gleichzeitig verfügen andere Länder über Quellen von Zusatzstoffen mit klinkerähnlichen Eigenschaften. In Italien sind dies beispielsweise natürliche Puzzolane aus Vulkantätigkeit; in Deutschland, Frankreich und Österreich sind es die lokal anfallenden Rückstände aus Stahlhütten oder Kohlekraftwerken. Importierte Zusatzstoffe haben im Weiteren umweltverträgliche Qualitätskriterien einzuhalten, die auch für den in der Schweiz produzierten Klinker gelten (BAFU [2006]). Brameshuber und Vollpracht (2007) beurteilen den Einsatz von Zusatzstoffen wie Hüttensand, Hochofenschlacke und Steinkohleflugasche als umweltverträglich weisen aber darauf hin, dass noch nicht alle relevanten Schwermetalle untersucht wurden.

Der zweitwichtigste Schritt zur Reduktion der CO₂-Emissionen ist der Einsatz von Sekundärbrennstoffen im Zementofen. Interessant sind vor allem hochkalorische Abfälle wie Altöl oder Lösungsmittel. Aber deren Verfügbarkeit ist begrenzt. In den neunziger Jahren wurden in der Schweiz die abfallpolitischen Rahmenbedingungen für die Verbrennung von Abfällen in Zementwerken gesetzt (BAFU [1997] und [1998]). Kritisch diskutiert wurden hier vor allem die Fragen nach einer unerwünschten Konkurrenzierung der Kehrrichtverbrennungsanlagen durch die Zementwerke und nach dem Eintrag von Schwermetallen in den Zement und damit in das Bauwerk Schweiz. Eine Reihe von Studien haben inzwischen gezeigt, dass Schwermetalle durch Abfallverbrennung in Zementwerken in den Klinker eingetragen werden (Achternbosch et al. [2003], Seyler [2003] und Seyler et al. [2005]). Aber das Risiko, dass diese Stoffe während der Nutzung von Beton im Bauwerk ausgetragen werden, wird als sehr klein erachtet, denn diese Stoffe werden sehr gut in die Zementmatrix eingebunden (Kytzia et al. [2008]). Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit von brennbaren Abfällen, die nach der BAFU-Richtlinie in Zementwerken eingesetzt werden können, gering. Im Jahr 2008 konnten im Durchschnitt aller Zementwerke nur rund 46% des Brennstoffbedarfs durch diese so genannten Sekundärbrennstoffe gedeckt werden (Kytzia und Seyler [2009]).

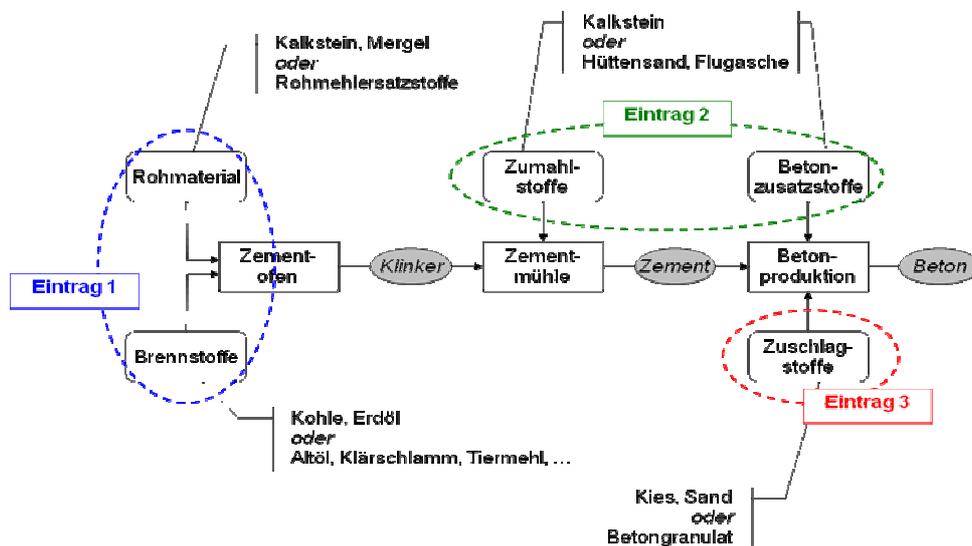


Abbildung 12: Handlungsmöglichkeiten der Zement und Betonindustrie zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen. Quelle: Kytzia und Seyler 2009.

Weitere Emissionen, die während der Lebensdauer entstehen, werden dem Einsatz von Zusatzmitteln zugeschrieben wie Beschleuniger oder Verflüssiger. Diese Zusatzmittel sind teilweise organische Verbindungen, bei deren Produktion und/oder Einsatz Emissionen entstehen können. Künniger et al. (2001) zeigen, dass der Einsatz von Verflüssigern zu maximal 7% der Umweltbelastungen im Lebensweg von Beton beitragen kann – vor allem bei den Wirkungskategorien Versauerung, Ozonbildung und Human- bzw. Ökotoxizität Wasser. Brameshuber und Vollpracht (2007) beurteilen den Einsatz von Betonzusatzmitteln als weitgehend unkritisch mit Ausnahme von alkalihaltigen Beschleunigern, deren Einsatz zu einer Beeinträchtigung von Boden- und Grundwasser führen kann. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass zum heutigen Zeitpunkt keine abschliessende Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Zusatzmitteln gemacht werden kann. Der Fachverband Schweizer Hersteller von Betonzusatzmitteln vergibt ein Gütesiegel für Rezepturen von Betonzusatzmitteln, deren vorschriftsgemässe Anwendung keine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt (FSHBZ [o.D.]).

Darüber hinaus entstehen Transportemissionen und lokal wirksame Belastungen wie Lärm und Staub.

Besondere Aufmerksamkeit bei der ökologischen Bewertung von Beton erfährt die Rohstoffgewinnung. Steinbrüche und Kiesgruben beeinträchtigen das Landschaftsbild und die Erneuerung der Grundwasserreserven. Sie beanspruchen ausserdem die knappe Ressource «Land». Diese Belastungen

erstrecken sich über die Lebensdauer dieser Anlagen (30-50 Jahre); anschliessend werden sie in ihren natürlichen Zustand zurück gesetzt, wobei Ziele des Natur- und Landschaftsschutzes häufig handlungsleitend sind. Da man zum Auffüllen der Kiesgruben vielfach Aushubmaterial einsetzt, werden Eingriffe in Landschaft- und Natur durch Ablagerung des Aushubmaterials an anderen Orten vermieden.

Im Vergleich zum Beton beeinträchtigt die Rohstoffgewinnung anderer Baustoffe die Umwelt in viel grösserem Masse – allen voran die Metalle. Als besonders kritisch werden der Abbau von Bauxit für die Aluminiumherstellung und der Abbau von Kupfererzen betrachtet (Calkins [2009]). Hier entstehen erhebliche Mengen an problematischen Abfällen und die lokalen Gewässer werden verschmutzt. Bei der Förderung einer Tonne Kupfer beispielsweise entstehen 400 Tonnen Abfälle und Nebenprodukte. Auch die Weiterverarbeitung der Erze führt zu erheblichen Umweltbelastungen. Calkins (2009) führt aus, dass 4% aller toxischen Abfälle in den USA aus der Eisen- und Stahlproduktion stammen. Die Produktion von einer Tonne Aluminium führt zu zwischen 0.3 und 2.5 Tonnen Abfällen, die deponiert werden müssen.

Im Lebensweg von Holzprodukten hingegen wird in der ökologischen Bewertung vor allem die nicht nachhaltige Forstwirtschaft und der Einsatz von Bindemitteln, Holzschutzmitteln und Farben genannt, die ökologisch bedenklich sein können (Calkins [2009]).

3.2.1.3. Nachhaltiges Design unterstützen

Bei der Bewertung von Bauwerken und -teilen aus Beton kommen verschiedene Studien zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.

Bei der Bewertung unterschiedlicher Baumaterialien für Eisenbahnschwellen beispielsweise schneidet Beton am besten ab (im Vergleich zu Holz und Stahl). Massgebend ist dabei die lange Lebensdauer der Betonschwellen (vgl. Abbildung 13). Zu einer ähnlichen Beurteilung kommen die gleichen Autoren für Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armierten Beton und korrosionsgeschütztem (Künniger und Richter, 1995). Auch am Beispiel von Pfeilern aus Stahlbeton können sie zeigen, dass die Lebensdauer einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der ökologischen Bewertung hat (Haag et al. [1997]). Hier rechtfertigt der Gewinn durch Vermeiden und Reduzieren von Massnahmen der Instandsetzung den Mehraufwand bei der Herstellung (z.B. den Einsatz von Betonverflüssigern).

Ein anderes Bild ergibt sich am Beispiel eines Vergleichs von alternativen Systemen der Böschungsstabilisierung. Beim Vergleich zwischen einem Stahlnetz und Spritzbeton schneidet das Stahlnetz deutlich besser ab. Entscheidend ist hier das Gewicht der beiden alternativen Bauwerke. Das Stahlnetz ist viel materialeffizienter. In dem für diesen Vergleich projektierten Bauwerk aus Spritzbeton wird insgesamt mehr Stahl für die Armierung eingesetzt als im gesamten Stahlnetz. Bei gleicher Lebensdauer fällt das Ergebnis daher klar zuungunsten des Betons aus (vgl. Abbildung 14).

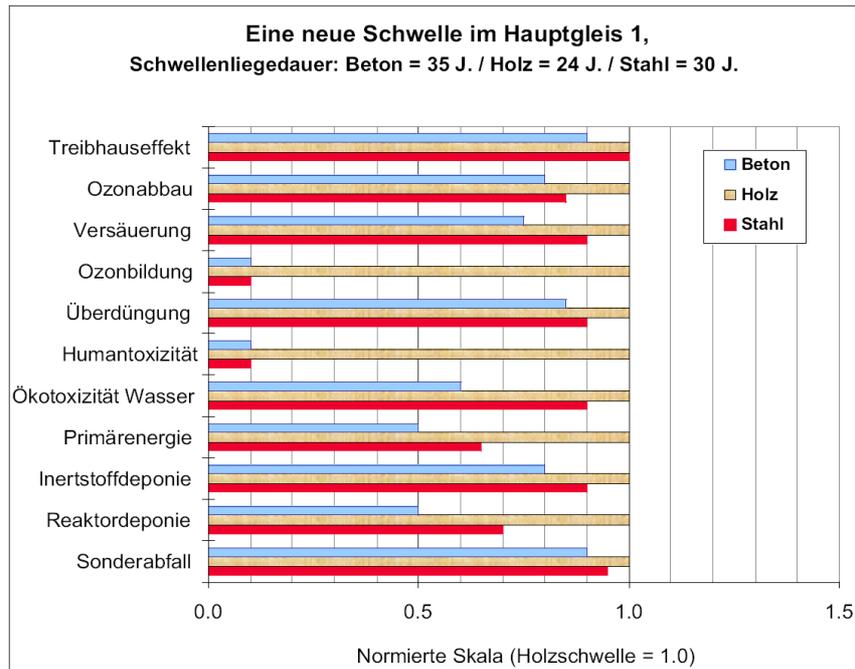


Abbildung 13: Ökologische Bewertung von Eisenbahnschwellen in der Schweiz. Streckenschwellen aus vorgespanntem Beton, Profilstahl und teerölprägniertem Buchenholz. Quelle: Künniger und Richter (1998).

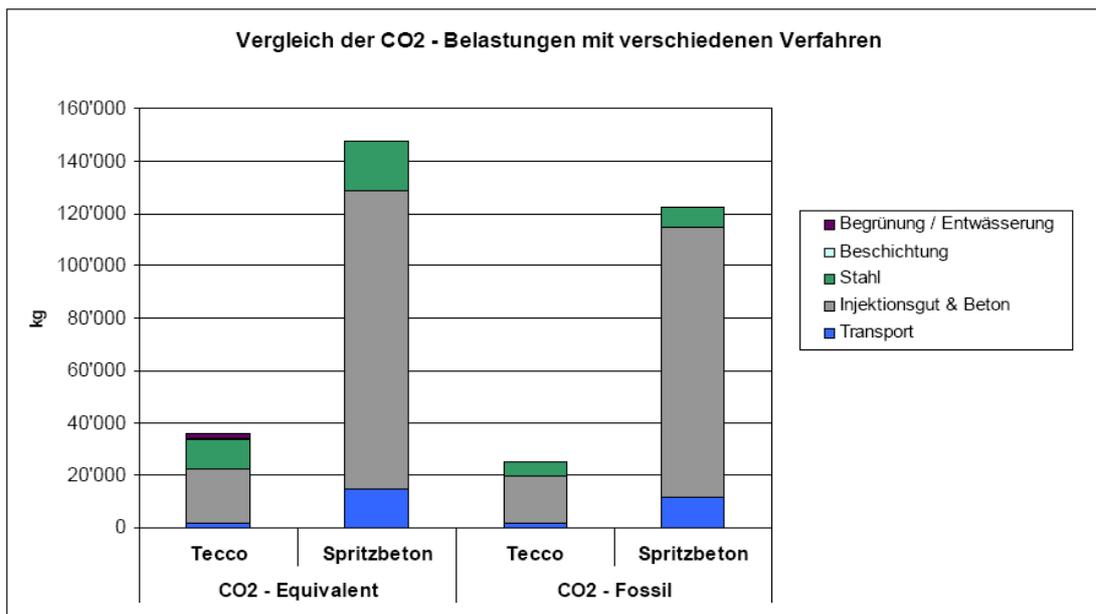


Abbildung 14: Vergleich der Treibhausgasemissionen zweier alternativer Systeme der Böschungsstabilisierung. Der Begriff «Tecco» steht für ein Produkt der Firma Geobrugg AG, dass ein Stahlnetz verwendet. Quelle: Kytzia et al. (2008).

Damit zeigen sich zwei massgebliche Einflussfaktoren, die das nachhaltige Design von Bauwerken mit Beton bestimmen:

- (i) Gelingt es durch Einsatz von Beton die Lebensdauer der Bauwerks/-teils zu verlängern, dann unterstützt Beton ein ökologisches Design.
- (ii) Wird ein Bauwerk durch den Einsatz von Beton unverhältnismässig schwerer, dann verhindert Beton ein ökologisches Design.

Hegger et al. (2007) führen aus, dass ein Zielkonflikt zwischen der Erhöhung der Lebensdauer und der Verminderung des Betongewichts bestehen kann. Wie in Abschnitt 3.2.3.4 ausführlich erläutert, ist bei der Betrachtung der Lebensdauer nicht nur die technische Lebensdauer, sondern vor allem die funktionale Lebensdauer massgeblich (das so genannte «service life» gemäss ISO 15686-5). Diese funktionale Lebensdauer wird u.a. beeinflusst von der Nutzungsflexibilität von Bauwerken (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Nach Hegger et al. (2007) besteht nun die Tendenz, dass man zugunsten einer erhöhten Nutzungsflexibilität mehr Beton einsetzt – durch grosszügigere Bemessung oder andere Konstruktionen. Damit entsteht ein Zielkonflikt zwischen Nutzungsflexibilität und Materialeffizienz, der aufgelöst werden kann, wenn man die Lebensdauer bei der Berechnung der Materialeffizienz eines Bauwerks ins Kalkül mit einbezieht.

Sie zeigen ausserdem, dass man den Betonverbrauch von Bauteilen reduzieren kann (bis zu 40%). Dies ist jedoch nur möglich, wenn man gleichzeitig die Menge an Armierungseisen erhöht. Man sollte daher bei der Beurteilung derartiger Massnahmen von einer Gesamtbilanz von Gebäuden ausgehen, die die Gesamtheit aller Baustoffe betrachtet und die Nutzungsdauer in die Analyse mit einbezieht.

Eine weitere Massnahme zur Senkung des Betonverbrauchs ist der Einsatz von Leichtbeton (Jaubertie R. et al. [2002], Koide et al. [2002] und Karade et al. [2002]). Hier gelingt aber der Nachweis seiner ökologischen Vorteile nicht, denn – ähnlich wie bei der rezyklierten Gesteinskörnung – geht man davon aus, dass Leichtbeton mehr Zement benötigt als normaler Beton. Dies reduziert seine Vorteile im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit deutlich.

Ein zentraler Aspekt bei der Frage nach dem nachhaltigen Design ist der Betriebsenergieverbrauch für Heizen und Kühlen während der Betriebsphase. Wie in Abschnitt 3.2.2.1.2 ausgeführt ist, hat Beton besondere bauphysikalische Eigenschaften, die seinen Einsatz als Wärmespeicher begünstigen. Ergänzend dazu wird vorgeschlagen, Betonbauteile thermisch zu aktivieren, indem man beispielsweise Kunststoffleitungen zwischen die Bewehrung von beispielsweise Decken einbaut, die zum Heizen oder Kühlen verwendet werden. In der Schweiz ist dieses Prinzip in zahlreichen Bürogebäuden realisiert worden – u.a. in den eigengenutzten Bürogebäuden der Swiss Re oder dem Betriebsgebäude von Amstein & Walthert in Zürich Oerlikon. Ungeklärt ist aber noch die Frage nach möglichen Problemen bei der Instandsetzung und beim Rückbau. Im Energieeffizienzpfad der SIA wird in diesem Zusammenhang gefordert, zwischen Tragwerk (Primärstruktur) und nicht tragender Gebäudestruktur wie trennenden Einbauten und Technik (Sekundärstruktur) zu trennen (vgl. SIA [2006]). Hier besteht ein potenzieller Konflikt mit dem Konzept der thermischen Aktivierung von Betonbauteilen.

Calkins (2009) nennt als weiteren Aspekt des nachhaltigen Designs die Wasserdurchlässigkeit von Bauteilen. Hier geht es um die Abfluss- und Versickerungsmöglichkeiten von Oberflächenwasser auf einem Grundstück. Ein weiterer Aspekt in diesem Kontext ist der so genannte «heat island effect», d.h. das Aufheizen von Gebieten innerhalb des Stadtraums durch die Sonneneinstrahlungen und ungenügende Verdunstungsmöglichkeiten. In Bezug auf diese beiden Aspekte schneidet Beton besser ab als Asphalt (vgl. dazu Ting et al. [2001]), aber deutlich schlechter als andere wasserdurchlässige Baustoffe, die als Bodenbeläge im Aussenraum eingesetzt werden können, wie beispielsweise Kies. In der Schweiz spielen diese beiden Aspekte keine grosse Rolle, da weder die heutige Dichte im urbanen Siedlungsraum noch das Klima die beiden Effekte begünstigt.

Als letzten Aspekt geht Calkins (2009) auf die Bindung von Kohlendioxid in Baustoffen als Aspekt des nachhaltigen Designs ein. Sie bezieht sich damit klar auf den Baustoff Holz, in dem Kohlendioxid gebunden ist, das erst bei der Verbrennung dieses Bauteils wieder frei gesetzt wird. Auch im Zusammenhang mit Beton wird heute die Bindung von Kohlendioxid diskutiert – durch die Carbonatisierung des Betons während der Nutzung (Haselbach [2009]). Die Bedeutung dieses Effektes sollte jedoch nicht überschätzt werden, da er nur die Oberflächen der Bauteile betrifft und sich über einen längeren Zeitraum hinweg vollzieht.

3.2.2. Gesellschaft

Die gesellschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit umfasst viele verschiedene Aspekte. Gemäss der Empfehlung SIA 112/1 (Nachhaltiges Bauen – Hochbau) sind dies *Gemeinschaft* (Integration, Durchmischung, soziale Kontakte, etc.), *Gestaltung* (Räumliche Identität, Individuelle Gestaltung, usw.), *Nutzung/Erschliessung* (z.B. Zugänglichkeit und Nutzbarkeit) und *Wohlbefinden/Gesundheit* (z.B. Raumluft, Strahlung, Lärm). In den nachfolgenden Abschnitten wird untersucht, was diese Anforderungen an eine nachhaltige Gesellschaft für den Baustoff Beton bedeuten und welche Stärken und Schwächen des Betons sich daraus ableiten lassen. Dabei stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Der Schutz der Gesundheit und die Förderung des Wohlbefindens einerseits, sowie die Möglichkeiten zur Unterstützung eines nachhaltigen Designs andererseits.

3.2.2.1. Gesundheit schützen / Wohlbefinden fördern

3.2.2.1.1. Emissionen in Lebensweg

Humantoxische Emissionen des Betons sind während der Nutzung bis heute keine bekannt. Allerdings können bei der Verarbeitung des Betons mit ungenügenden Schutzmassnahmen Hautreizungen und Hautkrankheiten hervorgerufen werden. In den vergangenen Jahren wurden in diesem Zusammenhang vor allem Allergien diskutiert, die in Zusammenhang mit dem Chromatgehalt im Zement stehen (vgl. dazu TFB [1999] und Rast [2005]). Zementekzeme waren bei Arbeitnehmern des Baugewerbes in der Schweiz lange die häufigsten beruflichen Hautkrankheiten. Während vor ungefähr zehn Jahren in der Schweiz jährlich noch ungefähr 100 neue Fälle von Zementekzemen gemeldet wurden, sind heute aufgrund veränderter Arbeitstechniken immer weniger allergische Zementekzeme beobachtet worden. Dies ist eine Konsequenz von verschiedenen Massnahmen der Bauindustrie, die sich als erfolgreich erwiesen haben.

3.2.2.1.2. Raumklima / Behaglichkeit

Der Einfluss von Beton auf das Raumklima und Wohlbefinden des Menschen wurde oft kontrovers diskutiert. Gerade beim Einsatz von Beton im Wohnbaubereich gibt es teilweise sehr unterschiedliche Meinungen zwischen der Baubiologie einerseits und der Zementindustrie andererseits. Waltjen (1995) hat in einer Arbeit versucht, diese Kontroverse zu dokumentieren. Dazu hat er bauphysikalische Eigenschaften verschiedener Baustoffe untersucht und miteinander verglichen:

a. Wärme

Da wärmetechnische Kennzahlen oft von der Rohdichte eines Baustoffs abhängen, muss zwischen Beton geringer bis mittlerer Dichte einerseits und Normalbeton andererseits unterschieden werden. Bei gleicher Rohdichte ist die Wärmeleitfähigkeit (nicht zu verwechseln mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten, U-Wert bzw. k-Wert (frühere Bezeichnung)) von Ziegelprodukten im Vergleich mit entsprechenden Betonprodukten ungefähr gleich gross. Für Normalbeton hingegen ist die Wärmeleitfähigkeit fast um das Doppelte höher als bei den schwersten Ziegelprodukten (Klinker) (Waltjen [1995]). Wird Normalbeton im Wohnungsbau eingesetzt, ist aus diesen Gründen stets eine Wärmedämmschicht nötig.

Holz unterscheidet sich deutlich von Tonziegel- und Betonprodukten. Holz zeichnet sich aus durch eine relativ geringe Rohdichte und einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit. Die massenspezifische Wärmespeicherfähigkeit ist etwa doppelt so gross wie bei Ziegel- und Betonbaustoffen (Werte aus Bausphysik-Taschenbuch [1986/87]). Dadurch kombiniert Holz die thermischen Vorteile schwerer Baustoffe (hohe Wärmespeicherfähigkeit, gute Wärmedämpfung und –regulation, guter Wärmeausgleich) mit denen leichter Baustoffe (gute Wärmedämmung, hohe Kontakttemperaturen). Dies wird von Baubiologen gerne als Vorzug von Holz gegenüber Beton angeführt (z.B. Gartner und Winklbauer [1984]). Allerdings ist es so, dass bei Gebäuden mit vergleichbarem Konstruktionsvolumen die Massivbauweise eine wesentlich höhere Wärmespeicherfähigkeit als bspw. ein Holzbau aufweist. Das liegt an der wesentlich grösseren Rohdichte „schwerer“ Baustoffe wie z.B. Beton. Dadurch muss in den Übergangsperioden weniger häufig geheizt werden (Preisig [2002]).

Waltjen (1995) führt an, dass sich die Argumente der Baubiologen in erster Linie gegen Normalbeton richten. Vergleiche von Holz mit leichten Betonsorten sucht man vergeblich. Grundsätzlich muss erwähnt werden, dass Vergleiche zwischen einzelnen Baustoffen nicht immer möglich oder sinnvoll sind. Korrekterweise müssten Bauteile wie sie in der Praxis Verwendung finden, ganzheitlich beurteilt werden. So bezieht sich auch der in der Literatur oftmals zitierte U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) jeweils auf ein Bauteil und nicht auf den Baustoff.

b. Dampfdiffusion

Unter Dampfdiffusion versteht man die Diffusion von Wasserdampf durch die Lufträume bzw. Poren eines Bauteils. Als Kenngrösse dient der Wasserdampfdiffusionswiderstand, welcher in erster Linie bei der Berechnung von mehrschichtigen Konstruktionen eine Rolle spielt, deren Schichten stark unterschiedlich diffusionsfähig und gleichzeitig sehr verschieden leitfähig sind. Anhand dieses Kennwerts soll die Gefahr einer Wasserdampfkondensation innerhalb einer mehrschichtigen Konstruktion und somit die Durchfeuchtung der Bauteile beurteilt werden. Damit die Luftfeuchte nicht nur über den Luftwechsel, sondern auch über die Baustoffe einen raschen Ausgleich erfahren kann, werden in der baubiologischen Literatur oft Baustoffe mit hoher Dampfdiffusionsfähigkeit gefordert (Waltjen [1995]). Normalbeton weist einen Diffusionswiderstandsfaktor von 70-150 auf, womit dieser Baustoff besonders «dampfdicht» ist. Holz hingegen hat einen Diffusionswiderstandsfaktor von 40 und ist damit sehr dampfdurchlässig (Bauphysik-Taschenbuch [1986/87]). Modellrechnungen aus der Bauphysik zeigen jedoch, dass der Feuchtigkeitshaushalt in Innenräumen auch durch Baustoffe mit relativ hoher Dampfdurchlässigkeit kaum beeinflusst werden kann (Pohlentz [1987], Bartussek [1985], Künzel [1986], Lang [1985]).

Waltjen (1995) folgert, dass die Bedeutung der Dampfdiffusion für das „Atmen“ der Wände ein Mythos sein dürfte und erklärungsbedürftig ist.

c. Sorptionsverhalten, Hygrokopizität

Hygrokopizität bezeichnet das Vermögen eines Baustoffs, auf den Feuchtigkeitshaushalt der Luft durch Feuchtigkeitsaufnahme oder –abgabe zu reagieren. Von entscheidender Bedeutung für die Aufnahme oder Abgabe von Wasserdampf ist der Wassergehalt eines Erzeugnisses. Unter dem Sorptionsverhalten wird die Eigenschaft eines hygroskopischen Erzeugnisses verstanden, Wasserdampf aus der Luft aufzunehmen bzw. abzugeben, bis ein Gleichgewichtszustand hergestellt ist. Das Sorptionsverhalten wird näherungsweise über den Wasserdampf-Absorptionskoeffizienten eines Baustoffs beschrieben (Kolbitsch [1995]). Eine hohe Absorptionsfähigkeit ist im Hinblick auf das Raumklima eine wünschenswerte Eigenschaft. Die Werte für Holz sind generell höher als diejenigen für Beton (Werte aus Künzel [1986]). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Tapeten, Putze und Einrichtungsgegenstände wie Teppiche oder Vorhänge wesentlich zur temporären Wasserspeicherung beitragen. Nur bei Sichtbeton, Sichtmauerwerk oder unlackiertem Holz muss der Baustoff selbst zur Wasseraufnahmekapazität der raumumschliessenden Flächen beitragen. Die Sorptionsfähigkeit spielt daher für die Auswahl der Baustoffe nur selten eine Rolle (Waltjen, T. [1995]).

d. Baufeuchte und Austrocknungsdauer

Generell gelten Wohnbauten dann als ausgetrocknet, wenn die Aussenbauteile – im Mittel über den Wandquerschnitt – keinen höheren als den *praktischen Feuchtegehalt* aufweisen (Steinert [1989]). Der praktische Feuchtegehalt ist jener Feuchtegehalt, der bei 90% der untersuchten Bauteile in genügend ausgetrockneten Bauten angetroffen wurde (Pohlentz [1987]). Als Austrocknungsdauer von reinen Betonbauten werden ca. 4 bis 5 Jahre angegeben (Kolb [1988]). Während dieser Zeit muss mit einem erhöhten Heizungsbedarf gerechnet werden, weil die Verdunstungskälte und die höhere Wärmeleitfähigkeit feuchter Bauteile ausgeglichen werden muss. Zusätzlich entstehen Wärmeverluste durch die notwendige vermehrte Lüftung (Waltjen [1995]). Dies wird von baubiologischer Seite insbesondere bei Wohnbauten gerne als Nachteil von Beton gegenüber Holz angeführt. Versuche über das Austrocknungsverhalten von Betonwänden kamen jedoch zum Ergebnis, dass nach wenigen Monaten Trocknungsdauer die Wasserabgabe von Normalbeton nicht mehr wesentlich zur Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit in Innenräumen beitragen kann (Breyer [1985]).

e. Schallschutz

Aussagen zum Schallschutz auf Baustoffebene sind schwierig zu machen, da das akustische Verhalten wesentlich von der Gesamtkonstruktion eines Bauwerks beeinflusst wird. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass Schall einerseits über die Luft (z.B. Stereoanlage des Nachbarn) oder einen Körper übertragen werden kann (z.B. Schritte, Nägel einschlagen). Preisig (2002) vergleicht daher wohl nicht einzelne Baustoffe, sondern Bauweisen. Zum internen Schallschutz von Massiv- und Leichtbauweise schreibt er: „*Hinsichtlich des Schallschutzes hat die Massivbauweise wegen ihrer Masse eindeutige Vorteile. ...Leichtbauten versuchen die fehlende Masse durch entkoppelte und beschwerte Schichten zu kompensieren. Dies ist sehr aufwändig. Erfahrungsgemäss werden die erhöhten Anforderungen trotz besonderer Anstrengungen nicht erreicht.*“ Winter & Kehl (2002) machen darauf aufmerksam, dass die Holzbauindustrie in diesem Bereich grosse Fortschritte erzielen konnte: „*Der Schutz vor Lärm ist wesentlicher Bestandteil heutiger Wohnqualität. ...Der Holzhausbau hat die Entwicklung erkannt und Verbesserungen umgesetzt. ...Besonders die Holzbauten der letzten zwei Jahrzehnte erfüllen die heutigen Ansprüche und sind zukunftsorientierte Neubauten. ...Richtig geplant sind ohne Weiteres auch gehobene Ansprüche an den Schallschutz erfüllbar.*“

Die nachstehende Abbildung zeigt einen Vergleich verschiedener Deckensysteme mit einer Ausbaulast von 1.5 kN/m² und einer Verkehrslast von 2.8 kN/m².

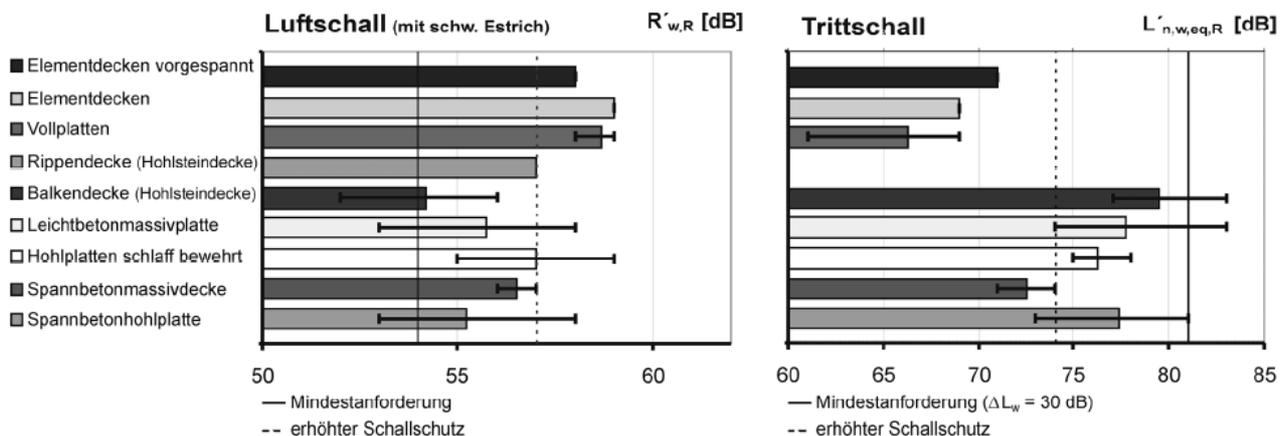


Abbildung 15: Luft- und Trittschall verschiedener Deckensysteme. Quelle: DAfStb (2007)

Der Vergleich von Luft- und Trittschall zeigt, dass diejenigen Deckensysteme welche Vorteile beim Luftschall aufweisen, beim Trittschall schlechter abschneiden. Deckensysteme mit guten Trittschalleigenschaften weisen umgekehrt im Vergleich schlechte Luftschallwerte auf. Somit wird deutlich, dass es bei den Schalleigenschaften von Bauteilen meist zu einem trade-off zwischen Luft- und Trittschall kommt. Die optimale Kombination aus Luft- und Trittschall eines Bauteils sieht je nach Verwendung wieder anders aus. Während Deckensysteme in erster Linie tiefe Trittschalwerte aufweisen sollten, sind beispielsweise bei Aussenwänden gute Luftschalleigenschaften gefordert.

f. Abschirmung von elektrischen und magnetischen Feldern

Waltjen (1995) untersuchte auch die Abschirmungswirkung verschiedener Baustoffe gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern. Er kommt zum Schluss, dass Beton im Vergleich zu anderen Baustoffen keine besonderen Vor- oder Nachteile aufweist. Bei der Untersuchung wurde die Abschirmung von vier verschiedenen Arten von Feldern betrachtet:

- Abschirmung **statischer elektrischer** Felder: Da man vor allem früher davon ausging, statische elektrische Felder könnten einen Einfluss auf die Gesundheit haben, wurde untersucht wie stark verschiedene Baustoffe diese Felder abschirmen. Eine ziemlich alte Studie von Kritzinger (1958), welche gemäss Waltjen (1995) in der baubiologischen Literatur oft zitiert wird, kommt zum Schluss, dass die wünschenswerte Aufrechterhaltung des natürlichen elektrischen Feldes nur mit Fachwerk- oder

Holzhäusern gewährleistet werden kann. Als Begründung wird auf die schlechte Leitfähigkeit von Holz verwiesen, wodurch im Gegensatz zu armiertem Beton das elektrische Feld nicht neutralisiert würde. Die Messungen sind in der Studie jedoch nicht genauer dokumentiert. Neuere Arbeiten widersprechen den Resultaten von Kritzinger. Lenke & Bonzel (1975) sagen aus, dass elektrostatische Felder der Aussenluft durch Bauteile aus Glas, Holz, Mauerziegel, Kalksandstein und bewehrtem Beton in gleicher Weise abgeschirmt werden. Weiter wird darauf verwiesen, dass ein im Innenraum gemessenes Feld auch durch Menschen und Einrichtungen verursacht werden kann. Ein Bericht zu Baustoffen und Lebensqualität kommt zum selben Ergebnis: „Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass hinsichtlich der Abschirmwirkung der Baustoffzellen gegenüber statischen Feldern keine Unterschiede feststellbar waren.“ Generell ist man heute der Ansicht, dass es keine baustoffspezifischen Abschirmfaktoren für elektrische Gleichfelder gibt (Waltjen [1995]).

- Abschirmung **statischer magnetischer** Felder: In der baubiologischen Literatur finden sich einige Aussagen, dass Stahlbeton das erdmagnetische Feld in Innenräumen verzerren oder schwächen könnte (z.B. Fischer & Schneider [1989], Gartner & Winklbaur [1984]). Allerdings fehlen meist Angaben über die mögliche biologische Wirksamkeit der Verzerrung des Erdmagnetfeldes. Waltjen (1995) schreibt, dass das natürliche statische magnetische Feld von Baustoffen nicht abgeschirmt werden kann. Er fügt zudem an, dass neben der Stahlarmierung von Beton auch andere metallische Gegenstände in den Innenräumen das Magnetfeld verzerren können.
- Abschirmung **niederfrequenter elektrischer** Felder: Aus baubiologischer Sicht wird den niederfrequenten elektrischen Feldern (bis 30 kHz) oft eine wichtige Funktion zugeschrieben. Gartner & Winklbaur (1984) schreiben bspw: „...Das lufterlektrische Feld hat bei ca. 10 Hz den stärksten lebensfördernden Effekt ... Es ist ein Dauerreiz, den der Organismus braucht ... Dass dieser fast lebensnotwendige Reiz durch die Metallabschirmung des Stahlbetonbaus verhindert wird, muss als schwerwiegendes Faktum angeführt werden...“. Seitens der Zementindustrie wird solchen Aussagen jedoch widersprochen. Lenke & Bonzel (1975) weisen darauf hin, dass niederfrequente elektromagnetische Felder natürlichen und technischen Ursprungs sein können. In dicht besiedelten Gebieten würden diese überwiegend technisch erzeugt und würden grössere Feldschwankungen und Feldstärken als in ländlichen Gebieten aufweisen. Gemäss ihren Messungen gibt es in Innenräumen mit Bauteilen aus Holz, Beton oder Kalksandstein keine Unterschiede hinsichtlich der Art und der Stärke der elektromagnetischen Felder. Generell lässt sich festhalten, dass die Abschirmwirkung von Baustoffen für niederfrequente elektrische Felder umstritten ist. Ebenfalls fragwürdig ist die Relevanz der Abschirmwirkung (Waltjen [1995]).
- Abschirmung **niederfrequenter magnetischer** Felder: Gemäss den Untersuchungen von Waltjen (1995) gibt es keine Angaben darüber, dass niederfrequente magnetische Felder von üblichen Baustoffen abgeschirmt würden.
- Abschirmung **hochfrequenter elektrischer** Felder: Als hochfrequenter Bereich wird die elektromagnetische Strahlung in Bereich von 30 kHz bis 300 GHz verstanden (Leitgeb [1990]). Anhand einer Auswertung verschiedener Studien in diesem Bereich folgert Waltjen (1995), dass für hochfrequente elektromagnetische Strahlung übliche Baustoffe möglicherweise verschieden durchlässig sind. Resultate aus Untersuchungen seien nicht einheitlich. Es liege aber die Vermutung nahe, dass bewehrter Beton eine grössere Abschirmungswirkung als andere Baustoffe habe. Die biologische Relevanz sei zudem fraglich, da hochfrequente elektromagnetische Strahlung in unserer Umwelt hauptsächlich technisch hervorgerufen werde.

3.2.2.1.3. Bemerkungen

Die Resultate von Waltjen (1995) zeigen, dass die Vorwürfe seitens der Baubiologie oft haltlos und nicht wissenschaftlich fundiert sind. Dies liegt aber auch an den unterschiedlichen Auffassungen der Baubiologie und der Zementindustrie. Baubiologen bringen den Begriff Beton meist mit jeder denkbaren (ungünstigen)

Gebäudeeigenschaft in Verbindung, während die Zementindustrie unter «Beton» den Baustoff als solchen versteht. Es verwundert daher nicht, dass die Diskussionen um Beton auf Baustoffebene zwischen Baubiologie und Zementindustrie oft ins Leere laufen. *„Dies liegt daran, dass aus der blossen Anwesenheit eines Baustoffs in einem Gebäude nicht auf die Gebäudeeigenschaften geschlossen werden kann.“* (Waltjen [1995]).

Grundsätzlich ist es meist problematisch, Baustoffe unabhängig von ihrem Verwendungszweck zu beurteilen. In der Praxis gibt es kaum Konstruktionen, welche aus einem einzigen Baustoff erstellt werden. Vielmehr wird versucht, die bauphysikalischen Eigenschaften verschiedener Baustoffe optimal miteinander zu kombinieren. So eignet sich bspw. Normalbeton aufgrund seiner hohen Tragfähigkeit hervorragend für einen mehrgeschossigen Wohnungsbau. Da der Baustoff Beton aber auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, was sich nachteilig auf das Raumklima auswirkt, müssen entsprechende Wärmedämmungen eingebaut werden. Diesbezüglich sind wiederum andere Baustoffe geeigneter.

Entscheidend bei der Beurteilung von Beton ist nicht nur für welche Bauteile er eingesetzt wird, sondern auch der Nutzungszweck der Gesamtkonstruktion. Beispielsweise spielen beim Bau einer Stauwand die thermischen Eigenschaften von Beton nur eine sehr untergeordnete Rolle, entscheidend ist die Fähigkeit, enormen Druckkräften standhalten zu können. Und diese erfüllt Beton ganz ausgezeichnet. Die Baubiologie stellt Vergleiche fast ausschliesslich im Wohnungsbau an. Im restlichen Hoch- und Industriebau, sowie im Bereich des Wasser-, Tief- und Tunnelbaus, wo der Baustoff Beton häufig und in grossen Mengen eingesetzt wird, sind Einwände seitens der Baubiologie kaum zu vernehmen.

3.2.2.2. Nachhaltiges Design unterstützen

3.2.2.2.1. Gestaltung

Wie in den letzten Abschnitten deutlich wurde, ist eine abschliessende Beurteilung eines Materials auf Baustoffebene kaum möglich. Entscheidend ist wo und wie ein Baustoff in einer Konstruktion eingesetzt wird. Neben den technischen Eigenschaften müssen auch Form und Gestaltung einer Konstruktion den Bedürfnissen und Ansprüchen der Nutzer genügen. Denn auch diese Faktoren tragen zum Wohlbefinden des Menschen bei. Beton verfügt über eine sehr grosse Varietät und Anwendungsbreite. Es gibt Betone, welche wasserundurchlässig oder bewusst wasserdurchlässig sind, solche welche leichter sind als Wasser und wiederum solche, welche besonders schwer sind. Neben Betonsorten mit einer praktisch unendlichen Lebensdauer gibt es solche, die eine Dauerhaftigkeit von 30-50 Jahren aufweisen (C. Waltjen [1995]). Mit der Auswahl der Gesteinskörnung und durch Farbpigmente kann Beton vielfältig eingefärbt werden. Seit einigen Jahren gibt es sogar lichtdurchlässigen Beton (Quelle: www.beton.org).

Ein wesentlicher Vorteil von Beton gegenüber anderen Baustoffen liegt darin, dass er beim Anmachen flüssig ist. Dadurch lässt er sich in nahezu jede erdenkliche Form giessen. Nur die Möglichkeiten bei der Konstruktion von Schalungen setzen hier Grenzen. In Hinblick auf die gestalterischen Eigenschaften von Beton wird von Maurer-Dietrich (1995) anhand von acht Thesen eingehend diskutiert und untersucht, ob und wie diese eine zeitgemässe Architektursprache zulassen. Urs Maurer spricht in dieser Studie in These 6 von einem «gestörten Gleichgewicht» zwischen den polar gegensätzlichen Architektursprachen, welche nach Ernst Bloch die europäische Architekturgeschichte geprägt haben: jene, welche sich nach der Inspirationsquelle der Utopie des «Todeskristalls» und jene, welche sich an der Utopie des «Lebensbaumes» orientieren. In Maurer (2007) geht er dieser These weiter nach und kommt zum Schluss, dass in Europa die Baustile bis in die Gegenwart tatsächlich als Pendelbewegung zwischen diesen beiden polaren Leitbildern verstanden werden können. Er zeigt, dass sich in den Architektursprachen der sogenannten «Moderne» die «rational-karthesianische» Schule als Gegenbewegung zum Jugendstil, der sich klar am Lebensbaum orientiert hat, mit Erfolg durchgesetzt habe. Die auch im Bauhaus vorhandenen Ansätze des «organischen Bauens», wie Sullivan und Frank Lloyd Wright diese schon zuvor propagiert hatten, blühten zwar nach dem zweiten Weltkrieg mit Alvar Aalto, Eero Saarinen und im Spätwerk Le Corbusiers (Ronchamps) noch einmal auf, verlören danach jedoch an Boden. Besonders in der Schweiz

bestimme die sich in der Kunst als «Minimalismus» und in der Architektur als «Rationalismus» bezeichnete Strömung der «scharf geschnittenen Kuben und Kanten» nach wie vor die Preis- und Wettbewerbsszene. Renommiertere Architekturpreise und Architekturzeitschriften wie «Bauen in Beton» in der Schweiz und «opus C» in Deutschland hätten die Vorliebe für bestimmte Architektursprachen massgebend mit beeinflusst. Beton habe sich in den vergangenen 10 Jahren klar und einseitig auf die Seite des Minimalismus/Rationalismus positioniert. Die natürlichen Grundeigenschaften des Betons, nämlich rein mineralisch zu sein und im Aushärtungsprozess in geologisch gesehen ausserordentlich kurzer Zeit eine Art von «Kristallisationsprozess» durchzumachen, positionierten Beton tendenziell ohnehin eher in die verwandtschaftliche Nähe zum «Todeskristall» nach Ernst Bloch. Wenn das Pendel wiederum in Richtung «Lebensbaum» ausschlägt – gemäss These von Maurer (1995) – werde Beton gegenüber den Baustoffen Lehm und vor allem Holz tendenziell einen schwierigen Stand haben.

Maurer empfiehlt in einem Beitrag (2001), sich klar auf die natürlichen Eigenschaften des Betons zurück zu besinnen und ihn dort zu propagieren, wo sachgemäss seine natürlichen Eigenschaften wie Schlagfestigkeit, Härte, Wasserdichtigkeit voll zum Tragen kommen, nämlich bei der statischen Primär-Konstruktion. Nach seiner Einschätzung solle man sich nicht länger Bemühen, dem Beton durch eine Lasur oder eine Textur «Behaglichkeit» geben zu wollen. Er schlägt vielmehr vor, für innere Oberflächen andere Materialien zu verwenden wie beispielsweise Lehmputz, Holz oder Linoleum. Er schlägt vor, künftig die nach innen wirkende Haut (des Gebäudes) oder Oberfläche als „Dritte Haut“ und die nach aussen wirkende Haut (des Gebäudes) oder Oberfläche als „Vierte Haut“ des Menschen zu bezeichnen. Beton eignet sich bei vor allem für die Oberfläche nach aussen.

Grundsätzlich erscheint es jedoch als ausserordentlich anspruchsvoll, eine architektonische Qualität im nachhaltigen Bauen zu beschreiben, die alle anderen Kriterien zusammenfasst und auf das „Mass des unmessbaren Menschen“ beziehen möchte (C. Waltjen [1995]). Wie bereits im letzten Abschnitt beschrieben ändern sich architektonische Trends um Zeitverlauf und damit auch die gesellschaftliche Akzeptanz von Betonbauten. Während bei Bürogebäuden aktuell gerne Beton verwendet wird um mehrgeschossig bauen zu können und diese Materialwahl grundsätzlich auf eine breite Akzeptanz stösst, erfährt der Einsatz von Beton in Wohnbau wesentlich grössere Kritik. Das beruht nicht nur auf den von den Baubiologen angeführten Argumenten zu den physikalischen Eigenschaften von Beton (siehe dazu Abschnitt 3.2.2.1), sondern auch auf dem Erscheinungsbild von Beton. Beton wird oft als schwer und massig, nüchtern, dunkel und kalt wahrgenommen. Diese Eigenschaften empfinden viele Menschen als störend. Es wird argumentiert, dass dadurch die Behaglichkeit und das Wohlempfinden getrübt werden. Demgegenüber gibt es jedoch wieder Menschen, welche sich gerade aufgrund der Eigenschaften von Beton, sei es die Rohheit oder das Archaische, mit diesem Baustoff identifizieren. Ob einem Beton gefällt und ob man sich in einem Gebäude aus Beton wohlfühlt, ist letzten Endes eine Frage der persönlichen Überzeugung und des persönlichen Geschmacks.

Allerdings sind auch die besten Voraussetzungen eines Baustoffs für eine vielfältige Gestaltung wertlos, wenn sie nicht genutzt werden. In der Praxis ist das leider oft der Fall, denn «Gestaltung» bedeutet gegenüber der rein funktionalen Anwendung meist zusätzlichen Material- und Arbeitsaufwand. Die wirtschaftliche Orientierung führte gerade beim Beton oft als «Massenware» zu langweiligen und monotonen Bauten.

3.2.2.2.2. Nutzungsflexibilität und –variabilität

Anforderungen und Bedürfnisse an ein Bauwerk können sich im Laufe der Zeit ändern. Sei es dadurch, dass sich die Präferenzen der Nutzer ändern oder dass ein Gebäude bspw. aus wirtschaftlichen Überlegungen einem neuen Nutzungszweck dienen soll (z.B. Umwandlung von Bürogebäude in Wohngebäude). Aus der Sicht der Nachhaltigkeit ist es deshalb wichtig, dass ein Gebäude eine hohe Nutzungsflexibilität aufweist. Ist dies nicht der Fall, muss ein Gebäude häufig um- oder ausgebaut werden um den veränderten Nutzungsansprüchen genügen zu können. Im Extremfall müssen Gebäude gar abgerissen werden, obwohl

das Ende ihrer eigentlichen Lebensdauer noch nicht erreicht ist. Bauliche Massnahmen sind stets mit Kosten und dem Verbrauch von Ressourcen verbunden. Zusätzlich werden durch die Bauprozesse Emissionen freigesetzt, welche Mensch und Umwelt erheblich belasten können (z.B. Lärm, Staub). Um eine hohe Nutzungsflexibilität oder – variabilität zu erreichen, ist weniger die Wahl des Baustoffs ausschlaggebend sondern vielmehr eine intelligente Planung und Konstruktion des Gebäudes. Beton weist im Vergleich zu anderen Baustoffen dennoch einige Vorteile auf. Beton erlaubt die wirtschaftliche Realisierung von weitgespannten Tragstrukturen und ermöglicht dadurch eine hohe Nutzungsvariabilität im Gebäudeinneren. Durch nicht tragende Innenwände kann so eine grosse Nutzungsflexibilität gewährleistet werden. Durch die Verwendung unterschiedlicher Zemente und Zuschlagstoffe kann die Materialfestigkeit von Beton belastungsorientiert festgelegt werden, wodurch eine optimale Ausnutzung des Baustoffs möglich ist. So können bspw. Tragwerksstrukturen mit hohen Nutzlasten erstellt werden, die eine Wohn-, Büro- und Gewerbenutzung eines Gebäudes gleichermaßen zulassen. Ist ein Ausbau oder Erweiterung eines Gebäudes aufgrund begrenzter Bodenfläche nicht möglich, können Betonbauten bei entsprechend geeigneter Konstruktion aufgrund der grossen Belastbarkeit weiter in die Höhe gebaut bzw. zusätzliche Stockwerke angefügt werden.

3.2.2.2.3.Sicherheit

Beton gehört nach DIN 4102 zu den nicht brennbaren Stoffen und ist in der Baustoffklasse A1 eingestuft. Erst in Temperaturbereichen ab 400 Grad Celsius kann es zu einer Abnahme der Festigkeit und zu zunehmender irreversibler Verformungsfähigkeit kommen (DAfStb [2001]). Bei Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen ist auf eine entsprechende Überdeckung der Stahleinlagen zu achten (Kolbitsch [1995]). Der hohe Feuerwiderstand ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Baustoffen. Hartholz bspw. gehört mit der Baustoffklasse B1 zu den brennbaren, schwerentflammenden Baustoffen. Der Brandschutz bei Holzbauten gestaltet sich daher etwas schwieriger (insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden). Zwar sind vollständig hölzerne Konstruktionen mit brennbaren Verkleidungen zulässig, dennoch werden aus Sicherheitsüberlegungen die meisten Holztafel- /Holzrahmenbauten mit einer nichtbrennbaren Innenbekleidung wie z.B. aus Gipsbauplatten ausgeführt (Winter & Kehl [2002]). Sollte es zu einem Brandfall kommen, besteht ein Vorzug von Beton darin, dass dieser in der Regel auf einfache Weise instandgesetzt werden kann.

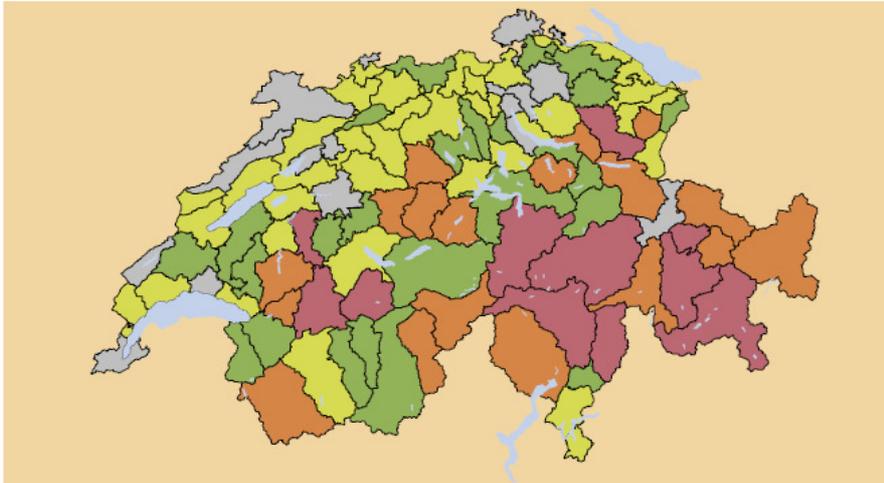
Neben dem Brandschutz bietet die massive Struktur und hohe Dichte des Betons auch Vorteile beim Schutz vor Einbruch und Diebstahl. Bei entsprechender Dimensionierung und Konstruktion gewährleisten Betonbauten bei Extremereignissen (z.B. Explosionen, Erdbeben) die nötige Standsicherheit und Widerstandsfähigkeit. Beton ist ausserdem beständig gegen den Befall mit Fäulnis, Pilzen, Schimmel und anderen natürlichen Schädlingen. Wasserundurchlässige Betonbauteile haben gegenüber anderen Werkstoffen den Vorteil, dass sie gut vor eindringendem Wasser schützen. Selbst wenn Wasser in ein Gebäude in Betonbauweise eindringen sollte (z.B. infolge Hochwasser) kann es dieses nicht substanzschädigen (Beton [2005]).

3.2.3. Wirtschaft

3.2.3.1. Lokale Wirtschaft fördern

Die Schweizer Bauwirtschaft hat entgegen der öffentlichen Wahrnehmung eine grosse volkswirtschaftliche Bedeutung. Knapp 6% der gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfung wurde im Jahr 2007 im Baugewerbe erwirtschaftet (Quelle: Bundesamt für Statistik – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung). Rund 7% aller Schweizer Erwerbstätigen sind im Bausektor beschäftigt. Die Branchenbezeichnung «Baugewerbe» (Noga Code 45) umfasst die Bereiche Bauhaupt- und Baunebengewerbe. Das Bauhauptgewerbe beinhaltet neben den vorbereitenden Baustellenarbeiten den gesamten Hoch- und Tiefbau. Das Baunebengewerbe umfasst das Installations- und Ausbaugewerbe.

Neben der direkten Wertschöpfung und dem Beschäftigungseffekt kommt der Baubranche auch eine wichtige Rolle bei der indirekten Wertschöpfung zu. Ein Schweizerfranken, der in der Baubranche umgesetzt wird, führt in der Schweiz 2005 zu einer Erhöhung des gesamten Produktionsvolumens von 1.85 Schweizerfranken (Quelle: eigene Berechnungen auf der Grundlage der Input-Output-Tabelle der Schweiz, 2005). Der Wert dieses so genannten «Multiplikators» ist für keine andere wichtige Branche in der Schweiz derart hoch. Für den gesamten Bankensektor beispielsweise, beträgt er 2005 nur 1.5 Schweizerfranken. Ursache für diese relativ grosse Wirkung der Bauwirtschaft auf die gesamte Wirtschaft ist ihre vergleichsweise starke Vernetzung mit anderen Branchen (hier vor allem auf Seiten der Zulieferer). Regionale Input-Output-Tabellen zeigen exemplarisch, dass dieser Effekt auch für regionale Wirtschaftsräume zutrifft (siehe z.B. Bebi et al [2005]). Die Betrachtung der Bauwirtschaft auf regionaler Ebene zeigt, gemessen an der Bruttowertschöpfung, dass deren direkte Bedeutung in der Schweiz unterschiedlich stark ausfällt:



MS = Mobilité spatiale

Quelle: BFS, BAK Basel Economics / Die Volkswirtschaft

Abbildung 16: Anteil in % der Bruttowertschöpfung der Baubranche an der Gesamtwirtschaft in den Schweizer MS-Regionen, 2006

Die Anteile der Baubranche an der regionalspezifischen Wertschöpfung bewegen sich zwischen 2.6% und 17.3%. Die grösste Bedeutung Baubranche findet sich im durch eher traditionelle Wirtschaftsstrukturen geprägten Alpenraum. Betrachtet man hingegen die absolute Bruttowertschöpfung der Baubranche, zeigt sich, dass diese erwartungsgemäss in Regionen mit hoher Bevölkerungszahl und Ballungsräumen am grössten ist.

Der Hauptteil der in der Schweiz getätigten Bauinvestitionen entfällt auf den Hochbau. Dieser macht über drei Viertel aller Bauaufwendungen aus, wobei das Hochbauvolumen klar durch den Wohnungsbau dominiert wird (Körber & Kaufmann [2007]).

Wie gross ist der Anteil von Beton in dieser Wirtschaftstätigkeit? Diese Frage lässt sich nicht mit ökonomischen Statistiken beantworten. Aber die Marktanteile verschiedener Baustoffe in den Tragkonstruktionen lassen erste Schlüsse zu (siehe Abbildung 17). Hier zeigt sich in allen Schweizer Regionen ein Marktanteil für Einfamilienhäuser von circa 50%. Der Marktanteil für Mehrfamilienhäuser liegt ungefähr in der gleichen Grössenordnung.

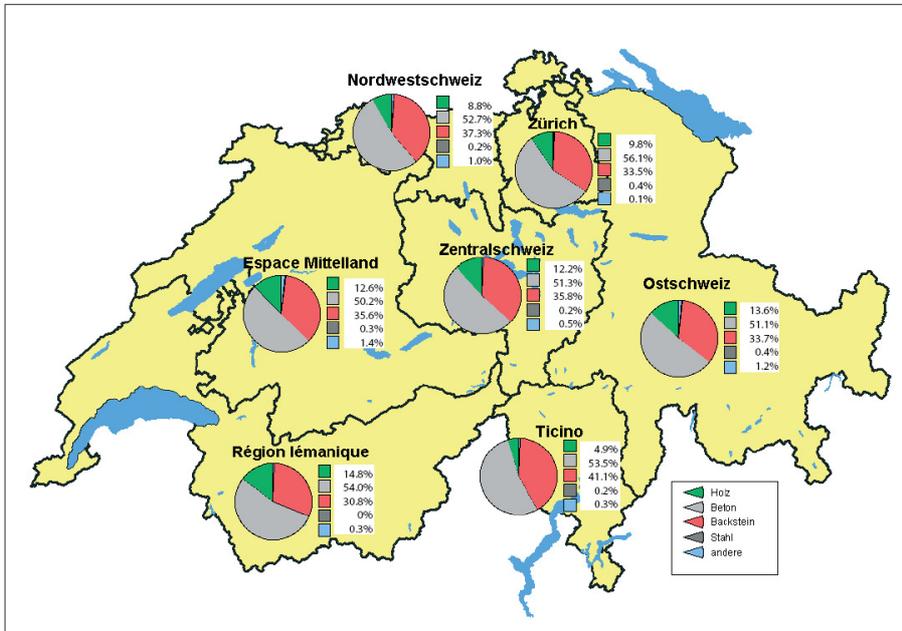


Abbildung 17: Marktanteile in den Tragkonstruktionen Bei EFH, Neubau 2006. (Quelle: KMU Zentrum Holz [2006])

Dieser Marktanteil ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen, insbesondere zugunsten von Mauerwerk (siehe Abbildung 18). Gleichzeitig hat sich die Dichte von Gebäude tendenziell erhöht. Pro Kubikmeter umbauter Raum wird heute mehr Material – und insbesondere mehr Beton – eingesetzt wie früher.

Beton wird in der Schweiz in der Regel regional hergestellt, da die relativ hohen Transportkosten einen weiteren Transport nicht zulassen und die Rohstoffe regional verfügbar sind. Hierin unterscheidet sich Beton von anderen wichtigen Baumaterialien. In der Holzwirtschaft wird beispielsweise seit vielen Jahren beklagt, dass zu wenig Schweizer Holz zu hochwertigen Bauprodukten verarbeitet wird, und es werden entsprechende politische Fördermassnahmen vorgeschlagen und umgesetzt (BAFU [2008]). Auch bei wichtigen Metallen wie Eisen oder Kupfer ist die Schweiz nach wie vor von Importen abhängig. Dabei werden vor allem hochwertige Metallprodukte importiert. Die Schweizer Metallwirtschaft kann sich dank eines sehr effektiven Metallrecyclings im Wettbewerb behaupten. Ihre Märkte sind jedoch eher national als regional.

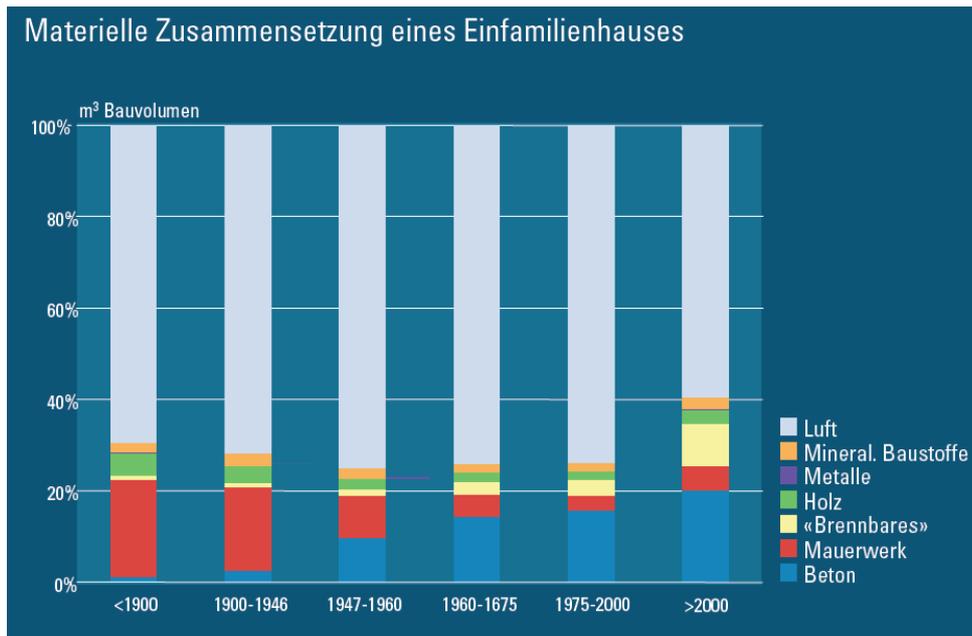


Abbildung 18: Materielle Zusammensetzung eines Einfamilienhauses. Quelle: Haag 2008.

3.2.3.2. Kosteneffiziente Produktion

Kostenvorteile bei der Betonherstellung ergeben sich aufgrund den *economies of scale*, welche auf die grossen Produktionsmengen in der Schweiz bestehen rund 734 Mio. Tonnen des gesamten Materiallagers im Hochbau aus Beton. Das entspricht einem Anteil von ca. 56%. Weitere 166 Mio. Tonnen lagern im Tiefbau (Rubli [2005]). Typische Beispiele für *economies of scale* sind sinkende Durchschnittskosten, Vorteile bei der Arbeitsteilung (Unterteilung in einfache repetitive Tätigkeiten), Einsparungen durch die Verwendung grösserer Produktionsmittel, Rationalisierungen durch den Einsatz automatischer Produktionsmittel, usw. Ein weiterer Vorteil von Beton ist, dass dessen Nachfrage immer etwa gleich gross ist und keinen allzu grossen Schwankungen unterliegt, wodurch eine bessere Bedarfsplanung und Abstimmung der Produktionsmittel möglich ist.

Kosteneinsparungen bei der Erstellung lassen sich auch durch die Vorfabrikation von Bauteilen erzielen. Die Vorfabrikation ermöglicht kürzere Bauzeiten und niedrigere Baufeuchten, wodurch ein Gebäude früher genutzt werden kann. Gemäss Preisig (2002) findet im Gegensatz zum Leichtbau (Holzsystembau) eine Vorfabrikation beim Massivbau nur vereinzelt statt. Die Potentiale werden dort deshalb als erheblich eingeschätzt. Zu beachten ist jedoch, dass eine industrialisierte Bauweise eine längere und intensivere Planungszeit sowie frühzeitige Entscheide erfordert.

3.2.3.3. Lebenszykluskosten

Ist von Baukosten die Rede, wird oft vorschnell nur an die Erstellungskosten eines Bauwerks gedacht. Tatsache ist, dass Bauten mit tiefen Erstellungskosten nicht zwangsläufig die billigsten sind. Für eine nachhaltige Kostenbetrachtung müssen alle über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes anfallenden Kosten berücksichtigt werden (siehe Abbildung 19).

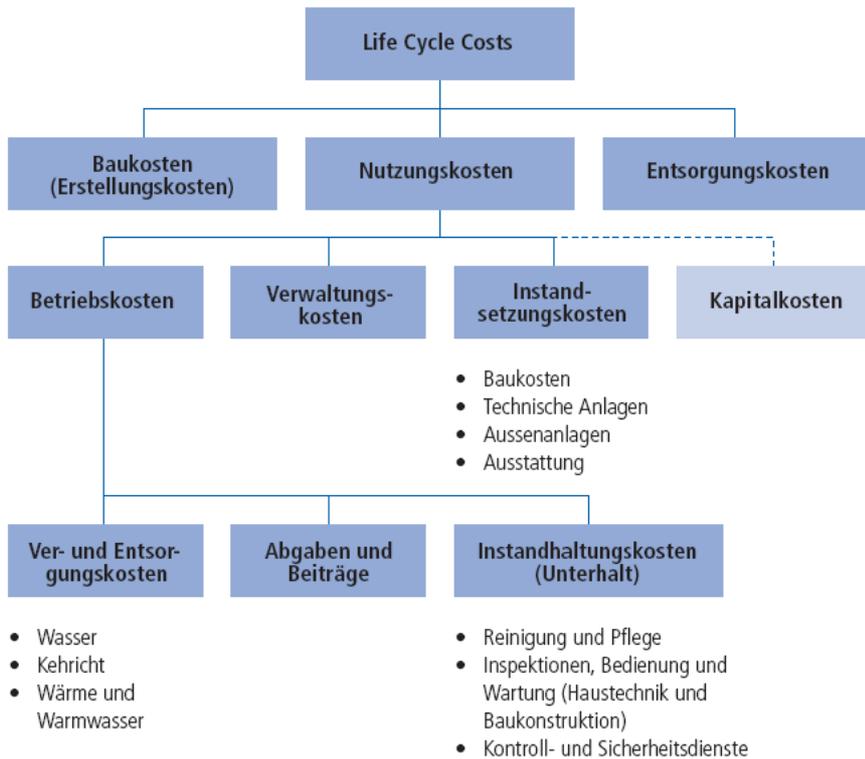


Abbildung 19: Übersicht Lebenszykluskosten. Quelle: Preisig & Kasser (2005)

Wie aus obenstehender Abbildung ersichtlich ist, machen die Baukosten nur einen Teil der Lebenszykluskosten aus. Die Bedeutung der Nutzungskosten wurde lange vernachlässigt, obschon diese bereits nach relativ kurzer Zeit die Baukosten bei weitem übersteigen können (Preisig & Kasser [2005]). Sigg, Kälin & Plattner (2006) zeigen an ausgewählten Beispielen auf, dass den grössten Anteil der Nutzungskosten die Instandsetzungs- und Kapitalkosten ausmachen. Bei den Instandsetzungskosten fallen vor allem die haustechnischen Anlagen ins Gewicht. Anhand der untersuchten Objekte konnte eine positive Korrelation zwischen dem Technisierungsgrad und den Lebenszykluskosten (in CHF/m²) festgestellt werden.

Aufgrund der zahlreichen Kosteneinflussfaktoren einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung ist leicht erkennbar, dass ein aussagekräftiger Kostenvergleich auf reiner Baustoffebene weder möglich noch sinnvoll ist. Denn nicht die Wahl des Baustoffs, sondern primär Gebäudekonstruktion und –funktionalität spielen eine zentrale Rolle für die späteren Nutzungskosten. So sollte bspw. bei der Planung eines Neubaus darauf geachtet werden, dass die technischen Systeme leicht zugänglich und leicht ersetzbar sind oder dass ein guter Witterungsschutz gewährleistet ist. Im Zuge des gesellschaftlichen Wandels ändern sich auch die Anforderungen der Nutzer an ein Gebäude. Eine hohe Flexibilität des Gebäudes kann daher zukünftig weitaus wichtiger sein als bspw. eine möglichst lange Lebensdauer. Die Umwandlung von leerstehenden Bürogebäuden in Wohngebäude scheitert heute oft genau an dieser fehlenden Flexibilität (Preisig & Kasser [2005]). So sind denn auch hohe Flexibilität für die verschiedenen Raum- und Nutzungsbedürfnisse ein wichtiges Teilziel in der Empfehlung SIA 112/1 (Nachhaltiges Bauen – Hochbau).

In der Literatur konnten keine Vergleiche der Lebenszykluskosten unterschiedlicher Bauweisen von Gebäuden gefunden werden. Dies ist allerdings nicht erstaunlich wenn man bedenkt wie schwierig es ist, Zeitpunkte sowie Höhe der nötigen Aufwendungen zu prognostizieren und wie hoch dabei die Fehleranfälligkeit ist. Ausserdem wäre ein solcher Vergleich nur schon deshalb nie ganz schlüssig, da es keine Gebäude gibt, welche in ihrer Dimensionierung und Raumaufteilung identisch sind, die gleichen Standards (Wärmeschutz, Schallschutz, etc.) erfüllen, über die selbe Ausstattung verfügen, den gleichen Standort haben und zusätzlich nur mit Bauteilen eines einzigen Baustofftyps gebaut wurden (z.B. nur Holz- oder Betonbauteile).

Trotz der beschriebenen Problematik gibt es Studien, welche zwar nicht die Lebenszykluskosten, aber die Herstellungskosten von Wohngebäuden in unterschiedlicher Bauweise vergleichen. Verglichen wird jeweils eine Massivbauweise mit einer Leichtbauweise. In den betrachteten Studien handelt es sich bei der Massivbauweise um Mischkonstruktionen, reine Betonbauten kommen bei den Vergleichen nicht vor. Die Studie des Instituts für Bauforschung Hannover (IFB [2008]) geht bei ihrem Vergleich von einem konstruktiv durchschnittlichen Einfamilienhaus in KfW-40-Bauweise^{vii} aus. Aus den Berechnungen ergab sich, dass die Investitionskosten der Massivbauweise um rund 15'000 Euro oder ca. 5% tiefer als bei einem Holzfertighaus sind. Die Resultate einer Studie des Instituts für Trocken- und Leichtbau Darmstadt (Tichelmann [2007]) stützen sich auf ein in den Jahren 1996/97 durchgeführtes Projekt. Dabei wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens zwei äusserlich identische, freistehende Einfamilienhäuser in Massivbauweise bzw. Leicht-/Holzbauweise gebaut. Ziel dieses Vorhabens war es, einen 1:1 Vergleich der bauweisespezifischen Eigenschaften der Gebäude unter realen Bedingungen zu ermöglichen und Kriterien der Wirtschaftlichkeit zu quantifizieren. Als Randbedingungen wurden festgelegt: gleicher Standort, identische Aussenabmessungen und gleiches Erscheinungsbild, gleiche innere Raumaufteilung und Ausstattung sowie energetisch vergleichbare Aussenbauteil-Aufbauten. Die Auswertung der Herstellungskosten hat gezeigt, dass beim Massivbau ca. 20'000 Euro oder rund 20% Mehrkosten anfielen. Begründet wird der Unterschied damit, dass Holz zum Zeitpunkt des Baus relativ günstig angeboten wurde, die Vorfertigung beim Holzbau weniger lohnintensiv als die Baustellenfertigung beim Massivbau ist und die Gesamtbauzeit beim Massivbau länger war (+2 Monate). Aus einer Untersuchung von «Massiv mein Haus» zum Kostenvergleich von Massivbauweise und Holzbauweise geht wiederum hervor, dass die Erstellungskosten der Massivbauweise tiefer sind. Die Kostenvorteile bewegen sich bei den in der Untersuchung angeführten Beispielen zwischen 6% und 22%.

Die angeführten Beispiele zeigen, dass es keine klaren Kostenvorteile zugunsten einer Bauweise gibt. In Tichelmann (2007) wird auf weitere Recherchearbeiten verwiesen, welche diese Folgerung stützen. Dabei wurden die Preise einer grossen Anzahl von vergleichbaren Einfamilienhäusern in Deutschland und Österreich untersucht. Im Mittelwert ergaben sich für gleiche Gebäudetypen, unabhängig von der Bauweise, die gleichen Verkaufspreise. Einen weiteren Hinweis darauf, dass die Bauweise oder Baustoffwahl keinen signifikanten Einfluss auf die Baukosten hat, liefert die Studie von Stoy & Schalcher (2007). Sie untersucht, welche Indikatoren und Kostentreiber massgebend für die Erstellungskosten von Wohngebäuden sind. Dies sind bspw. mittlere Stockwerkhöhe oder Baudauer. Baumaterialien kommen unter den wichtigsten Indikatoren nicht vor.

3.2.3.4. Werterhaltung

Unter den ökonomischen Aspekten wird in der Empfehlung SIA 112/1 zu nachhaltigem Bauen im Hochbau die Bausubstanz aufgeführt. Im Sinne der Nachhaltigkeit wird gefordert, dass die Bausubstanz nicht nur entsprechend dem Stand der Technik, sondern auch unter Berücksichtigung der Lebensdauer geplant und ausgeführt wird. Dabei sollen die Konstruktion und Materialien entsprechend der verlangten Nutzungszeit der Bauteile gewählt werden (KBOB [2000]).

Für die Lebensdauer eines Wohngebäudes wird in der Regel 80 bis 100 Jahre angenommen. Diese Annahme resultiert aus der wirtschaftlichen Nutzungsdauer. In IFB (2004) wird von einer Referenzzeit von 80 Jahren ausgegangen. Dadurch wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Wohngewohnheiten heute schnelleren Änderungen unterworfen sind. Eine Nutzungsdauer von 100 Jahren scheint daher nicht mehr angemessen. Gestützt wird diese Annahme durch die Wertermittlungsrichtlinie (WertR [2006]), welche für Mehrfamilienhäuser und gemischt genutzte Wohn- und Geschäftshäuser eine Gesamtnutzungsdauer von 60 bis 80 Jahren angibt.

^{vii} KfW-40 steht für einen Energiestandard, bei dem der Jahres-Primärenergiebedarf für Warmwasser und Heizung unter 40 kWh/m² liegt.

Der Vergleich der Lebensdauer von Baustoffen und Bauteilen aus Holz und Beton zeigt, dass Bauteile aus Holz ähnlich lange Lebensdauern wie solche aus Beton aufweisen. Dies belegen bspw. folgende Werte aus einem Forschungsbericht des Instituts für Bauforschung Hannover (IFB, [2004]).

Bauteil	Holz (hart)	Beton
Aussenwand	70 - 100	100 - 120
Innenwand	90 - 100	80 - 120
Deckenkonstruktion	90	100
Bodenbelag	60 - 90	70 - 100 ^{viii}
Treppen	90	70 - 100
Balkon	70	70
Flachdach	70	100
geneigtes Dach	90 - 100	65 ^{ix}

Tabelle 4: Lebensdauer Bauteile. Quelle: IFB (2004), eigene Darstellung

Aufgrund zahlreicher Verbesserungen und Weiterentwicklungen in den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Gesamtnutzdauer für Holzbauten deutlich erhöht. Die Gesamtnutzdauer bezeichnet den Zeitraum, in dem ein Gebäude bei normaler Instandhaltung wirtschaftlich nutzbar ist und den Ansprüchen der Nutzer gerecht wird. Dieser Wert kann deutlich von der technischen Lebensdauer der Baustoffe abweichen, welche bei Holz oft mehr als 300 Jahre betragen kann oder für unarmierten Beton fast unendlich ist. Baustoffe mit einer solch langen Lebensdauer werden vor allem für Fundamente, Wände, Decken, und Dächer verwendet. Veränderungen dieser Bauteile werden auch bei Nutzungsänderungen nur sehr selten vorgenommen. Andere Bauteile wie Bodenbeläge und Fliesen werden hingegen oft ersetzt, obwohl sie noch lange ihre Funktion erfüllen würden. Gründe sind hier veränderte Präferenzen der Nutzer oder auch ein Wandel in der Funktion der jeweiligen Räume. Auch die gestiegenen Anforderungen an Wärme- oder Schallschutz führen häufig zu einer Erneuerung prinzipiell noch funktionstüchtiger Bauteile (z.B. Heizungsanlage, Dämmung, Fenster) (Dahlhaus & Meisel [2008/09]).

Bei der Planung eines Bauprojekts sind langfristige daher Instandhaltungspläne wichtig, welche sich an der Lebenserwartung der Bauteile orientieren. Die Verwendung von Baustoffen bzw. Bauteilen mit hoher Qualität führt zum Zeitpunkt der Instandhaltung zu hohen Kosten. Allerdings wird die Häufigkeit der Instandhaltung reduziert, wodurch sich die Mehrkosten kompensieren lassen. Da jedes Bauteil eine spezifische Dauerhaftigkeit aufweist, sollten diese hinsichtlich ihrer Qualität wenn möglich so gewählt werden, dass die Grenzen der Lebenserwartungen auch bei mehrfacher Häufigkeit zusammenfallen (IFB [2004]).

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung von Gebäuden spielt neben den bereits angesprochenen Punkten auch die Wertentwicklung und Wiederverkaufswert eine Rolle. Eine Studie der DIA Consulting AG (2000) untersuchte die Entwicklung der Wiederverkaufswerte von Ein- und Zweifamilienhäusern in Abhängigkeit von der Bauweise. Dazu wurde eine Expertenbefragung durchgeführt, bei welcher 515 Immobilienvermittler, Immobilienbewerter, Bauträger, Bankangestellte, Architekten und Bauingenieure in Deutschland befragt wurden. Die Studie zielte nur auf Eigennutzer ab, Renditeobjekte wurden bewusst ausgeschlossen. 81% der Befragten gaben an, dass die Wertentwicklung bezogen auf die ursprünglichen Investitionskosten bei Häusern in Massivbauweise gegenüber Häusern in Leichtbauweise höher ist. Auch die Vermarktungschancen bei Massivbauweise werden von 91% der Befragten als besser eingestuft. Bezüglich der Vermarktungsdauer geben 78% an, dass diese bei der Massivbauweise kürzer ist. Eine höhere

^{viii} Betonwerkstein

^{ix} Leichtbeton

Vermarktungschance und eine kürzere Vermarktungsdauer wirken sich vorteilhaft aus, da dadurch Kosten eingespart werden können.

Die Untersuchung kommt ausserdem zum Schluss, dass beim Vergleich von gebrauchten Bestandesimmobilien mit identischen Ausstattungen Gebäude in Massivbauweise im Durchschnitt höhere Verkaufspreise erzielen. In ländlichen Gebieten der Bundesrepublik Deutschland macht die Preisdifferenz gegenüber der Leichtbauweise 9% und in Ballungsräumen 8.1% aus.

Es ist zu beachten, dass diese Resultate auf einer Studie beruhen, welche rund 10 Jahre alt ist. Aufgrund der Fortschritte im Leicht- und Holzbau ist anzunehmen, dass die Preisdifferenzen bei vergleichbaren Gebäuden heute geringer ausfallen dürften oder es sogar keine signifikanten Preisunterschiede mehr gibt.

3.3. Ergebnisse des Expertenworkshops

Als Grundlage der Expertendiskussion wurde vor dem workshop eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Dokumentenanalyse versandt, zusammen mit einem Fragebogen zur Bewertung der Bedeutung der Ergebnisse (siehe Anhang A).

Als zentrale Ergebnisse wurde zunächst eine Reihe von Merkmalen des Baustoffs Beton dargestellt, die in den analysierten Dokumenten als Vor- bzw. Nachteile im Nachhaltigen Bauen eingestuft werden. Diese Merkmale werden in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

a) Wirtschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit

	Vorteile	Nachteile
lokale Wirtschaftsförderung	regionale Betonproduktion da grosse Kies- und Sandvorkommen in der Schweiz und Transport kostenintensiv [S.44]	
kosteneffiziente Produktion	«economies of scale» aufgrund von Massenproduktion [S.45]	Kostenvorteile durch Vorfabrikation von Bauteilen nur selten genutzt, hohe Baufeuchte verursacht Mehrkosten [S.45]
Lebenszykluskosten	Baustoffwahl spielt bei Lebenszykluskosten untergeordnete Rolle. Bei Erstellungskosten keine Unterschiede zwischen Massiv- und Leichtbauweise feststellbar. [S.45 ff.]	
Werterhaltung	Lebensdauer von Bauteilen aus Beton nur unwesentlich grösser als bei Holzbauteilen [S.48]. Entscheidender als das Material ist die Abstimmung der Lebensdauer der Bauteile untereinander zwecks Verringerung von Instandhaltungskosten. Leichte Vorteile von Massivbauten bei Wiederverkaufspreis, Vermarktungsdauer und Vermarktungschance [S.48]	

Tabelle 5: Ergebnisse Dokumentenanalyse, Bereich «Wirtschaft»

b) Ökologische Dimension der Nachhaltigkeit

	Vorteile	Nachteile
Energieverbrauch	Geringer spezifischer Verbrauch (MJ/kg). [S.26] Möglichkeit einer Nutzung von Bauteilen als Wärmespeicher (z.B. durch thermische Bauteilaktivierung). [S.35]	Hohe spezifische Dichte (kg pro m3 umbauter Raum). [S.26]
Materialverbrauch	Rohstoffe in der Schweiz gut verfügbar (mit Ausnahme der Brennstoffe) [S.29] Es werden grosse Mengen an Sekundärroh- und -brennstoffen	Rohstoffe erneuern sich sehr langsam («nicht erneuerbar»). [S.29] Wiederverwertung nur als «down-cycling» möglich. [S.29]

	eingesetzt. [S.30]	
Umweltbelastungen	Kaum Verluste bei der Materialgewinnung, «versteckte Flüsse». [S.28] Relativ wenig Belastungen im Bereich Ökotoxizität, Überdüngung, Versauerung u.ä. während der Lebensdauer. In der Regel kaum bleibende, unerwünschte Eingriffe in Landschaft und Wasserhaushalt in der Schweiz. [S.30 ff]	Mineralische Baustoffe bestimmen 50% des Materialumsatzes der Schweiz. [S. 28] Erhebliche Emissionen an Kohlendioxid. [S. 31]
Nachhaltiges Design	Bauteile haben eine lange technische Lebensdauer. [S.33]	Bauteile haben ein erhebliches Gewicht. [S.33]

Tabelle 6: Ergebnisse Dokumentenanalyse, Bereich «Ökologie»

c) Gesellschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit

	Vorteile	Nachteile
Emissionen im Lebensweg	Es sind keine humantoxischen Emissionen während der Nutzung bekannt [S.36]	Hautkontakt mit nassem Zement kann Ekzeme und Allergien hervorrufen [S.36]
Schallschutz	gute Abschirmung gegen Luftschall [S.38]	schlechte Abschirmung gegen Trittschall [S.38]
Wärme	hohe Wärmespeicherfähigkeit gute Wärmedämmung [S.36]	hohe Wärmeleitfähigkeit [S.36]
Sorptionsverhalten		schlechte Wasserdampf-Absorptionsfähigkeit [S.37]
Dampfdiffusion		relativ hoher Diffusionswiderstandsfaktor (Beton ist „dampfdicht“) [S.37]
Baufeuchte / Austrocknungsdauer		hohe Baufeuchte bei Neubauten, lange Austrocknungsdauer [S.37]
Abschirmung von elektrischen und magnetischen Feldern	im Vergleich zu anderen Baustoffen keine besseren oder schlechteren Abschirmungseigenschaften [S.38 ff.]	
Gestaltung	hohe Varietät und Anwendungsbreite, Formbarkeit [S.40], Bauwerke mit hoher Nutzungsflexibilität realisierbar [S.41]	schlechtes Image in Bevölkerung, Erscheinungsbild von Beton = massig, schwer, nüchtern, dunkel, kalt [S.41]
Sicherheit	hoher Schutz vor Feuer, Hochwasser, Erdbeben, Explosionen, Einbruch [S.42]	

Tabelle 7: Ergebnisse Dokumentenanalyse, Bereich «Gesellschaft»

Diese Merkmale wurden von den Experten wie folgt gewichtet hinsichtlich einerseits ihrer Bedeutung und andererseits dem Vorhandensein von Verbesserungspotenzialen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Ergebnisse dieser Bewertung. Die einzelnen Ergebnisse werden im Anhang A dargestellt. Hier wird deutlich, dass dem Potenzial der Nutzung von Beton als Wärmespeicher eine grosse Bedeutung zugewiesen wird. Hinsichtlich des Vorhandenseins von Verbesserungspotenzialen in diesem Bereich gehen die Meinungen der Experten jedoch stark auseinander (siehe Anhang A). Als weitere bedeutende Vorteile werden die Lebensdauer, die Varietät/Formbarkeit und die Schutzwirkung angesehen. Allerdings sieht man hier kaum Verbesserungspotenziale. Grosse Verbesserungspotenziale sehen die Experten beim Einsatz von Sekundärrohstoffen und dem geringen spezifischen Energieverbrauch des Materials. Ihre Einschätzungen der Bedeutung dieser Vorteile sind jedoch eher mässig.

Als wesentlichen Nachteil sieht man die CO₂-Emissionen verbunden mit einem relativ grossen Verbesserungspotenzial. Die Erneuerungsrate der Rohstoffe wird als weiterer wichtiger Nachteil gesehen – an dem man aber nicht viel verändern kann.

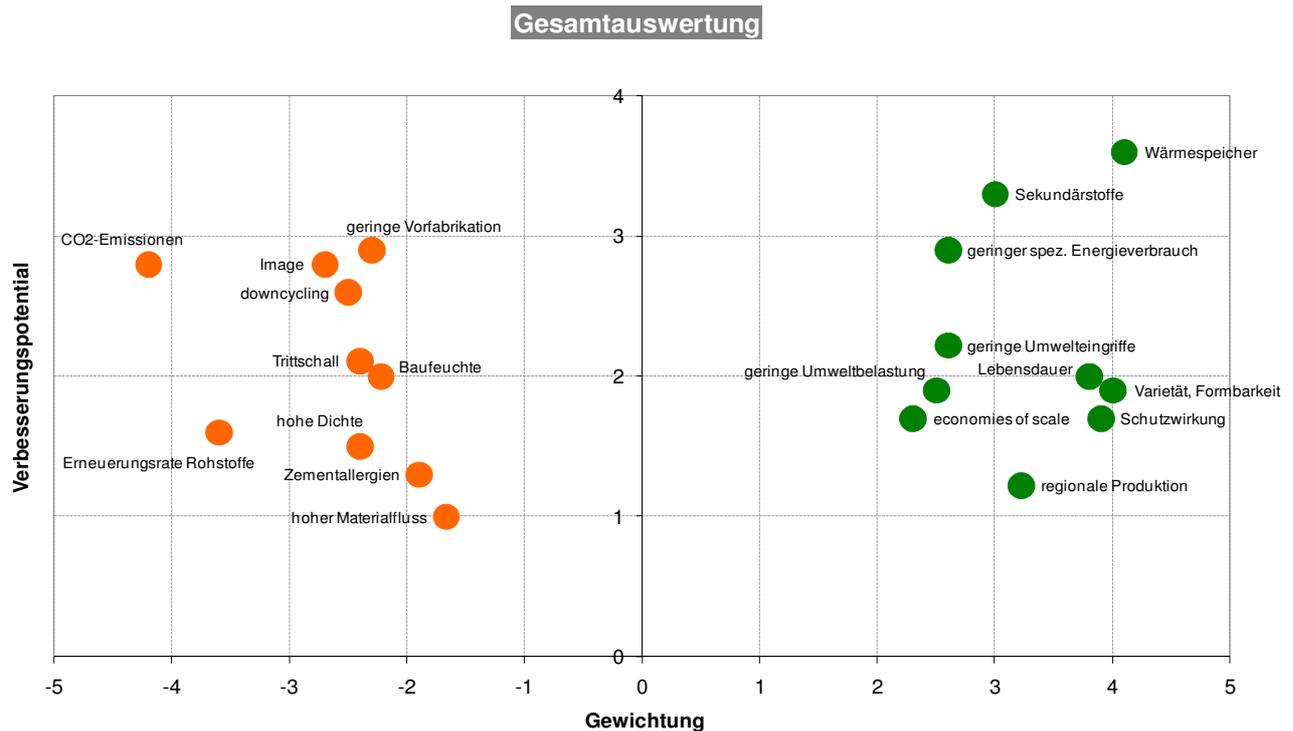


Abbildung 20: Ergebnisse der Auswertung der Befragung der Experten (eigene Darstellung)
 (Gewichtung: -5 = sehr grosser Nachteil; +5 = sehr grosser Vorteil; 0 = kein Nach- resp. Vorteil.
 Verbesserungspotential: 0 = keine Verbesserungsmöglichkeiten, 5 = sehr grosse Verbesserungsmöglichkeiten; Fachrichtungen der am Workshop befragten Experten: Beton-/Zementtechnologie, Architektur, Baubiologie, Energie/Umwelt)

In diesen Ergebnissen bestätigt sich der Eindruck aus der Dokumentenanalyse, dass das Thema «nachhaltiges Bauen mit Beton» bislang vor allem auf der Ebene der ökologischen Vor- und Nachteile des Baustoffs Beton behandelt wird. Auch in der Diskussion der Experten/innen zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen einem «nachhaltigen Baustoff» und einem «nachhaltigen Gebäuden» nicht klar ist. Von den anwesenden Architekten wurde der Wunsch geäussert «die Betonindustrie soll einen möglichst nachhaltigen Beton herstellen, dann machen wir daraus nachhaltige Gebäude», mit dem Hinweis die Baumaterialwahl sei durch andere Faktoren vorgegeben (Fundamente, Erdbebensicherheit, Brandschutz) und bestimme die Möglichkeiten eines nachhaltigen Designs nicht («man kann heute mit (fast) jedem Material eine bestimmte Gebäudeeigenschaft erreichen»).

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden wird die Relevanz der Baustoffe für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Dimension jedoch bislang nicht berücksichtigt. Dieser Aspekt zeigt sich in den Ergebnissen der Dokumentenanalyse, er wurde aber auch von den Experten/innen betont. Beton werde sehr breit eingesetzt und sein Einsatz sei verhältnismässig einfach, lautete das übereinstimmende Urteil. Dies führe dazu, dass die Möglichkeiten des Baustoffs nicht optimal ausgenutzt werden könnten – sowie planerisch, konstruktiv als auch gestalterisch. Uneinig war man sich hingegen über die Konsequenz aus dieser Erkenntnis. Während eine Reihe von Experten/innen die Meinung vertrat, man solle die Anwendung von Beton möglich einfach halten, damit man Fehler vermeiden könne, vertraten andere Experten/innen die Auffassung, das man die Möglichkeiten von technologischen Entwicklungen des Baustoffs möglichst vorantreiben und durch entsprechende Qualifizierungsmassnahmen ihre Verbreitung forcieren sollte.

Folgende Fragen zur weiteren Entwicklung des Baustoffs Beton werden in der Diskussion identifiziert:

- Wie können Bauteile/Bauwerke aus Beton ein nachhaltiges Design von Bauwerken unterstützen, beispielsweise durch Entwicklung geeigneter Architektursprachen und Instrumente/Strategien des Life-Cycle Management (inkl. Entwickeln von geeigneten Konzepten zur Nutzungsflexibilität- und –variabilität und Bewertungstools der Nachhaltigkeit von Beton in Abhängigkeit von seiner Verwendung)?
- Können Bauteile/Bauwerke aus Beton leichter werden, ohne dass ihre Vorteile in Bezug auf die Lebensdauer von Gebäuden verloren gehen und ein möglicher positiver Effekt auf die Umwelt durch die Notwendigkeit eines höheren Einsatzes von Zement oder Zusatzmitteln einerseits und Armierungseisen andererseits ausgeglichen wird?
- Wie können Bauteile/Bauwerke aus Beton in der Zukunft besser als Wärmespeicher genutzt werden, ohne dass Ihre Vorteile in Bezug auf die Lebensdauer von Gebäuden und dem Rückbau verloren gehen (Trennung des Gebäudes in Strukturen gemäss SIA Effizienzpfad) und so dass ein möglichst positiver Effekt für das Raumklima resultiert?
- Welche Erkenntnisse liefert ein besseres Verständnis und Wissen über die Verwendung von Beton im heutigen Gebäudebestand für einen nachhaltigen Umbau des existierenden Gebäudebestands und was kann man daraus für den Neubau lernen?
- Wie kann man die Emissionen von Kohlendioxid im Lebensweg von Betonbauteilen weiter senken, durch beispielsweise Verlängerung der Nutzungsdauer von Betonbauteilen (inkl. Bauteilrecycling), Optimierung der Betonzusammensetzung in Hinblick auf den Klinkerverbrauch und vermehrter Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Zementwerken?
- Wie kann man den Verbrauch von mineralischen Rohstoffen senken, beispielsweise durch Optimierung des Einsatzes von Misch- und Betonabbruch und Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen/Bauwerken aus Beton?
- Welche Erkenntnisse über die Wirkungen von Beton auf das Raumklima und das Wohlbefinden der Nutzer von Gebäuden werden bei der Diskussion der Nachhaltigkeit bislang zu wenig berücksichtigt?

4. Nachhaltigkeit von Gebäuden aus Beton – Ergebnisse aus Arbeitspaket 2

4.1. Einleitung: Rolle der Baustoffe bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden

Die Ergebnisse des ersten Arbeitspakets zeigen, dass der Zusammenhang zwischen einem «nachhaltigen Baustoff» und einem «nachhaltigen Gebäuden» nicht klar ist. Ein «nachhaltiger Baustoff» muss vor allem die natürliche Umwelt und die menschliche Gesundheit schonen. Ein «nachhaltiges Gebäude» muss den Anforderungen der Nutzung und des Umfelds (Städtebau bzw. der Quartiersentwicklung) entsprechen und eine möglichst lange Nutzungsdauer gewährleisten – unter der Nebenbedingung der Ressourceneffizienz im Lebensweg des Gebäudes (Schwerpunkt: Energie und Kosten). Die Baumaterialwahl ist dabei von untergeordneter Bedeutung. Einerseits wird sie durch andere Faktoren vorgegeben (Fundamente, Erdbebensicherheit, Brandschutz). Andererseits wird vielfach die Auffassung vertreten, sie bestimme die Möglichkeiten eines nachhaltigen Designs nicht («man kann heute mit (fast) jedem Material eine bestimmte Gebäudeeigenschaft erreichen»).

Diese Ergebnisse reflektieren die grosse Vielfalt einer möglichen Anwendung von Beton als Baustoff in Gebäuden. Seine Anwendung kann das Erscheinungsbild eines Gebäudes prägen – z.B. als Sichtbeton – oder quasi unsichtbar sein – z.B. im Tragwerk mit einer Fassade aus anderen Baustoffen. Seine Anwendung kann die Nutzungsflexibilität einschränken bzw. Umbauten verteuern – z.B. durch Stützen oder tragende Wände, zu klein dimensionierte Leitungsschächte u.ä. Aber diese Einschränkungen sind nicht unabdingbar. Ähnliche Überlegungen gelten – wie im letzten Kapitel ausführlich beschrieben - für das Raumklima, den Lärm oder die Baukosten. Damit wird es fast unmöglich, klare Aussagen zu den Vorzügen des nachhaltigen Bauens mit Beton zu machen.

Um dieses Problem zu überwinden, orientiert sich die Analyse im vorliegenden Kapitel an drei konkreten Bauwerken, die als Fallbeispiele betrachtet werden. Dazu werden drei Gebäude ausgewählt, in denen unterschiedliche Baustoffe in der Tragwerkkonstruktion eingesetzt werden: Stahlbeton, Stahl und Holz. Gleichzeitig ist in allen drei Fallbeispielen ein klarer Zusammenhang zwischen Baustoffwahl und Gestaltung von Aussen- und Innenräumen gegeben. Die Nutzung der drei Gebäude ist ähnlich: es handelt sich um Hochschulgebäude, die als Seminarräume, Aufenthaltsräume und Büroräumlichkeiten genutzt werden. Durch Wahl dieser Fallbeispiele soll untersucht werden, ob sich am Beispiel konkreter Bauwerke ein klarer Zusammenhang zwischen ökologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Kriterien der nachhaltigen Entwicklung und der Baustoffwahl aufzeigen lässt. Diese Zusammenhänge beziehen sich im Ergebnis der Analysen ausschliesslich auf das jeweilige Fallbeispiel. Sie geben jedoch Hinweise auf Möglichkeiten zur Verallgemeinerung der gewonnenen Erkenntnisse und können die Grundlage für Hypothesen für weitere Untersuchungen liefern.

4.1.1. Ziel der vorliegenden Untersuchung

Ziel des vorliegenden Projektes ist gemäss Ausschreibung der cemsuisse «... einerseits die Ermittlung der Stärken und Schwächen von Beton als Bauprodukt und andererseits bei dessen Verwendung im Gebäude unter Berücksichtigung des gesamten Prozesses von der Herstellung bis zu Rückbau und Wiederverwertung.» Um dieses Ziel zu erreichen soll die folgende Frage beantwortet werden:

Wie wirken sich die in Arbeitspaket 1 identifizierten Eigenschaften von Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau aus? (siehe Abschnitt 2.2, Punkt d)

4.1.2. Vorgehen

Das Projekt hat grundsätzlich einen explorativen Charakter. Zu Beginn der Untersuchung ist nicht klar, ob es einen Zusammenhang zwischen der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und der Materialwahl der Tragwerkkonstruktion gibt und worin dieser Zusammenhang besteht. In einem ersten Schritt werden daher zunächst auf der Grundlage der Erkenntnisse aus dem ersten Arbeitspaket Hypothesen über mögliche Zusammenhänge formuliert. Diese Hypothesen lenken die Aufmerksamkeit bei der Analyse der Fallbeispiele

und bieten einen Bezugsrahmen für die Interpretation der Ergebnisse. Die Analyse der Fallbeispiele ist als Methode jedoch grundsätzlich nicht geeignet, die Hypothesen zu bestätigen oder zu verwerfen, da hier nur ausgewählte Beispiele analysiert werden. Sie gibt jedoch Hinweise für eine Präzisierung der Hypothesen als Grundlage für weitere Untersuchungen.

a) Formulierung der grundlegenden Hypothesen

Ausgangspunkt für das Formulieren der Hypothesen sind Kriterien der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Diese Kriterien werden aus der SIA Empfehlung 112/1 zur Ergänzung des Leistungsverzeichnisses SIA 112 um Planungsleistung mit Bezug auf ein nachhaltiges Bauen abgeleitet. In dieser Empfehlung werden Kriterien für ein nachhaltiges Bauen festgelegt und die korrespondierenden Ziele beschrieben. Diese Ziele geben Anhaltspunkte für eine Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. Die Liste der verwendeten Kriterien ist in Anhang B, Tabelle 1 dargestellt.^x

Diese Tabelle zeigt ausserdem erste Annahmen über die Bedeutung der Baustoffwahl der Tragwerkkonstruktion für die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Gebäude, unterschieden nach der Wahrnehmung von Innen- bzw. Aussenräumen, der Gestaltung/des Entwurf des Gebäudes (Raumkonzept, Erschliessung etc.) und der Wahl des Standorts. Es wird unterschieden zwischen Kriterien, für die in den hier betrachteten Fallbeispielen ein Zusammenhang zwischen der Baustoffwahl der Tragwerkkonstruktion und der Beurteilung in diesem Kriterium besteht, sowie Kriterien, bei denen kein Einfluss von der Materialwahl des Tragwerks zu erwarten ist.

Aus dieser ersten Triage von Kriterien und Gebäudemerkmalen leiten wir folgende Hypothesen ab:

Hypothese 1

Bei den hier untersuchten Fallbeispielen beeinflusst die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion ...

- (i) ... die Wahrnehmung von Aussen- und Innenraum und bestimmt damit die Bewertung in den Themen «Gemeinschaft» und «Gestaltung» mit.
- (ii) ... die Gestaltung des Rohbaus und damit die Bewertung im Themengebiet «Gesundheit und Wohlbefinden», die Sicherheit, den sommerlichen Wärmeschutz und Lärm/Erschütterungen mit.
- (iii) ... die Gestaltung des Rohbaus und damit die Bewertung in den Themengebieten «Gebäudesubstanz», «Anlagekosten» und «Betriebs- und Unterhaltskosten» mit – mit Ausnahme der durch den Standort bedingten Kosten.
- (iv) ... die Gestaltung des Rohbaus und damit die Bewertung in den Themengebieten «Baustoffe» und «Betriebsenergie» – im Thema «Betriebsenergie» begrenzt auf die Raumwärme.

Für beobachtete Unterschiede in den Bewertungen der Fallbeispiele in diesen Themen wird aufgezeigt, inwiefern diese Unterschiede auf die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion zurückzuführen sind.

^x Zur Vereinfachung der Untersuchung werden folgende Kriterien vernachlässigt, da sie in der hier vorgestellten Untersuchung nicht relevant und/oder schwierig zu erfassen sind. Als nicht relevant wurden die Kriterien «Solidarität, Gerechtigkeit» (1.1.3), «Partizipation» (1.1.4) und «Finanzierung» (2.2.2) betrachtet, da sich alle drei Gebäude im Besitz der öffentlichen Hand befinden und als Hochschulen genutzt werden. «Strahlung» (1.4.4), «Externe Kosten» (2.2.3) und «Freianlagen» (3.3.2) werden vernachlässigt, weil die dazu notwendigen Informationen aufwendig zu erfassen sind und wir keine wesentlich Erkenntnisse von diesen Betrachtungen erwarten.

Hypothese 2

Für alle anderen Kriterien ist die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion von untergeordneter Bedeutung. Dies betrifft insbesondere die Themen der «Nutzung/Erschliessung», «Boden/Landschaft» und «Infrastruktur».

In der hier beschriebenen Untersuchung werden diese Themen mit berücksichtigt, um die Relevanz dieser Themen im Vergleich zwischen den Fallbeispielen aufzuzeigen.

b) Auswahl der Fallbeispiele

Als Fallbeispiele werden drei Gebäude ausgewählt, in denen unterschiedliche Baustoffe in der Tragwerkkonstruktion eingesetzt werden: Stahlbeton, Stahl und Holz. Gleichzeitig ist in allen drei Fallbeispielen ein klarer Zusammenhang zwischen Baustoffwahl und Gestaltung von Aussen- und Innenräumen gegeben. Die Nutzung der drei Gebäude ist ähnlich: es handelt sich um Hochschulgebäude, die als Seminarräume, Aufenthaltsräume und Büroräumlichkeiten genutzt werden.

Die Auswahl der Gebäude basiert auf folgenden Überlegungen:

- Die Gebäude sind hinsichtlich ihrer Nutzung ungefähr vergleichbar.
- In diesen drei Gebäuden sind die Baumaterialien prägende Elemente der Gestaltung.
- Der Zugang zu den Nutzern und die Betreibern der Gebäude ist relativ leicht möglich (z.B. für Interviews).

Die drei Gebäude werden in Abschnitt 4.2 kurz beschrieben.

c) Datenerfassung und Bewertung

Die drei Gebäude werden jeweils nach den Kriterien zur Beurteilung der Nachhaltigkeit bewertet, die aus der SIA Empfehlung 112/1 abgeleitet werden. Für jedes dieser Kriterien werden Beurteilungskriterien festgelegt, nach denen beurteilt wird, wie gut das betrachtete Gebäude das Kriterium nach SIA erfüllt. Diese Beurteilungskriterien werden in Anhang B ausführlich beschrieben. Für die Beurteilung wurde jedes Gebäude besichtigt und Interviews mit den Gebäudeverantwortlichen durchgeführt. Der Interviewleitfaden wird in Anhang B dargestellt. Ausserdem wurden die zur Verfügung stehenden Dokumente ausgewertet, insbesondere Pläne des Gebäudes sowie Daten über Betriebskosten und Energieverbrauchsmengen. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die verwendeten Quellen. In Anhang B wird beschrieben wie diese Datenquellen als Grundlagen der Bewertung eingesetzt werden.

Zur Bewertung der Gebäude wird das Instrument der Nutzwertanalyse eingesetzt. Die Zielerreichungsgrade für die verschiedenen Kriterien werden durch Vergabe von Punkten zwischen 0 und 3 bestimmt. Die Vergabe der Punkte entspricht einer qualitativen Beurteilung, die sich auf die Einschätzung der Interviewpartner bzw. eine eigene Beurteilung durch das Projektteam aufgrund von Begehungen und Auswertungen der vorliegenden Dokument stützt (siehe Anhang B).

Die Zielgewichte werden so gewählt, dass jedes Kriterium innerhalb einer Dimension der Nachhaltigkeit – Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt – das gleiche Gewicht erhält. Damit wird für jede Dimension ein Index zur Bewertung berechnet. Der Vergleich zwischen den drei Fallbeispielen erfolgt auf der Grundlage dieser drei Indizes. Auf die Aggregation der Indizes zu einem Gesamtindex hingegen wird verzichtet.

Fallbeispiel	Begehungen	Interviews	Verwendete Dokumente
Rapperswil	Begehung nicht notwendig, da die Projektbearbeiter in diesem Gebäude arbeiten	A. Rota / U. Stüssi im November 2009 mit St. Hungerbühler (Abteilungsleiter Gebäudemanagement)	Planunterlagen Energiekennzahlen 2007 Informationspapier
Biel	A. Rota / S. Lier im Juni 2009 geführt durch Th. Studer (Stv. Leiter Logistik)	U. Stüssi im Dezember 2009 mit Th. Studer (Stv. Leiter Logistik)	Planunterlagen Energiekennzahlen 2008/2009 Gebäudeinfos Auskunft Amt für Grundstücke und Gebäude des Kantons Bern
St. Gallen	A. Rota / U. Stüssi im Oktober 2009 geführt durch R. Wirth (Architekt, rlc Architekten)	A. Rota / U. Stüssi im November 2009 mit T. Scheiwiler (Leiter Facility Management)	Planunterlagen Energiekennzahlen 2007 Massnahmenkatalog Umweltschutz 1992-1994

Tabelle 8: Quellen zur Beschreibung der drei Fallbeispiele

4.2. Beschreibung der Fallbeispiele

4.2.1. Stahlkonstruktion: Hochschule Rapperswil

Das Schulgebäude 1 der Hochschule für Technik in Rapperswil wurde mit der Gründung des *Interkantonalen Technikums Rapperswil* zu Beginn der 70er Jahre erstellt. Die Leichtbauweise aus Stahl wurde gewählt, da wegen des an das Grundstück angrenzenden Zürichsees sehr schlechte Baugrundverhältnisse herrschen und aus Kostengründen die Plattenfundationen mit möglichst wenig Gewicht belastet werden sollten. Die Fassaden bestehen aus einer Stahlkonstruktion und weisen relativ viel Fensterfläche auf. Die sehr offene Bauweise im Innern erlaubt eine flexible Raumaufteilung: Die Eingangsbereiche auf zwei Seiten des Gebäudes sind umsäumt mit Galerien, wo sich hauptsächlich Büros der Institute oder der Dozenten befinden.



Abbildung 21: Fassadenansicht und Eingangsbereich Schulgebäude 1 an der Hochschule für Technik Rapperswil

Beim Schulgebäude 1 in Rapperswil wurde auf die Masse bezogen etwa gleichviel Stahl wie Beton verbaut. Auch die Decken wurden im Stahl-Beton-Verbundbau erstellt. Diese Bauweise bildet den Baustoff Stahl sehr gut ab und gibt aufgrund desselben Nutzungszwecks wie die Gebäude in Biel und St. Gallen ein gut vergleichbares Studienobjekt ab.

4.2.2. Holzkonstruktion: Schweizerische Hochschule für Holzwirtschaft Biel

Im Jahre 1952 wurde mit der Gründung der damaligen Holzfachschule ein Kompetenz- und Ausbildungszentrum für Holzfachleute in der Schweiz geschaffen. Über die kommenden 40 Jahre wurden an diesem Standort Bauingenieur mit Fachgebiet Holzbau ausgebildet. Zu Beginn der 90er Jahre stiess die Holzfachschule jedoch an ihre Kapazitätsgrenze. Zur Schaffung von über 300 zusätzlichen Studienplätzen wurde im Jahre 1990 ein Wettbewerb für ein Realisierungsprojekt eröffnet. Unter Federführung der Meili/Peter Architekten AG wurde dann schliesslich während den Jahren 1997 und 1999 gebaut. Entstanden ist dabei mit dem Gebäude A ein 4-geschossiger Bau welcher hauptsächlich aus den Materialien Holz und Beton besteht. Lediglich ein längsorientierter Kern besteht aus Beton; von dem gesamten umbauten Volumen von knapp 34'000 m³ verteilen sich etwa ¾ auf Holz.



Abbildung 22: Fassadenansichten der Hochschule für Holzwirtschaft in Biel.

Da auch für einen Grossteil der Geschossdecken konstruktive Lösungen mit dem Baustoff Holz gefunden wurden, eignet sich das Objekt hervorragend als Beispielobjekt für ebendiesen Baustoff zur Beurteilung der Nachhaltigkeit.

Die Raumaufteilung im Innern ist sehr kompakt. Vom Erdgeschoss bis ins 2. Obergeschoss zeigt sich jeweils etwa dieselbe Raumaufteilungsstruktur. Nur im Attikageschoss zeigen sich etwas grosszügigere Raumdimensionen. Generell lässt sich sagen, dass in Biel ein überdurchschnittlich grosser Anteil aller Geschossflächen Nutzflächen sind.

4.2.3. Betonkonstruktion: Universität St. Gallen

Das Hauptgebäude wurden im Zuge mit dem Neubau der Universität am Standort Rosenberg Anfangs der 60er Jahre errichtet. Bereits wenige Jahre nach der Fertigstellung machten sich erste Zeichen eines Platzproblems bemerkbar. Diese Problematik endete in einer erheblichen Überbelegung zu Beginn des neuen Jahrtausends. So wurde dann schliesslich 2004 beschlossen, mit Umbau- und Erweiterungsmassnahmen die Gebäude der aktuellen Nachfrage und den zeitgemässen Bedürfnissen anzupassen. In der 2. der insgesamt 3 Bauetappen wurde nun auch die Sanierung des Hauptgebäudes in Angriff genommen. Beim Hauptgebäude handelt es sich um einen Sichtbetonbau, an welchem nun im Rahmen der Sanierungsmassnahmen einerseits eine Verstärkung der Tragstrukturen, andererseits aber auch eine Anpassung auf aktuelle Nutzungsstandards vorgenommen wurde. Ein Hauptaugenmerk galt dabei der Erbringung des Tragsicherheitsnachweises betreffend Erdbebensicherheit gemäss aktueller Betonbaunorm SIA 262:2003.



Abbildung 23: Verstärkende Massnahmen betreffend Erdbbensicherheit (links) und sichtlich guter Zustand der Original-Treppe (rechts)

Da es sich beim Hauptgebäude der Universität St. Gallen um einen Sichtbetonbau handelt, bildet dieser den Baustoff Beton gut ab und gibt, auch aufgrund desselben Nutzungszwecks wie das Schulgebäude in Biel ein wirklich vergleichbares Studienobjekt ab.

Durch die Gestaltung mit der Ecktreppe im Zentrum des Gebäudes ergibt sich relativ viel lichte Fläche und insgesamt eine weniger kompakte Raumaufteilung als z.B. diejenige in Biel.

4.3. Ergebnisse

4.3.1. Stahlkonstruktion: Hochschule Rapperswil

Das Schulgebäude 1 der Hochschule Rapperswil zeichnet sich aus durch eine gute Bewertung im Bereich «Wirtschaft». Dieses Gebäude verfügt über die besten Nutzungsreserven sowohl am Standort als auch innerhalb des Gebäudes selbst. Dies wird durch die gewählte Stahlkonstruktion begünstigt. Die Baukosten sind vergleichsweise tief und die Betriebs- und Instandhaltungskosten eher durchschnittlich. Es gibt jedoch zwei Nachteile, die für Gebäude dieses Alters nicht ungewöhnlich sind: überdurchschnittlich hohe Betriebsenergiekosten und unerwartete Instandsetzungskosten infolge der Entfernung schädlicher Baustoffe (Asbest und PCB).

Im Bereich «Gesellschaft» schneidet das Gebäude gut ab in allen Kriterien mit Bezug zu Städtebau und Quartiersentwicklung. Die Gebäudestruktur des Schulgebäude 1 bietet hohen Wiedererkennungswert, was auch auf die Stahlkonstruktion zurückgeführt werden kann. Für die Nutzer wird das Raumkonzept grundsätzlich positiv beurteilt – mit Ausnahme einer mangelhaften Erschliessung durch Fahrstühle. Schwachstellen sind das Raumklima und die Versorgung mit Tageslicht.

Im Bereich «Umwelt» schneidet das Gebäude schlecht ab. Die Konstruktion aus Stahl enthält viel graue Energie. Ebenso ist der Energiebedarf durch die unvorteilhafte Wahl der Fassade (Glasfassade) sehr hoch. Auch ist das Verhältnis von Nutz- zu Verkehrsflächen nicht optimal. Durch die Nähe zum Bahnhof gelingt es aber, den Anteil der Nutzer zu steigern, die mit öffentlichen Verkehrsmitteln anreisen. Hier ist das Gebäude deutlich besser als die beiden anderen Fallbeispiele.

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die Beurteilung der verschiedenen Kriterien im Einzelnen sowie eine kurze Begründung der Bewertung für jedes Kriterium.

Gesellschaft	Integration, Durchmischung	Der Campus und das Schulgebäude insbesondere sind gut in die Umgebung eingegliedert und tangieren die Entwicklung im umliegenden Quartier kaum.	2.5
	soziale Kontakte	Durch die grosse Verkehrsfläche ist eine gute Grundlage für Begegnungsorte und den Aufbau eines sozialen Netzes geschaffen.	3.0
	Solidarität, Gerechtigkeit	Durch die Liftstandorte an peripheren Gebäudeteilen kann die Mobilität von benachteiligten Nutzergruppen eingeschränkt sein.	2.0
	räumliche Identität, Wiedererkennung	Durch den Baustoff und dessen Durchdringen bis in die Aussenhülle wird ein hoher Wiedererkennungswert geschaffen.	3.0
	individuelle Gestaltung, Personalisierung	Die Wahl des Baustoffes gibt es relativ viel frei gestaltbare Flächen und Volumen. Die Nutzergruppen können jedoch nicht beliebig in die Mitgestaltung miteinbezogen werden.	2.0
	Grundversorgung, Nutzungsmischung	Die Infrastruktur wurde über die Lebensdauer auf aktuellstem Stand der Technik gehalten. Die infrastrukturelle Umgebung erscheint allerdings nicht zeitlos.	2.5
	Langsamverkehr, öffentlicher Verkehr	Die Erschliessung mit direktem Anschluss an den Bahnhof ist optimal.	3.0
	Zugänglichkeit und Nutzbarkeit für alle	Durch die längliche Bauweise und für gewisse Anliegen nötige Niveauwechsel sind nicht für alle Benutzergruppen gleich gut meisterbar.	1.5
	Sicherheit	Das subjektive Sicherheitsempfinden wird im Allgemeinen als gut eingeschätzt. Durch die Bauweise mit relativ viel einsehbarer Fensterfläche entsteht jedoch ein Gefühl der Exponiertheit.	2.0
	Licht	Die Nutzflächen werden sehr gut mit Tageslicht versorgt, die Verkehrsflächen im 2. OG jedoch eher nicht.	1.5
	Raumluft	In der Vergangenheit gab es schon Beschwerden betreffend der Qualität der Raumluft.	0.5
	Wirtschaft	sommerlicher Wärmeschutz	Durch die vielen Fensterflächen gibt es ein grosses Problem mit dem sommerlichen Wärmeschutz.
Lärm, Erschütterungen		Bisher gab es keine Beanstandungen betreffend Lärm- oder Erschütterungsentwicklung.	2.5
Standort		Die Landreserven, das Image im benachbarten Umfeld, die Anbindung an ÖV und die regionale Wirtschaft werden als sehr gut bzw. gross eingeschätzt.	3.0
Bausubstanz		Die Substanz des Baustoffes wurde im Zuge vom Umbaumaassnahmen erst kürzlich beurteilt und als gut eingestuft.	3.0
Gebäudestruktur, Ausbau		Die Wahl des Baustoffes Stahl im Rohbau in der Innenraumgestaltung hat sich als sehr flexibel anpassbar und ausbaufähig erwiesen.	3.0
Lebenszykluskosten		Im bisherigen Lebenszyklus sind zum Teil unvorhersehbare Kostenpunkte entstanden.	2.0
Betrieb und Instandhaltung		Die Betriebs- und Instandhaltungskosten bewegen sich im allgemeinen in einem finanziell vertretbaren Rahmen.	2.0
Instandsetzung	Im Zuge von Instandsetzungsmassnahmen musste Eternit bzw. Asbest sachgerecht entsorgt werden. Dadurch ist ein unvorhersehbarer Kostenpunkt entstanden.	1.0	

Tabelle 9: Beurteilung des Fallbeispiels Rapperswil in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)

Umwelt	Rohstoffe: Verfügbarkeit	Baustahl wird in aufwendigen Verfahren gewonnen und beinhaltet dementsprechend viel graue Energie.	0.0
	Umweltbelastung	Neben der hohen grauen Energie hat das Schulgebäude einen hohen Energiebedarf.	0.0
	Schadstoffe	Neben Asbest auch PCB.	0.0
	Rückbau	Das Trennen und Wiederverwerten von Stahlbaustoff ist gängige Praxis.	2.5
	Wärme / Elektrizität	In der Vergangenheit wurden grosse Anstrengungen mit dem Ziel eines geringeren Energiebedarfs unternommen. Eine weitere energetische Optimierung durch bauliche oder haustechnische Massnahmen ist heute kaum mehr möglich.	2.0
	Deckung Energiebedarf	Es werden in keiner Form erneuerbare Energiequellen genutzt.	0.0
	Grundstückfläche	Durch den grossen Anteil Verkehrsfläche ist die Landinanspruchnahme des Gebäudes nicht optimal.	1.0
	Mobilität	Durch die ausgezeichnete Lage direkt neben dem Bahnhof ist die Quote der ÖV-Nutzer sehr hoch. Ausserdem werden den Studenten keine Parkplätze zur Verfügung gestellt.	3.0
	Abfälle aus Betrieb und Nutzung	Es gibt Sammlungen für Abfallfraktionen. Ein spezielles Entsorgungskonzept besteht aber nicht.	2.5
	Wasser	Der Trinkwasserverbrauch ist durchschnittlich und es wurden einzelne Massnahmen zu dessen Reduktion ergriffen.	2.0

Tabelle 10: Beurteilung des Fallbeispiels Rapperswil in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)

4.3.2. Holzkonstruktion: Schweizerische Hochschule für Holzwirtschaft Biel

Das Gebäude A der Schweizerischen Hochschule für Holzwirtschaft Biel zeichnet sich besonders positiv im Bereich «Umwelt» aus. Das Gebäude wurde Ende der 90er Jahre nach damals aktuellem Stand der Technik gebaut und weist entsprechend gut Werte im Betriebsenergieverbrauch aus. Gleichzeitig wird ein nachwachsender Baustoff aus der Schweiz verwendet. Negativ wirken sich lediglich die schlechte Verkehrsanbindung und der dadurch bedingte relativ hohe Anteil an Individualverkehr bei den Arbeitswegen aus.

Im Bereich «Gesellschaft» schneidet das Gebäude durchschnittlich ab. Durch sein äusseres Erscheinungsbild gliedert sich das Gebäude problemlos ins umliegende Quartier ein. Für die Nutzer bietet es eine hervorragende Identifikationsmöglichkeit und der Wiedererkennungswert ist in Verbindung mit der aktuellen Nutzung hoch. Hier ist die Materialwahl für das Tragwerk bzw. die Fassade massgeblich. Die Erschliessung des Standorts mit öffentlichem Verkehr ist jedoch eher schlecht. Für den Nutzer ist das Gebäude nicht optimal wegen der teilweise hohen Raumtemperatur im Sommer und den eher schlauchförmigen Verkehrsflächen, die als Begegnungsräume weniger geeignet sind.

Im Bereich «Wirtschaft» schneidet das Gebäude ebenfalls durchschnittlich ab. Dies ist vor allem auf die mangelnden Erweiterungsmöglichkeiten am Standort und die eingeschränkte Nutzungsflexibilität des Gebäudes zurückzuführen. Letzteres hängt mit der Holzkonstruktion zusammen. Da es sich um ein sehr junges Gebäude handelt, sind die Möglichkeiten zur Beurteilung der Nutzungs- und Betriebskosten sowie der Bausubstanz eingeschränkt.

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die Beurteilung der verschiedenen Kriterien im Einzelnen sowie eine kurze Begründung der Bewertung für jedes Kriterium.

Gesellschaft	Integration, Durchmischung	Das Gebäude steht weder im Kontrast zu umliegenden Quartier, noch trägt es wesentlich etwas zur Quartiergestaltung bei.	2.0
	soziale Kontakte	In Biel gibt es viel Begegnungsflächen, jedoch sind diese eher längsförmig ausgerichtet und laden nur begrenzt zum Verweilen ein.	2.0
	Solidarität, Gerechtigkeit	Die Mobilität und die infrastrukturellen Voraussetzungen in Biel sind relativ gut. Einzig die schlauchartige Gestaltung des Gangs mit nur einem Lift gibt hier einen Abzug.	2.0
	räumliche Identität, Wiedererkennung	Die Nutzer (Holzbaufachleute) sind optimal für ein Gebäude dieser Art.	3.0
	individuelle Gestaltung, Personalisierung	Durch den Baustoff ist die individuelle Gestaltung bereits ein grosses Stück weit gegeben und trifft sicher auch die Ansprüche der Nutzer.	2.5
	Grundversorgung, Nutzungsmischung	Das Gebäude ist erst rund 10 Jahre alt und entspricht bis auf kleine Mängel betreffend der Lüftung dem aktuellen Stand der Technik.	2.5
	Langsamverkehr, öffentlicher Verkehr	Das Schulgelände in Biel liegt ausserhalb dem Zentrum und ist zu Fuss vom Bahnhof kaum erreichbar.	1.0
	Zugänglichkeit und Nutzbarkeit für alle	Die Nutzung und die Infrastruktur kann grundsätzlich auch durch Benachteiligte uneingeschränkt erfolgen. Jedoch ist die Zugänglichkeit durch die schlauchartige Gestaltung eingeschränkt.	1.5
	Sicherheit	Ein Gebäude aus Holz bietet einem nicht dasselbe subjektive Sicherheitsempfinden wie beispielsweise ein Gebäude aus Beton.	2.0
	Licht	Die Hauptnutzfläche ist ausreichend mit Tageslicht versorgt. Die Verkehrsflächen hingegen eher weniger.	2.0
	Raumluft	Es bestehen Probleme mit der Lüftung im Auditorium.	1.5
	sommerlicher Wärmeschutz	Das Attikageschoss ist im Sommer nur schwer kühl zu halten.	1.0
	Lärm, Erschütterungen	In der Vergangenheit gab es keine Beschwerden betreffend Lärm oder Erschütterungen.	3.0
Wirtschaft	Standort	Das Image ist gut und die Anbindung an die regionale Wirtschaft ist gegeben. Der Standort an sich und die langfristigen Chancen diesbezüglich werden jedoch als bedingt eingeschätzt.	2.0
	Bausubstanz	Der Baustoff Holz kann praktisch autonom altern. Einzige Einschränkung bildet dabei das optische Wirken der Fassade.	2.5
	Gebäudestruktur, Ausbau	Die Gebäudestruktur ist durch den Kern und die ringsum orientierten Nutzflächen gegeben und wird als wenig flexibel erachtet.	1.0
	Lebenszykluskosten	Im bis anhin kurzen Lebensabschnitt des Gebäudes sind keine unerwarteten Kosten aufgetaucht.	3.0
	Betrieb und Instandhaltung	Hier erfolgte keine Bewertung, da dafür das Gebäude noch zu jung ist um eine Aussage machen zu können.	-
	Instandsetzung	Hier sind die Kosten für die nachgerüstete Lüftung in die Bewertung eingeflossen.	1.5

Tabelle 11: Beurteilung des Fallbeispiels Biel in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)

Umwelt	Rohstoffe: Verfügbarkeit	Holz wird als nachwachsender Rohstoff erachtet und kann auch nach der Lebensdauer im Gebäude nach Bedarf) wiederverwertet werden (z.B. energetisch.	2.5
	Umweltbelastung	Im Gebäude selbst steckt relativ wenig graue Energie, die Betriebsenergie ist vergleichbar mit derjenigen von Gebäuden aus anderen Baustoffen.	3.0
	Schadstoffe	Da das Gebäude erst vor kurzem erstellt wurde ist kaum mit dem Einsatz von umwelt- oder gesundheitsschädlichen Stoffen zu rechnen.	3.0
	Rückbau	Der Baustoff Holz lässt sich mit geringem Aufwand beim Rückbau energetisch wiederverwerten. Eine solche Wiederverwertung ist aber mit Umweltbelastungen behaftet und kann nur einmal stattfinden.	1.5
	Wärme / Elektrizität	Die baulichen und haustechnischen Anlagen für einen optimierten Energieverbrauch sind auf den neuesten Stand der Technik. Ebenso wird zum Beispiel Abwärme genutzt. Einzelne Anlagen haben noch Verbesserungspotenzial bei der gegenseitigen Abstimmung.	3
	Deckung Energiebedarf	Nur die Nutzung von Abwärme und die Pellet-Heizung kann als erneuerbare Energiequelle angerechnet werden.	1.0
	Grundstückfläche	Das Gebäude bietet relativ viel Nutzfläche unter Inanspruchnahme relativ geringer Grundstücksfläche.	3.0
	Mobilität	Die Parkplätze in Biel sind beschränkt, daher gibt es eine starke Nutzung des ÖV. Trotzdem bleibt eine Handvoll individuell anreisender Zupendler.	2.0
	Abfälle aus Betrieb und Nutzung	Abfälle aus Betrieb und Nutzung werden konsequent getrennt und Sonderabfälle sachgerecht entsorgt.	2.5
	Wasser	Der Wasserverbrauch im Gebäude ist durchschnittlich. Es sind jedoch keine Massnahmen geplant, diesen in einer Art zu reduzieren.	2.0

Tabelle 12: Beurteilung des Fallbeispiels Biel in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)

4.3.3. Betonkonstruktion: Universität St. Gallen

Das Hauptgebäude der Universität St. Gallen zeichnet sich in keinem Bereich besonders positiv aus. Am besten schneidet es im Vergleich zu den anderen beiden Fallbeispielen im Bereich «Gesellschaft» aus. Die positive Bewertung resultiert aus dem guten Raumklima, einem offenen Raumkonzept mit viel Begegnungsräumen und einem hohen Wiedererkennungswert – u.a. durch die Materialwahl. Negativ wirkt sich hingegen der Kontrast zwischen dem Gebäude und dem umliegenden Einfamilienhaus-Quartier aus. Aufgrund dieses Kontrastes und der als störend empfundenen Nutzung ist die Akzeptanz mässig und Erweiterungspläne der Hochschule stehen oftmals im Widerspruch zur Quartierentwicklung. Gleichzeitig ist der Standort auf dem Rosenberg nicht optimal für den Verkehr erschlossen (IV und ÖV).

Diese Konflikte mit dem Quartier wirken sich auch auf die Bewertung im Bereich «Wirtschaft» aus, denn die Entwicklungsmöglichkeiten der Hochschule an diesem Standort sind durch die Einflussnahme der Quartierbewohner eingeschränkt. Die Bausubstanz hingegen ist in sehr gutem Zustand, und die Kosten von Betrieb, Instandhaltung/-setzung liegen im üblichen Rahmen. Erhebliche unerwartete Kosten entstanden infolge einer Asbestsanierung. Ausserdem sind die Baukosten in diesem Fall deutlich höher als die Baukosten der Gebäude in Rapperswil und Biel. Insgesamt erhält die Hochschule St. Gallen in diesem Bereich das schlechteste Ergebnis im Vergleich zwischen den Fallbeispielen.

Im Bereich «Umwelt» schneidet dieses Fallbeispiel durchschnittlich ab. Im Betriebsenergieverbrauch zeichnet es sich eher negativ aus. Der Betriebsenergiebedarf wurde in den vergangenen Jahren an der HSG weitgehend optimiert – bleibt aber auf einem eher hohen Niveau. Vom aktuell durchgeführten Umbau erhofft man sich eine Energieeinsparung von rund 40%. Ausserdem ist Beton kein nachwachsender Rohstoff und

enthält relativ viel graue Energie. Der Anteil des Individualverkehrs ist aufgrund der relativ schlechten Anbindung an den öffentlichen Verkehr ebenfalls relativ hoch.

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht über die Beurteilung der verschiedenen Kriterien im Einzelnen sowie eine kurze Begründung der Bewertung für jedes Kriterium. Zugunsten einer besseren Darstellung wird hier der Bereich «Umwelt» vorangestellt.

Umwelt	Rohstoffe: Verfügbarkeit	Beim Bau sind keine nennenswerte Sekundärbaustoffe oder mit geringem Aufwand wieder verwertbare Baustoffe zum Einsatz gekommen.	1.0
	Umweltbelastung	Stahlbeton beinhaltet relativ viel graue Energie. Handkehrum ist er ein Baustoff, welcher haushälterisch die zugeführte Energie speichert.	2.0
	Schadstoffe	Asbest; wurde jedoch sachgerecht entfernt.	1.0
	Rückbau	Betonkies lässt sich mit dem entsprechend notwendigen Aufwand recyklieren.	1.5
	Wärme / Elektrizität	In der Vergangenheit sind verschiedene Massnahmen zur Senkung des Energiebedarfs ergriffen worden. Es besteht noch Verbesserungspotential: Für die Zukunft ist eine Stelle für einen Energietechniker geplant.	2.0
	Deckung Energiebedarf	Es werden keine erneuerbare Energiequellen genutzt.	0.0
	Grundstückfläche	Zum Hauptgebäude gehört relativ viel Umschwung, der lediglich gestalterisch mit Brunnen genutzt wird.	2.0
	Mobilität	Die Mehrzahl der Studenten und Angestellten reisen mit dem ÖV an. Trotzdem bleibt eine Handvoll individuell anreisender Zupendler.	2.0
	Abfälle aus Betrieb und Nutzung	Der Anfall von Abfällen aus Betrieb und Nutzung ist relativ hoch. Aus den frühen 90er- Jahren gibt es ein bestehendes Konzept für die Entsorgung.	2.5
	Wasser	Der Wasserverbrauch ist durchschnittlich und es gibt einzelne Massnahmen zur Reduktion.	2.5

Tabelle 13: Beurteilung des Fallbeispiels St. Gallen in den Kriterium «Umwelt» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)

Gesellschaft	Integration, Durchmischung	Sowohl das Hauptgebäude als auch die gesamte Hochschule steht in einem relativ starken optischen Kontrast zum umliegenden Wohnquartier.	1.0
	soziale Kontakte	Durch die offene Bauweise schafft das Gebäude eine optimale Grundlage für Begegnungsorte.	3.0
	Solidarität, Gerechtigkeit	Die Orientierung der Hauptnutzflächen schafft optimale Voraussetzungen für eine gerechte Nutzung aller Nutzergruppen.	2.5
	räumliche Identität, Wiedererkennung	Durch die markante Präsenz hat das Gebäude grossen Wiedererkennungswert.	3.0
	individuelle Gestaltung, Personalisierung	Durch die Bauweise aus Stahlbeton sind die Nutzergruppen in der Mitgestaltung der einzelnen Bereiche eher eingeschränkt.	1.5
	Grundversorgung, Nutzungsmischung	Die Zugänglichkeit und das Vorhandensein bestimmter Infrastrukturmerkmale (z.B. Toilettenanlagen) ist limitiert.	2.0
	Langsamverkehr, öffentlicher Verkehr	Der Hochschulcampus ist nur beschränkt zu Fuss oder per Fahrrad erreichbar. Die Nutzung des ÖV ist stark durch den limitierten Fahrplan eingeschränkt.	1.5
	Zugänglichkeit und Nutzbarkeit für alle	Die Infrastruktur des Gebäudes selbst ist zwar gut nutzbar für benachteiligte Nutzergruppen, jedoch ist die Zugänglichkeit (Lage) eingeschränkt.	1.5
	Sicherheit	Der Baustoff Stahlbeton fördert das subjektive Sicherheitsempfinden. Handkehrum leidet aber das Wohlbefinden durch die massive Bauweise.	2.5
	Licht	Die oberen Geschosse werden sehr gut mit Tageslicht versorgt. Verkehrsflächen in den unteren Geschossen eher weniger.	2.0
	Raumluft	In der Vergangenheit gab es nie Beanstandungen betreffend der Qualität der Raumluft.	3.0
	sommerlicher Wärmeschutz	Dasselbe gilt für den sommerlichen Wärmeschutz.	3.0
	Lärm, Erschütterungen	Beanstandungen betreffend der Entwicklung von störendem Lärm oder Erschütterungen sind keine bekannt.	3.0
Wirtschaft	Standort	Durch die Umsetzungsschwierigkeiten bei Erweiterungsabsichten (Einsprache Quartierbewohner) werden die langfristigen Chancen als bedingt eingeschätzt.	1.0
	Bausubstanz	Auch nach gut 50-jährigem Bestehen ist die Bausubstanz in sehr gutem Zustand.	3.0
	Gebäudestruktur, Ausbau	Die Gebäudestruktur ist durch die Wahl des Baustoffs weitgehend gegeben. Ein Ausbau oder Umnutzungsmöglichkeiten sind daher nur beschränkt möglich.	1.0
	Lebenszykluskosten	Bisher sind während des Lebenszyklus keine unerwarteten Kosten aufgetaucht.	2.0
	Betrieb und Instandhaltung	Alle bisher unternommenen Betriebs- und Instandhaltungsarbeiten sind in einem finanziell vertretbaren Rahmen ausgefallen.	2.0
	Instandsetzung	Die sachgemässe Beseitigung von Asbest hat bei Instandsetzungsarbeiten für einen wesentlichen Kostenpunkt gesorgt.	1.0

Tabelle 14: Beurteilung des Fallbeispiels St. Gallen in den Kriterien «Gesellschaft» und «Wirtschaft» gemäss den Kriterien aus Anhang B, Tabelle 2 (abgeleitet aus der SIA Empfehlung 112/1)

4.3.4. Vergleich der Gebäude

Bei der Auswertung der Gebäude wurden alle Bereiche (Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt) gleich gewichtet. Auch die jeweiligen Beurteilungskriterien pro Bereich wurden als gleichwertig angenommen. Denkbar wäre eine Variation der Gewichtungen. Da eine solche aber immer subjektiv ist, wurde an dieser Stelle darauf verzichtet.

Bei gleicher Gewichtung der Kriterien ergeben sich die grössten Unterschiede im Vergleich zwischen den drei Fallbeispielen im Bereich «Umwelt». Hier liegt Biel (Holzkonstruktion) klar vor St. Gallen (Stahlbetonkonstruktion) und Rapperswil (Stahlkonstruktion). Im Bereich «Wirtschaft» liegt Rapperswil vorne, allerdings sind die Abstände zum Zweit- (Biel) und Drittrangierten (St.Gallen) geringer. Im Bereich «Gesellschaft» sind nahezu keine Unterschiede festzustellen.

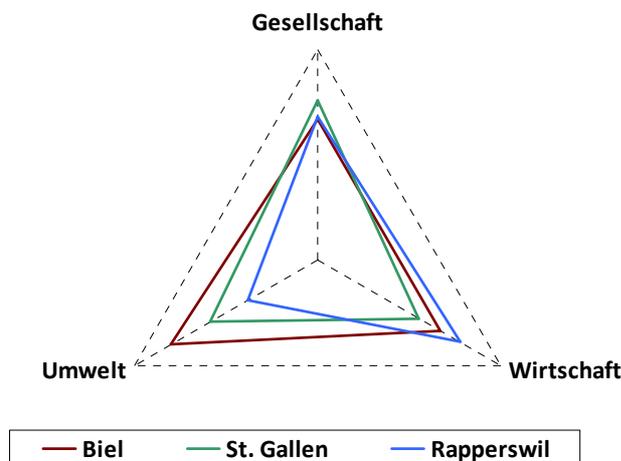


Abbildung 24: Überblick über den Vergleich der drei Fallbeispiele

Massgeblich für die Unterschiede sind folgende Faktoren:

- **Gebäudealter:** Die beiden älteren Gebäude – Rapperswil und St. Gallen – haben einen relativ hohen Betriebsenergieverbrauch, waren von unerwarteten Instandsetzungsmassnahmen zur Entfernung kritischer Baustoffe (Asbest, PCB) betroffen und nutzen die Grundfläche relativ schlecht aus. Das jüngere Gebäude in Biel ist hier klar im Vorteil, da der Energiestandard im Neubau höher war, keine bislang als kritisch bekannten Baustoffe eingesetzt wurden und das Bauland knapp war.
- **Erschliessung mit öffentlichem Verkehr:** Während die Hochschule Rapperswil hervorragend erschlossen ist, stellen die Anreisewege zu den Hochschulgebäuden in Biel und St. Gallen mit dem öffentlichen Verkehr eine Einschränkung dar. Dies wirkt sich auf die Beurteilung in den Bereichen «Gesellschaft» und «Umwelt» aus.
- **Offenes Raumkonzept:** Die Gebäude der Hochschulen Rapperswil und St. Gallen haben ein relativ offenes Raumkonzept im Vergleich zum Gebäude in Biel. Dies wirkt sich vor allem im Bereich «Gesellschaft» positiv aus.
- **Nutzungsflexibilität/Erweiterungsmöglichkeiten am Standort:** Hier zeichnet sich das Gebäude in Rapperswil positiv aus, während die anderen beiden Gebäude deutlich abfallen.
- **Raumluftqualität/Sommerlicher Wärmeschutz:** Hier zeichnet sich das Gebäude in St. Gallen positiv aus, während bei den beiden anderen Gebäuden Probleme auftreten.
- **Rohstoffe/Umweltbelastungen bei der Materialherstellung:** Hier fällt vor allem die Stahlkonstruktion in Rapperswil negativ auf, während sich die Holzkonstruktion in Biel positiv abhebt.

Kaum Unterschiede gibt es hingegen bei der räumlichen Identität/Wiedererkennung, da alle drei Gebäude durch ihre jeweils spezifische Konstruktion auffallen. Sie unterscheiden sich darin jedoch von durchschnittlichen Gebäuden. Ebenso durchgehend positiv wird die Ausstattung der Gebäude bewertet.

Durchgehend negativ fällt der Anteil an erneuerbaren Energien auf. Hier sind alle drei Gebäude eher konservativ und haben erhebliche Optimierungspotenziale.

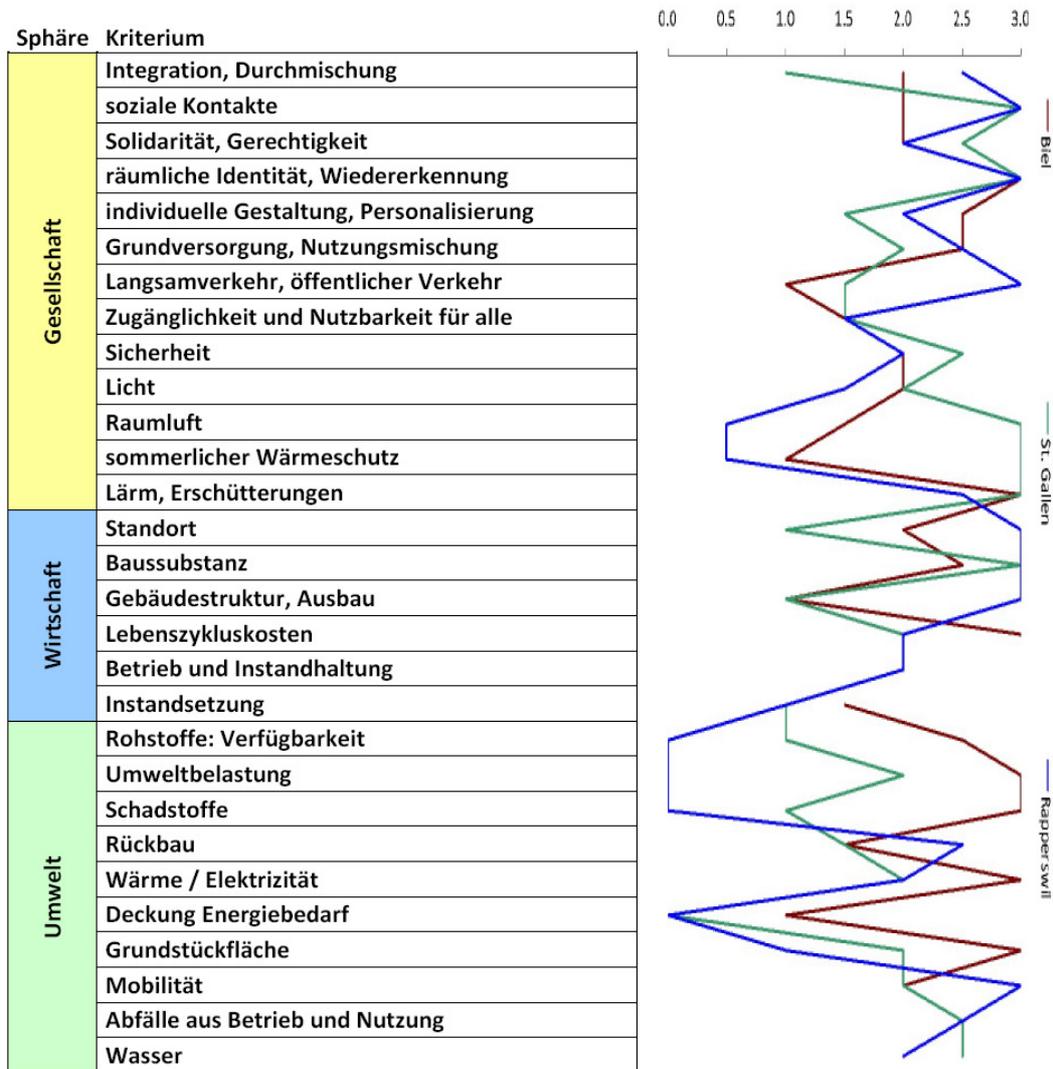


Abbildung 25: Detaillierter Vergleich der Beurteilungsergebnisse der drei Fallbeispiele

4.4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Welche Zusammenhänge lassen die Ergebnisse der Analyse der Fallbeispiele in Bezug auf die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion erkennen?

Die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion beeinflusst in den gewählten Fallbeispielen die Wahrnehmung von Aussen- und Innenraum und bestimmt damit die Bewertung in den Themen «Gemeinschaft» und «Gestaltung» mit. Diese These kann grundsätzlich bestätigt werden. Da aber bei allen drei Fallbeispielen die Materialwahl den Aussen- und Innenraum prägt, treten hier kaum Unterschiede auf. Einzig bei dem Gebäude in Biel bieten sich aufgrund seiner Nutzung als Holzfachschule grössere Identifikationsmöglichkeiten durch die Nutzer. In St. Gallen hingegen wirkt das Gebäude im Quartier eher störend – wobei hier die Nutzung wahrscheinlich massgeblicher ist als die Gestaltung.

Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit der Aneignung der Gebäude durch die Nutzer. Dieser Aspekt wird in St. Gallen schlechter beurteilt als in den anderen beiden Gebäuden, da es sich um einen Sichtbetonbau handelt, der relativ wenig flexibel nutzbar ist. Es findet hier kaum eine Aneignung durch die Nutzer statt. Entscheidend für diese Zusammenhänge ist jedoch das Zusammenwirken von Gestaltung – vor allem dem Raumkonzept – und der Materialwahl.

Der Zusammenhang zwischen Materialwahl und der Bewertung im Themengebiet «Baustoffe» ist sehr deutlich, da ein erheblicher Anteil der Gesamtmasse der Baustoffe im Tragwerk steckt. Damit schneidet die Stahlkonstruktion hier schlechter ab als die Stahlbetonkonstruktion und deutlich schlechter als die Holzkonstruktion. Auf die Betriebsenergie hat dies aber keinen Einfluss. Hier sind das Baujahr und der damit verbundene Energiestandard massgeblich.

Deutlich weniger stark ist der Zusammenhang zwischen Materialwahl und der Bewertung im Themengebiet «Gesundheit und Wohlbefinden». In diesem Bereich schneidet das Gebäude in St. Gallen am besten ab, aber der Zusammenhang zur Materialwahl ist wohl nur bei der Sicherheit gegeben – und auch hier nur als subjektive Wahrnehmung der Nutzer.

Ebenso vage bleibt der Zusammenhang zwischen Materialwahl und der Bewertung in den Themengebieten «Gebäudesubstanz», «Anlagekosten» und «Betriebs- und Unterhaltskosten». Hier kann man einzig bei der Holzkonstruktion festhalten, dass sich das äussere Erscheinungsbild im Zeitverlauf verändert, was als negativ bewertet werden kann. Ansonsten zeigen sich keine materialbedingten Unterschiede.

5. Parametervariationen in Modellgebäuden – Ergebnisse aus Arbeitspaket 3

5.1. Einleitung: Warum zeichnet sich Beton nicht besonders aus?

Aus den Ergebnissen der ersten beiden Arbeitspakete wird deutlich, dass Gebäude mit einer Tragwerkkonstruktion aus Beton sich in bezug auf die ökonomischen und ökologischen Kriterien der Nachhaltigkeit kaum auszeichnen – weder besonders positiv noch besonders negativ. Dieses Ergebnis kann man darauf zurückführen, dass man zu viele Parameter in die Untersuchung mit einbezieht, auf die die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion nur einen geringen Einfluss hat.

Dies zeigt sich auch an den Ergebnissen einer aktuellen Arbeit der TU Darmstadt, in der Varianten der Konstruktionen von Einfamilienhäusern nach Kriterien der ökologischen Bewertung verglichen werden (mit dem Verfahren des Life Cycle Assessment). Die nachfolgende Abbildung zeigt den Vergleich in der Wirkungskategorie «Treibhauseffekt». Hier wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den Varianten «Holzbauweise» und «Massivbauweise» gering bleiben, weil sich die beiden Varianten im Betriebsenergieverbrauch und in der Materialzusammensetzung nur wenig unterscheiden. Materialwahlbedingte Unterschiede ergeben sich bei den Innenwänden, den Geschossdecken und den Aussenwänden – sie sind aber nur rund 5% so gross wie die Gesamtbelastung des betrachteten Systems.

Treibhauspotential [kg CO₂-Äqu.]

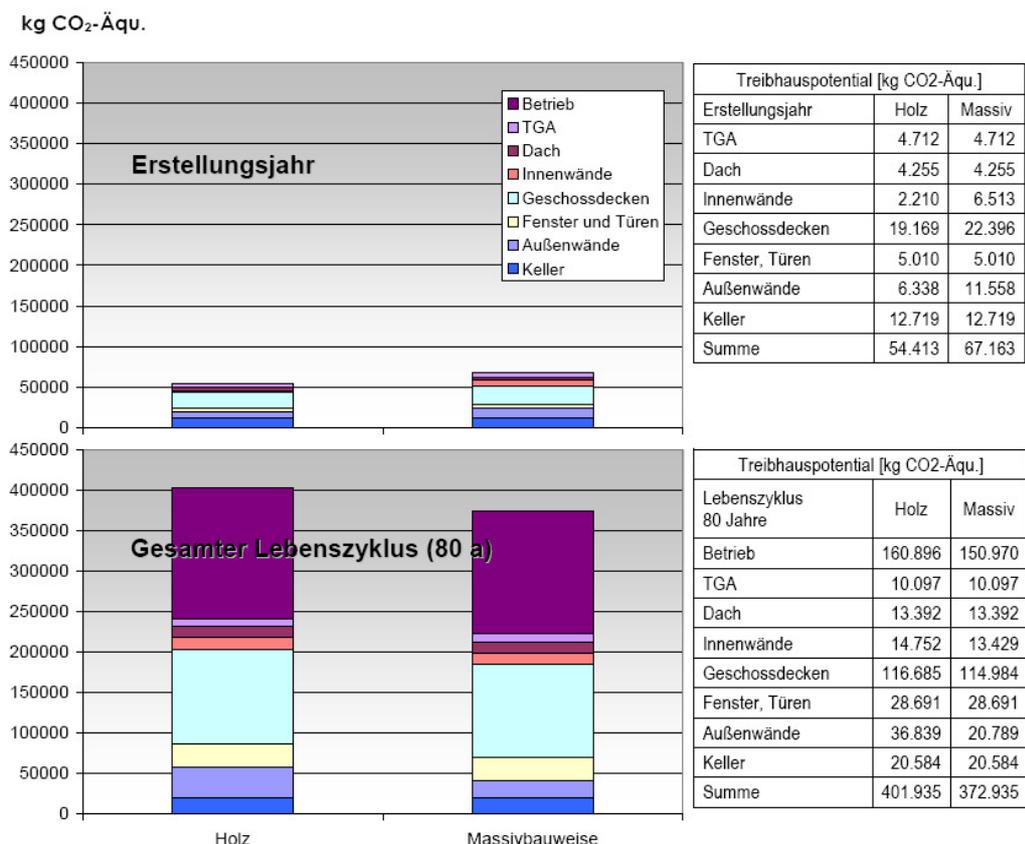


Abbildung 26: Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Lebenszyklusanalyse für ein Einfamilienhaus in den Varianten «Holzbauweise» und «Massivbauweise» in der Wirkungskategorie «Treibhauseffekt» Quelle: Knauff und Graubner, 2008, S. 26.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, warum ein Vergleich zwischen verschiedenen Varianten der Materialwahl in der Tragwerkkonstruktion zu derart geringen Unterschieden führt, und ob man aus diesen Ergebnissen folgern kann, dass sie im nachhaltigen Bauen vernachlässigt werden kann.

Dieser Frage wird im dritten Arbeitspaket dieses Projektes nachgegangen. Es zielt darauf ab, mit Hilfe von vereinfachenden Modellrechnungen zu verstehen, wie die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion die Nachhaltigkeit eines Bauwerks beeinflusst. Dabei fokussieren wir auf ausgewählte Kriterien der Nachhaltigkeit.

5.1.1. Ziel der vorliegenden Untersuchung

Ziel des vorliegenden Projektes ist gemäss Ausschreibung der cemsuisse «... einerseits die Ermittlung der Stärken und Schwächen von Beton als Bauprodukt und andererseits bei dessen Verwendung im Gebäude unter Berücksichtigung des gesamten Prozesses von der Herstellung bis zu Rückbau und Wiederverwertung.» Um dieses Ziel zu erreichen soll die folgende Frage beantwortet werden:

Wie wirken sich die in Arbeitspaket 1 identifizierten Eigenschaften von Beton bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Projekten im Hochbau aus? (siehe Abschnitt 2.2, Punkt d)

5.1.2. Vorgehen

Wie bereits zu Beginn der Beschreibung des letzten Arbeitspakets betont, hat das Projekt einen grundsätzlich explorativen Charakter. Daher beginnen wir auch in diesem Arbeitspaket zunächst mit dem Formulieren von Hypothesen über mögliche Zusammenhänge zwischen Materialwahl im Tragwerk und Kriterien des nachhaltigen Bauens. Diese Hypothesen lenken die Aufmerksamkeit bei der Definition des Modellhauses, der Auswahl der Bewertungskriterien, der Auswahl der variierten Parameter und bieten einen Bezugsrahmen für die Interpretation der Ergebnisse. Mit der Auswertung der Ergebnisse der Modellierung in diesem Arbeitspaket können die Hypothesen jedoch nicht grundsätzlich bestätigt oder zu verworfen werden, da die Ergebnisse stark durch die hier getroffenen Annahmen beeinflusst werden. Durch die Modellierung können die erkannten Zusammenhänge aber klarer aufgezeigt werden, so dass die Argumentation transparent wird. Die Ergebnisse geben Hinweise für eine Präzisierung der Hypothesen schaffen eine Grundlage für das Identifizieren von Fragen für weitere Untersuchungen.

a. Formulierung der grundlegenden Hypothesen

Die Dokumentenanalyse in Arbeitspaket 1 liefert Hinweise darauf, dass die Ergebnisse von Vergleichen zwischen verschiedenen Materialien der Tragwerkkonstruktion in Bezug auf ihre ökologische Bewertung und die Baukosten wesentlich von den gewählten Systemgrenzen (Anzahl der verglichenen Bauteile und Nutzungsdauer des Gebäudes) und von der gewählten Bezugseinheit (Grösse des Gebäudes) bestimmt werden. Konkret gehen wir davon aus, dass folgende Zusammenhänge bestehen:

Hypothese 1: Wenn man den Vergleich von Gebäuden mit unterschiedlichen Materialien in der Tragwerkkonstruktion – nach ausgewählten Kriterien des nachhaltigen Bauens - auf den Rohbau begrenzt, dann zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen alternativen Materialien.

Hypothese 2: Mit zunehmender Nutzungsdauer der Gebäude sinkt die Relevanz der Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien in der Tragwerkkonstruktion für ausgewählte Kriterien des nachhaltigen Bauens im Hochbau.

Hypothese 3: Mit zunehmender Grösse des Gebäudes steigt die Relevanz der Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien in der Tragwerkkonstruktion für ausgewählte Kriterien des nachhaltigen Bauens im Hochbau.

b. Definition des Modellhauses

Grundlage dieser Untersuchung ist die Definition eines Modellgebäudes, das durch verschiedene Parameter definiert ist wie Grösse, Form, Nutzungsdauer oder klimatische Bedingungen des Standorts. Im zu entwickelnden Modell wird der Rohbau dieses Gebäudes abgebildet. Das Modell wird so gewählt, dass man eine beliebige Anzahl von plausiblen und realisierbaren Varianten des Gebäudes generieren kann, die sich durch die Wahl der Baustoffe für die unterschiedlichen Bauteile unterscheiden. Dabei werden die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Elementen der Konstruktion möglichst weitgehend berücksichtigt (z.B. die Dicke der Aussenwände in Abhängigkeit von der Materialwahl des Tragwerks). Auf dieser Grundlage kann man nun durch Variantenvergleich gezielte Aussagen ableiten über die Veränderung der Nachhaltigkeit des Gebäudes in Abhängigkeit von der Wahl des Baustoffs.

c. Beschreibung des Modellhauses

Das Modellhaus hat eine quadratische Grundfläche, deren Grösse variiert wird. Es hat drei Stockwerke und ein Flachdach. Die Geschossdecken und das Flachdach werden ausschliesslich durch die Aussenwände getragen; es gibt weder Innenwände noch Stützen. Das Gebäude steht auf einer Bodenplatte (kein Kellergeschoss). Die Fensterfläche ist abhängig von der Grösse der Grundfläche. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Skizze des Gebäudes.

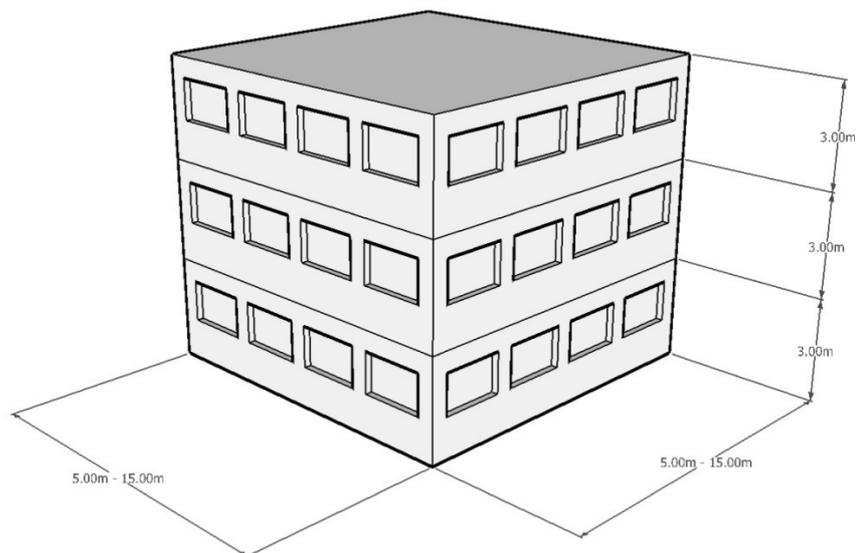


Abbildung 27: Skizze des Musterobjektes, eigene Darstellung

Für die Berechnung des Primärenergieverbrauchs der Bauteile werden (Althaus et al. [2008]) und der elektronische Bauteilkatalog (<http://www.bauteilkatalog.ch>) verwendet. Die verwendeten Kennwerte werden in Anhang C beschrieben.

Der Aufbau der Bauteile wird in Tabelle 15 bzw. in den Abbildungen Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 beschrieben. Dabei ist anzumerken, dass es sich lediglich bei den Stahlbetonbauteilen um eine realitätsnahe Beschreibung handelt. Bei den Varianten mit Holz bzw. Stahl ist diese Wahl der Bauteile eher als Modellannahme zu verstehen, um eine möglichst weitgehende Vergleichbarkeit mit der Variante aus Stahlbeton zu gewährleisten. Tatsächlich werden in diesen beiden Varianten die Materialmengen tendenziell deutlich überschätzt.

Der Aufbau der Bauteile ist dabei wie folgt:

Bauteil	U-Wert [W/m ² K]	Element	Material	d [m]
Boden	0.18	Bodenplatte	Stahlbeton	0.3
		Aufbau	Zementunterlagsboden	0.08
			Dampfbremse (PE)	0.0002
			Wärmedämmung (EPS)	0.2
Geschoss- decken		Konstruktion	Holz / Stahl / Stahlbeton	Parameter wird in Abschnitt d) genauer beschrieben
		Aufbau	Zementunterlagsboden	0.07
			Dampfbremse (PE)	0.0002
			Trittschalldämmung (Glaswolle/EPS)	0.04
Flachdach	0.18	Konstruktion	Holz / Stahl / Stahlbeton	Parameter wird in Abschnitt d) genauer beschrieben
		Aufbau	Schutzschicht (Kies)	0.05
			Wasserisolation (bitum.)	0.008
			Wärmedämmung (EPS)	0.2
			Dampfbremse (bitum.)	0.004
Aussenwände	0.18	Konstruktion	Holz / Stahl / Stahlbeton	Parameter wird in Abschnitt d) genauer beschrieben
		Wärmedämmung	Massivholzverkleidung	0.013
			Holzlattung	vernachlässigbar
			Dampfbremse (PE)	0.0002
			Steinwolle	0.2
Fenster	1.5	PVC-Fenster	Fenster mit Wärmeschutzglas	Parameter wird in Abschnitt d) genauer beschrieben

Tabelle 15: Aufbau der Bauteile des Modellhauses, eigene Darstellung

Der Betriebsenergieverbrauch des Gebäudes wurde nach SIA Norm 380/1 berechnet^{xi}. Für die Abschätzung der Betriebsenergie wird eine Innenraumtemperatur von 20 °C angenommen, die mit einem mit Heizöl betriebenen Heizkessel erzeugt wird gemäss (Althaus et al. [2008]). Als Gebäudestandort wird der Raum Zürich angenommen. Jede Seite des Gebäudes richtet sich auf eine Himmelsrichtung, sodass der Wärmegewinn durch Sonneneinstrahlung maximal ist.

^{xi} Mit Hilfe des Programms Peterer ENBI 380/1. <http://www.peterer.ch/ENBI/index-Dateien/ENBI3801.htm>

d. Parametervariation

In den Modellrechnungen werden einerseits die Materialwahl der Tragwerkkonstruktion (Geschossdecken, Flachdach und Aussenwände) und andererseits die Grundfläche des Gebäudes variiert. Als mögliche Materialien für die Tragwerkkonstruktion werden Holz, Stahl und Stahlbeton betrachtet. Ausserdem wird die Nutzungsdauer des Gebäudes variiert.

Zur Berechnung der Materialmengen werden Bauteile definiert (siehe Tabelle 16) und die Gebäude für die Grundflächen 25 m² (Gebäuelänge: 5 m), Grundflächen 100 m² (Gebäuelänge: 10 m) und Grundflächen 225 m² (Gebäuelänge: 15 m) betrachtet.

Bei der Variation der Gebäuelänge wird jeweils auf den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gemäss SIA 260:2003 bemessen. Die massgebende Durchbiegung wird für den häufigen Lastfall betrachtet und einer zulässigen Durchbiegung von $l/350$ gegenübergestellt.

Beim Stahlbeton wird von einem fixen Bewehrungsgehalt von 80 kg/m³ ausgegangen. So kann unter Annahme eines im Grenzzustand vollständig gerissenen Querschnitts und einer Kriechzahl von 2 mit Hilfe der Formel 87 nach SIA 262:2003 direkt auf die notwendige Deckenstärke geschlossen werden. Für die Aussenwände wird bei allen betrachteten Gebäuelängen eine Stärke von 12 cm gewählt.

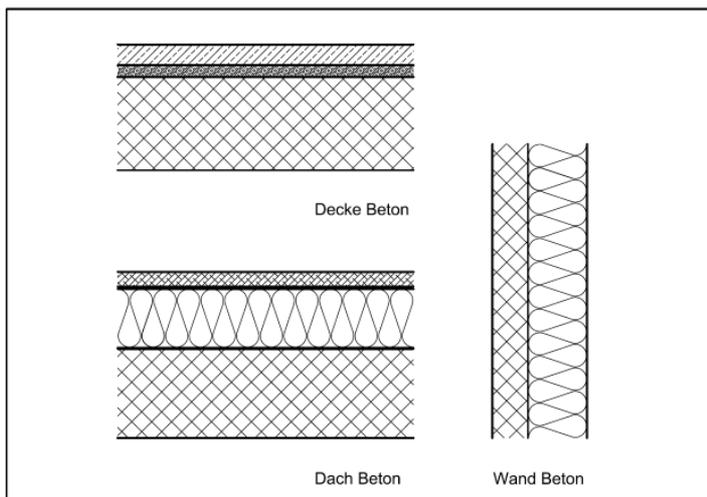


Abbildung 28: Skizze Aufbau mit Beton (ohne Dampfbremse und Abdichtung), eigene Darstellung

Beim Holz wird als Konstruktionsbaustoff Brettschichtholz GL24h gemäss SIA 265:2003 (Tabelle 7) gewählt. Mit dem Brettschichtholz wird quasi eine Plattendecke gemäss nachstehender Skizze festgelegt. Diese Vereinfachung ermöglicht die Betrachtung einer Konstruktion mit Holz als einzigem Baustoff. Mit Hilfe der Formel 4 nach SIA 265:2003 kann unter Annahme einer Kriechzahl von 0.6 auf die für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit notwendige «Plattenstärke» bemessen werden. Die Holzstützen hinter der Aussenhülle werden so bemessen, dass diese die Auflast der jeweils darüber liegenden Etagen tragen.

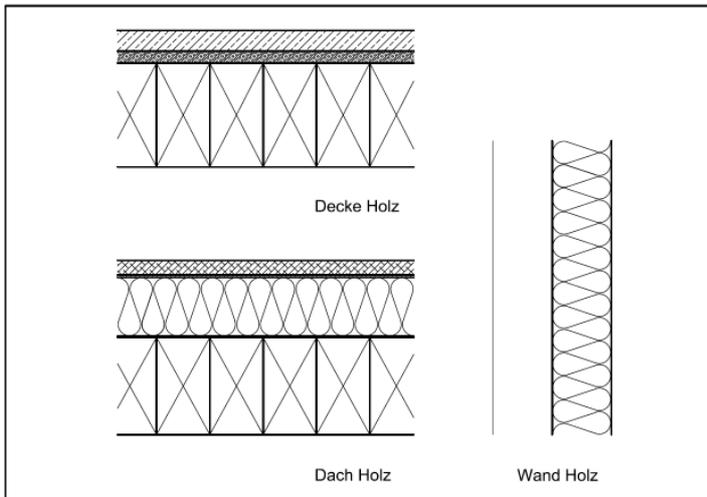


Abbildung 29: Skizze Aufbau mit Holz (ohne Dampfbremse und Abdichtung), eigene Darstellung

Beim Stahl wird für die Bemessung die Qualität S235 gemäss SIA 263:2003 (Tabelle 1) gewählt. Mit Hilfe der SZS-Konstruktionstabellen C5/05 wird in Abhängigkeit der Gebäudelänge jeweils das zum Erbringen des Nachweises notwendige Doppel-T-Profil (HEA oder IPE) mit der geringsten Masse (kg/mProfil) gewählt. Die Stahlstützen hinter der Aussenhülle werden so bemessen, dass diese die Auflast der jeweils darüber liegenden Etagen tragen.

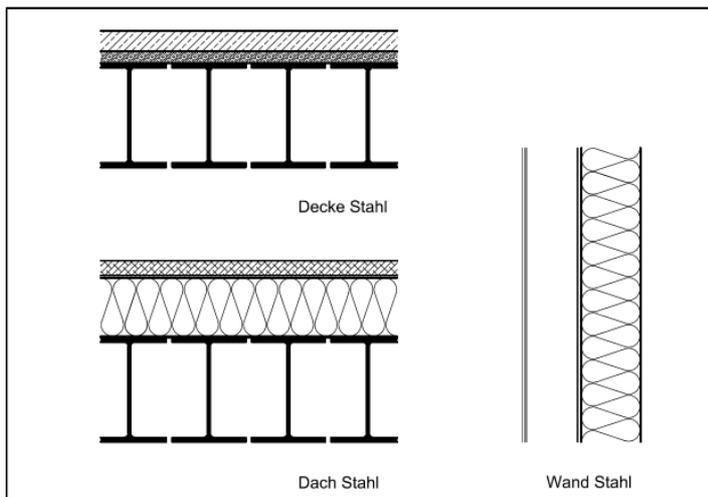


Abbildung 30: Skizze Aufbau mit Stahl (ohne Dampfbremse und Abdichtung), eigene Darstellung

Die Bodenplatte, die Aussenhülle und der Deckenaufbau bleiben während der Variation der Gebäudehülle jeweils sowohl betreffend Materialien als auch betreffend Schichtdicken konstant. Einzig die Fensterfläche wird proportional zur Gebäudelänge grösser. Dadurch verändern sich die entsprechenden Parameter zur Abschätzung der Betriebsenergie (siehe Tabelle 16).

Grundfläche (m ²)	Fensterfläche (m ²)	Wärmebrücken (m)
25	55	150
100	110	300
225	165	450

Tabelle 16: Annahmen zur Variation der Bauteile in Abhängigkeit von der Gebäudelänge

Ausserdem wird die Nutzungsdauer des Gebäudes variiert. Dabei werden folgende Annahmen getroffen.

Nutzungsdauer	Erneuerung	Betriebsenergie
30 Jahre	Fenster	Standard des Baujahrs
50 Jahre	Sämtliche Materialien, die in Tabelle 15 unter der Kategorie «Aufbau» bzw. «Wärmedämmung» aufgeführt werden.	Standard des Baujahrs
70 Jahre	Fenster	Standard des Baujahrs
90 Jahre	Sämtliche Materialien, die in Tabelle 15 unter der Kategorie «Aufbau» bzw. «Wärmedämmung» aufgeführt werden und Fenster.	Standard des Baujahrs

Tabelle 17: Annahmen zu Betrieb und Erneuerung

Es wird vereinfachend angenommen, dass die Bauteile des Tragwerks während des gesamten Zeitraums weder erneuert noch instand gehalten werden müssen.

e. Auswahl der Bewertungskriterien

Für den Vergleich zwischen den verschiedenen Varianten wird eine Reihe von Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung ausgewählt, die man mit sinnvollem Aufwand für ein Modell des Rohbaus anwenden kann.

In der Dimension «Umwelt» fokussiert die Bewertung auf den Energieverbrauch im Lebensweg des Gebäudes. Es wird hier der gesamte Primärenergieverbrauch im Lebensweg zur Herstellung der Bauteile bzw. der Raumwärme betrachtet. Er ist vergleichbar mit dem in der Schweiz besser bekannten Konzept der «grauen Energie» z.B. aus dem Tabellenwerk «Graue Energie von Baustoffen» von Kasser und Pöll (1999). Im Gegensatz zum Primärenergieverbrauch berücksichtigt die Graue Energie lediglich nicht-erneuerbare und begrenzt verfügbare Rohstoffe, d.h. erneuerbare Rohstoffe oder Sekundärrohstoffe wie z.B. Müll sind nicht in den Kennwerten mit eingeschlossen.

Konzeptionell wird der Primärenergieverbrauch ebenso wie der Kumulierte Energieaufwand (KEA) als so genannter Stellvertreterindikator betrachtet. Dieses Konzept wird in Abschnitt 3.2.1.1.1 ausführlich erläutert.

In der Dimension «Wirtschaft» fokussiert die Bewertung auf die Baukosten, die Kosten der Instandhaltung und die Heizenergiekosten (gemäss Annahmen aus Tabelle 18). Der Ertrag aus dem Gebäude wird nicht betrachtet, da diese Grösse wesentlich von der Nutzung und vom Innenausbau bestimmt wird und diese Einflussfaktoren nicht bekannt sind.

In der Dimension «Gesellschaft» werden zwei Bewertungskriterien betrachtet, die durch die Wahl des Materials für das Tragwerk mit bestimmt werden: die Brandsicherheit und die Nutzungsflexibilität. Für die Brandsicherheit werden die Gebäudevarianten qualitativ beurteilt. Die Nutzungsflexibilität wird bei allen

Gebäudevarianten durch den gewählten Entwurf konstant gehalten. In allen Varianten besteht das Gebäude aus tragenden Aussenwänden und Decken und es wird auf eine bauliche Unterteilung des Raums auf den Geschossen verzichtet.

Dimension	Bewertungskriterium	Umsetzung im Modell
Umwelt	Energieverbrauch im Lebensweg der Bauteile	Primärenergieverbrauch gemäss (Althaus et al. [2008])
	Energieverbrauch im Betrieb des Gebäudes	Primärenergieverbrauch gemäss (Althaus et al. [2008])
Wirtschaft	Baukosten	Grobabschätzung auf der Grundlage von (Bauteilkatalog)
	Kosten der Instandhaltung	Austausch der Bauteile gemäss Tabelle 17. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Kosten den Baukosten entsprechen.
	Heizenergiekosten	Es wird von einem Heizölpreis von 0.8 CHF pro kg ausgegangen, der über den gesamten Zeitraum konstant bleibt.
Gesellschaft	Brandsicherheit	Qualitative Einschätzung
	Nutzungsflexibilität	Konstant über alle Varianten

Tabelle 18: Übersicht über die gewählten Bewertungskriterien

Welche Auswirkungen haben die gewählten Bewertungskriterien auf die Ergebnisse des Vergleichs? Durch die Wahl der Bewertungskriterien wird die Variante mit einer Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton teilweise begünstigt, da mit der Brandsicherheit ein Kriterium herausgegriffen wird, in dem Stahlbeton tendenziell gut abschneidet. Mit der Wahl des Primärenergieaufwands als Kriterium der ökologischen Bewertung hingegen wird eher die Variante «Holz» bevorzugt, die zu einem relativ geringen Energieverbrauch führt, aber hinsichtlich Flächenverbrauch und allfälligen negativen Einwirkungen auf Ökosysteme durch Holzbehandlungsmittel tendenziell schlechter abschneidet als Stahlbeton.

Wir gehen daher davon aus, dass die Ergebnisse des Vergleichs durch die Auswahl dieser Kriterien nicht systematisch zugunsten der Variante «Stahlbeton» verzerrt werden.

5.2. Ergebnisse der Modellrechnungen für die Dimension «Umwelt»

5.2.1. Ergebnisse für das Modellhaus mit einer Grundfläche von 100 m²

5.2.1.1. Vergleich des Rohbaus (ohne Nutzung und Erneuerung)

Der Vergleich der drei Varianten des Modellhauses zeigt, dass für die Variante mit einer Tragwerkkonstruktion aus Holz am wenigsten Primärenergie für das Bereitstellen der Bauteile aufgewendet werden muss (vgl. Abbildung 31). Die Variante mit einer Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton benötigt rund 30% mehr Primärenergie und liegt damit im Vergleich an zweiter Stelle. Für die Variante mit einer Tragwerkkonstruktion aus Stahl hingegen muss rund 90% mehr Primärenergie aufgewendet werden als für die Variante mit Holzkonstruktion. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Materialmengen in den Varianten mit Holz und Stahl tendenziell überschätzt werden.

Bei der Variante mit einer Tragwerkkonstruktion aus Holz wird ein erheblicher Teil der Primärenergie für die Herstellung der Dämmstoffe eingesetzt – vor allem für das Polystyrol. Die Herstellung der Fenster leistet den zweitgrössten Beitrag zum gesamten Primärenergieverbrauch. Das Bereitstellen des Holzes für das Tragwerk folgt erst an dritter Stelle – knapp vor dem bituminösen Material, das im Flachdach zur Abdichtung eingesetzt wird.

Ganz anders stellt sich die Aufteilung der eingesetzten Primärenergie auf die verschiedenen Baustoffe bei den Varianten mit Stahlbeton- bzw. Stahlkonstruktion aus. In beiden Fällen leistet das im Tragwerk eingesetzte Material den grössten Beitrag zum gesamten Primärenergieverbrauch. In beiden Varianten steht das Polystyrol an zweiter Stelle gefolgt von den Fenstern, dem bituminösen Material und der Steinwolle. Bei der Stahlbetonkonstruktion ist der Beitrag des Polystyrols rund 50% so gross wie der Beitrag des Stahlbetons; bei der Stahlkonstruktion ist der Beitrag des Polystyrols rund 25% so gross wie der Beitrag des Stahls.

In Abbildung 32 wird der relative Beitrag der verschiedenen Baumaterialien zur Masse des Gebäudes einerseits und zum Primärenergieverbrauch der Bereitstellung der Bauteile andererseits dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Varianten des Modellhauses sich sehr deutlich im Gesamtgewicht unterscheiden. Die Variante mit Stahlbetonkonstruktion ist rund doppelt so schwer wie die beiden anderen Varianten. Die beiden anderen Varianten unterscheiden sich hingegen nur geringfügig in ihrem Gewicht (rund 20%). In beiden Fällen – Holz und Stahl – trägt die Bodenplatte aus Stahlbeton zu rund 40% des Gesamtgewichts bei, der Zementunterlagsboden ist für weitere rund 20% verantwortlich und weitere 5% ergeben sich aus dem Kiesbelag des Flachdachs. In den verbleibenden 35% der Masse zeigt sich der Vorteil des Holzes gegenüber dem Stahl hinsichtlich des Gewichts des Tragwerks. Er macht jedoch unter den gegebenen Bedingungen nur noch rund 20% des Gesamtgewichts aus.

In Bezug auf den Primärenergieaufwand bestimmt das Polystyrol die Ergebnisse der Variante mit Holzkonstruktion. Würde man beispielsweise ein anderes Dämmmaterial wählen, dessen Herstellung weniger Primärenergie erforderte, könnte man den Primärenergieaufwand in dieser Variante deutlich senken. Der Abstand zu den Varianten mit Stahlbeton- bzw. Stahlkonstruktion würde entsprechend grösser. Bei der Variante mit Stahlbetonkonstruktion dominiert der Stahlbeton sowohl hinsichtlich Masse als auch hinsichtlich des Primärenergieaufwands. Dies ist vor allem auf die grosse Masse in dieser Variante zurück zu führen. Der spezifische Primärenergieaufwand für die Herstellung von Stahlbeton ist relativ klein im Vergleich zu Holz und insbesondere zu Stahl. Durch die grosse Masse an Stahlbeton in dieser Variante wird es dennoch zum dominierenden Material. Einzig eine Reduktion des Gewichts würde in dieser Variante zu Verbesserungen führen.

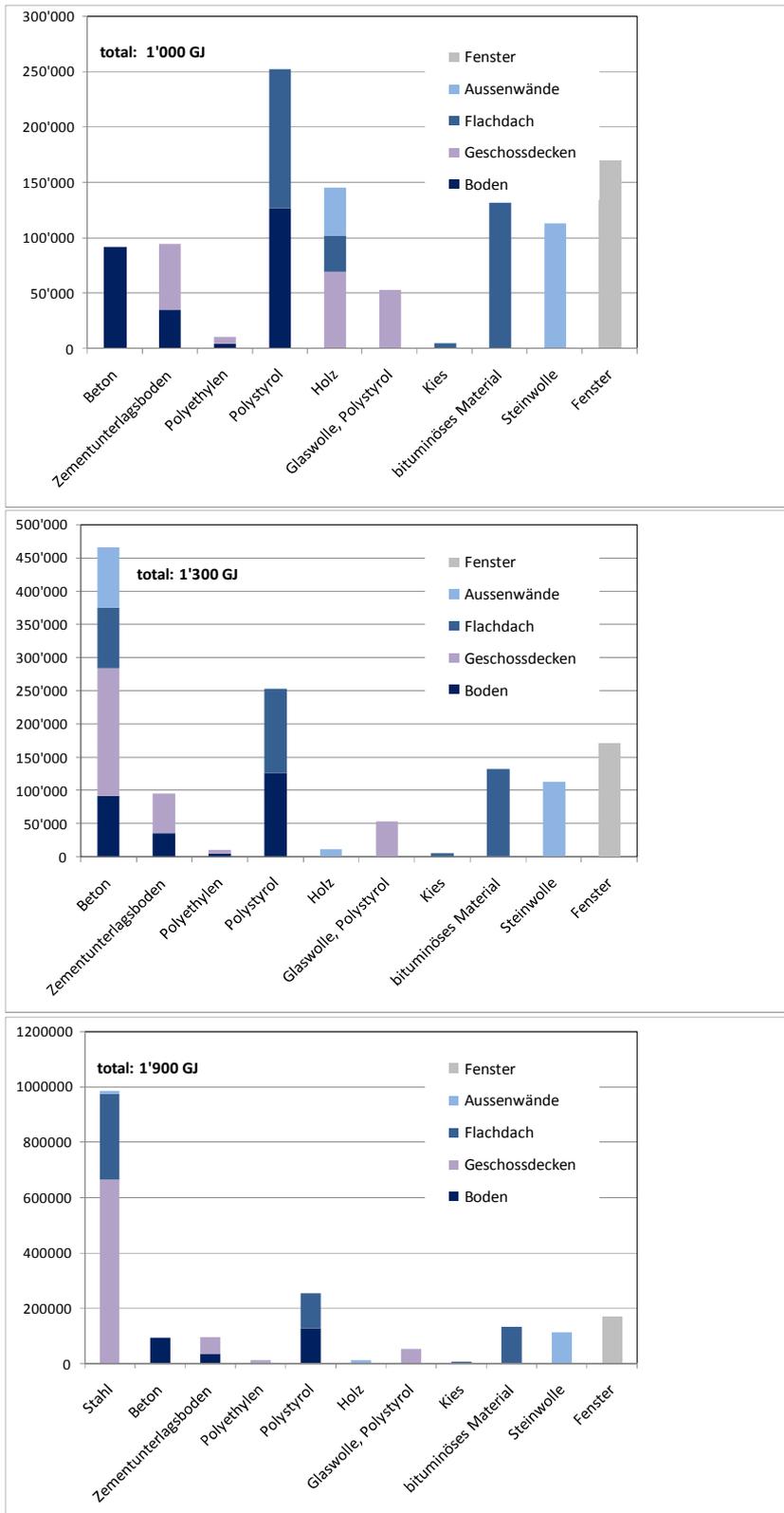


Abbildung 31: Primärenergieverbrauch der Bereitstellung der Bauteile für die drei Varianten in Megajoule: Holzkonstruktion (oben), Stahlbetonkonstruktion (Mitte) und Stahlkonstruktion (unten). In der linken oberen Ecke ist jeweils der gesamte Verbrauch von Primärenergie für das Bereitstellen der Bauteile angegeben. Quelle: eigene Darstellung.

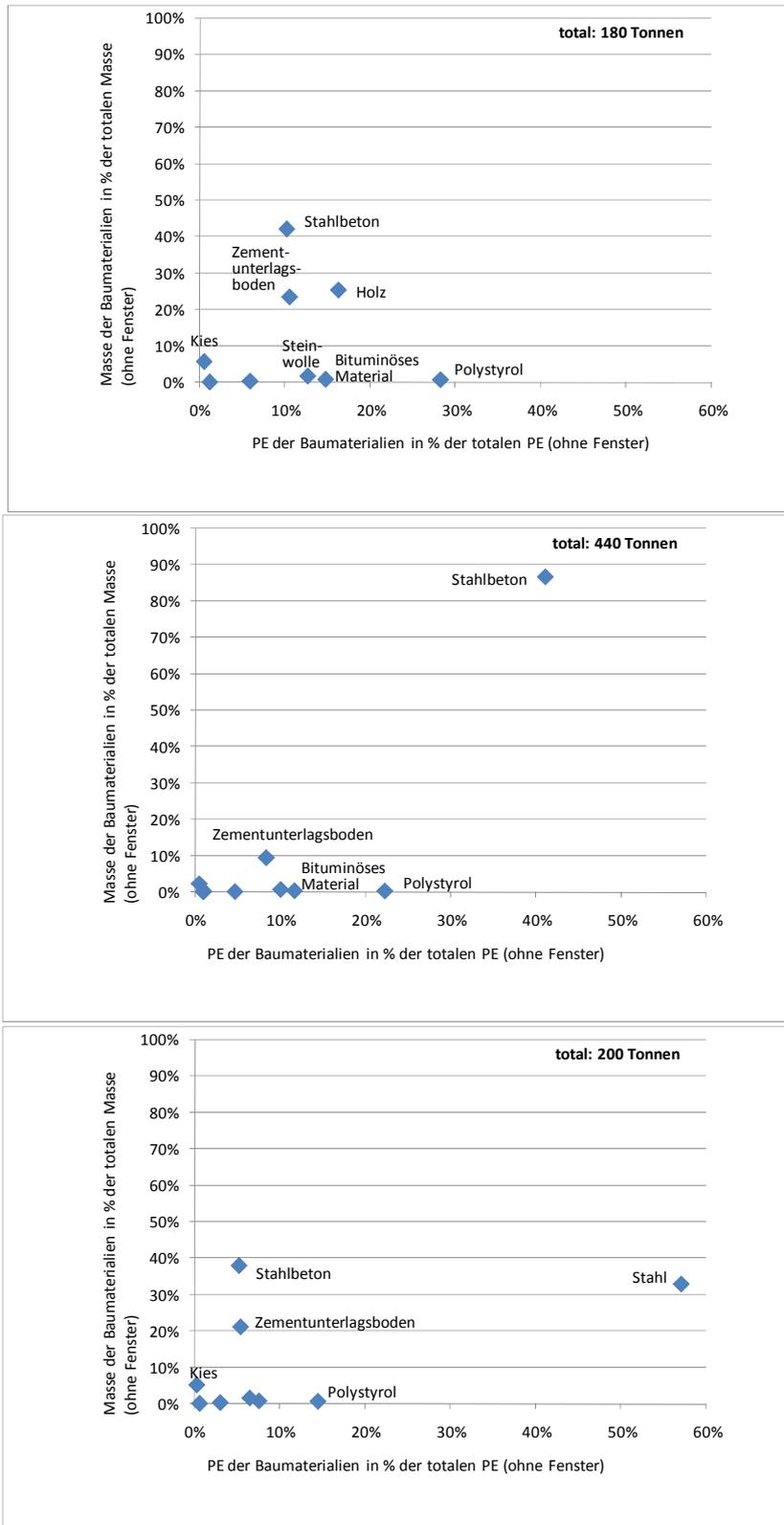


Abbildung 32: Anteile der verschiedenen Materialien am Primärenergieverbrauch der Bereitstellung der Bauteile bzw. an der Masse für die drei Varianten: Holzkonstruktion (oben), Stahlbetonkonstruktion (Mitte) und Stahlkonstruktion (unten). In der rechten oberen Ecke ist jeweils der gesamte Masse der hier betrachteten Bauteile. Die Abkürzung PE steht für Primärenergie. Quelle: eigene Darstellung.

Bei der Variante mit Stahlkonstruktion dominiert der Stahl den Primärenergieaufwand, trotzdem er nur rund 30% der Masse ausmacht. Dies ist auf den hohe spezifischen Primärenergieverbrauch der Stahlproduktion

zurück geführt werden (Annahme: Recyclinganteil von 98%). Dieser Effekt wird am Beispiel des Mustergebäudes jedoch tendenziell überschätzt, da wir annehmen, dass die Geschossdecken überwiegend aus Stahlträgern bestehen. Hier wären auch andere Varianten denkbar, die bis zu 50% weniger Stahl enthielten. Aber auch in diesem Fall führte diese Variante zum grössten Primärenergieverbrauch und leistete Stahl den dominierenden Beitrag dazu.

5.2.1.2. Vergleich einschliesslich Nutzung und Erneuerung

Nimmt man bei diesem Vergleich die Nutzung und Erneuerung des Gebäudes während eines Zeitraums von 50 Jahren hinzu, dann wird die geringe Bedeutung der Materialwahl für die Tragwerkkonstruktion deutlich. Bei der Variante mit Stahlkonstruktion ist der Anteil der Konstruktionsmaterialien mit 16% am grössten, gefolgt von der Variante mit Stahlbetonkonstruktion mit 7% und der Variante mit Holzkonstruktion mit 4%. Die Unterschiede zwischen den Varianten werden deutlich kleiner. Die Variante mit Stahlbetonkonstruktion führt nun nur noch zu einem um 4% höheren Primärenergieaufwand als die Variante mit Holzkonstruktion und zu einem 10% tieferen Primärenergieaufwand als die Variante mit Stahlkonstruktion. Damit sind die Unterschiede nicht mehr signifikant.

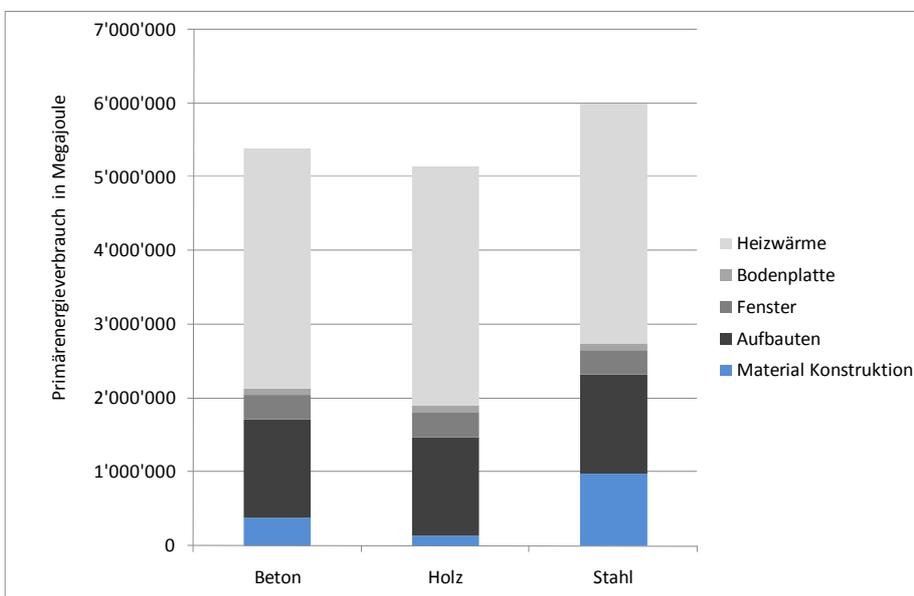


Abbildung 33: Aufteilung des Primärenergieverbrauchs der verschiedenen Varianten des Modellhauses mit einer Grundfläche von 100 m² während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren auf verschiedene Bauteile und die Heizenergie. Quelle: eigene Darstellung.

5.2.2. Ergebnisse der Parametervariation

In den Parametervariationen werden nun einerseits die Grösse des Gebäudes und andererseits die Nutzungsdauer variiert. Dabei zeigt sich, dass der Anteil der Konstruktionsmaterialien am Primärenergieaufwand des Modellhauses mit einer zunehmenden Grösse des Hauses zunimmt und mit einer zunehmenden Nutzungsdauer des Hauses abnimmt.

Der Zusammenhang zwischen Gebäudegrösse und Anteil der Konstruktionsmaterialien am Primärenergieaufwand ist am deutlichsten bei der Variante mit Stahlkonstruktion. Bei einer Geschossfläche von 675 m² und einer Nutzungsdauer von 50 Jahren, ist dieser Anteil grösser als 25%. Damit vergrössert sich auch der Abstand zu den beiden anderen Varianten. Bei einem grösseren Gebäude lohnt es sich also tendenziell eher, die Materialwahl des Tragwerks nach ökologischen Kriterien zu optimieren als bei kleineren Gebäuden.

Mit zunehmender Nutzungsdauer sinkt der Anteil der Konstruktionsmaterialien am Primärenergieaufwand des Gebäudes. Bei einer Nutzungsdauer von 90 Jahren beträgt er bei der Variante mit Stahlkonstruktion lediglich 10%; bei den beiden anderen Varianten liegt er unter 5%. Ursache ist die zunehmende Bedeutung der Heizenergie einerseits und die zunehmende Bedeutung der Erneuerung von nichttragenden Bauteilen andererseits. Bei Gebäuden mit kurzer Nutzungsdauer hingegen ist die Wahl des Konstruktionsmaterials bedeutsam mit einem Anteil von fast 25% bei der Variante mit Stahlkonstruktion und über 10% bei der Variante mit Stahlbetonkonstruktion.

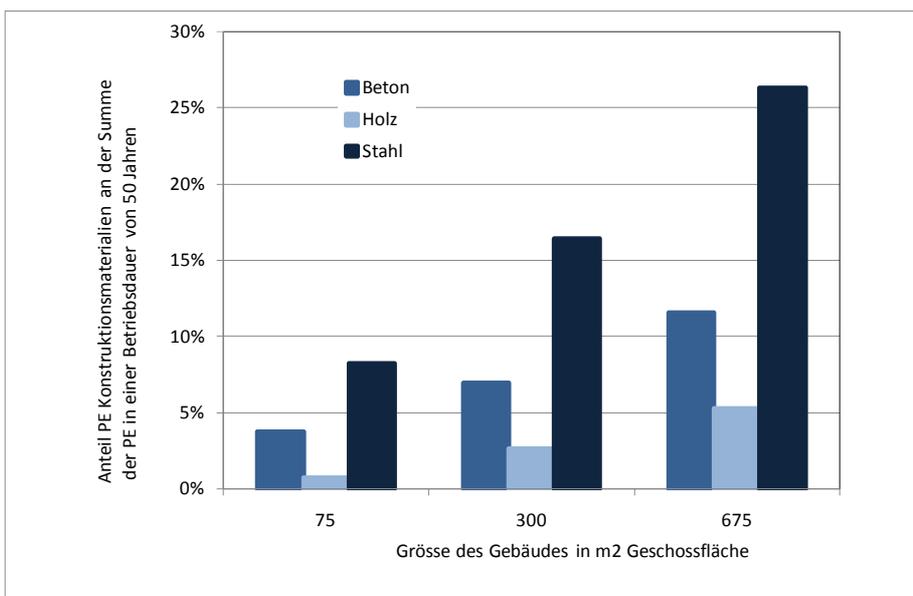


Abbildung 34: Variation des Anteils des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Grösse des Gebäudes (bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren). Die Abkürzung PE steht für Primärenergie. Quelle: eigene Darstellung.

Betrachtet man den Primärenergieaufwand aller Baumaterialien zusammen (ohne Nutzung und Erneuerung) in Abhängigkeit von der Gebäudegrösse, so zeigt sich zunächst eine Reduktion des Primärenergieaufwands pro Quadratmeter Geschossfläche für alle Varianten. Ab einer bestimmten Geschossfläche bleibt dieser Wert jedoch tendenziell konstant (in der Variante mit Holzkonstruktion) oder steigt wieder an (in den beiden anderen Varianten). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Gebäudehülle am gesamten Primärenergieaufwand mit zunehmender Gebäudegrösse abnimmt. Die Gebäudehülle enthält mit Dämmstoffen (Polystyrol), Fenstern und Abdichtung des Flachdachs eine Reihe von Materialien mit einem hohen spezifischen Primärenergiebedarf. Sinkt ihr Anteil im Verhältnis zur Geschossfläche, so verbessert sich die Primärenergiebilanz. Ab einer gewissen Gebäudegrösse ist ihr Anteil jedoch so gering, dass die Zunahme der Materialien in den Geschosdecken diesen Gewinn kompensiert. Abbildung 36 zeigt die

zunehmende Bedeutung der Geschossdecken insbesondere bei den Varianten mit Stahlbeton- bzw. Stahlkonstruktion.

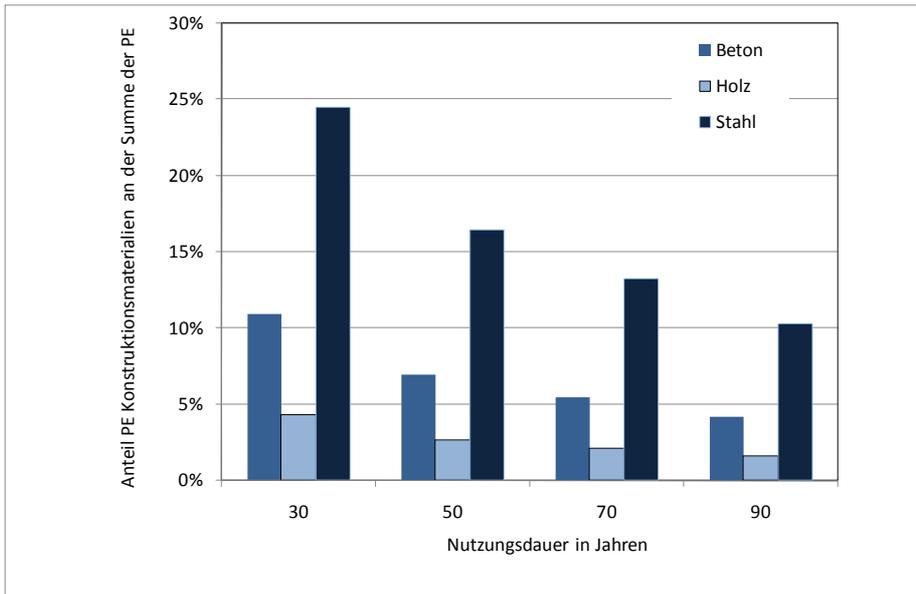


Abbildung 35: Variation des Anteils des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer (bei einer Gebäudegrösse von 300 m² Geschossfläche). Die Abkürzung PE steht für Primärenergie. Quelle: eigene Darstellung.

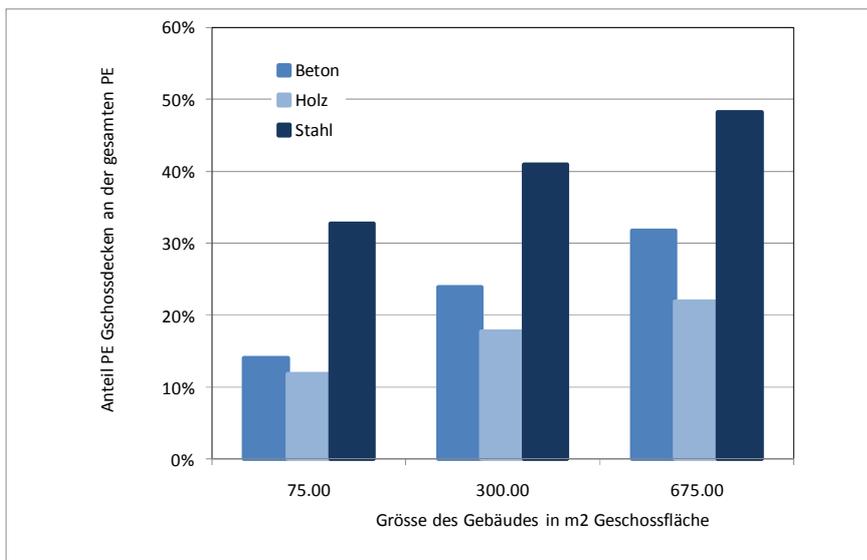


Abbildung 36: Anteil der Primärenergie (PE) der Bereitstellung der Bauteile in den Geschossdecken am gesamten Primärenergieaufwand der Bereitstellung der Bauteile (ohne Nutzung und Erneuerung) für drei Varianten mit unterschiedlicher Gebäudegrösse. Quelle: eigene Darstellung.

5.3. Ergebnisse der Modellrechnungen für die Dimension «Wirtschaft»

5.3.1. Ergebnisse für das Modellhaus mit einer Grundfläche von 100 m²

Vergleicht man die Baukosten des Rohbaus bestehend aus den in Tabelle 15 aufgelisteten Bauteilen für ein Modellhaus mit 100 m² Grundfläche, dann zeigt sich, dass die Variante mit Stahlbetonkonstruktion zu den geringsten Baukosten führt gefolgt von der Variante mit Holzkonstruktion. Die Variante mit Stahlkonstruktion schneidet am schlechtesten ab. Die Unterschiede betragen rund 25% der Baukosten der Variante mit Stahlbetonkonstruktion und sind somit signifikant. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Materialmengen in den Varianten mit Holz und Stahl tendenziell überschätzt werden.

Bei den Varianten mit Holz- bzw. Stahlkonstruktion leisten die Materialien des Tragwerks – Holz und Stahl – den grössten Beitrag zu den Baukosten. Der relative Anteil der Fenster und der Bodenplatte folgen in einem Abstand von 50% bei der Variante mit Holzkonstruktion bzw. 25% bei der Variante mit Stahlkonstruktion.

Hier unterscheiden sich die Ergebnisse der Abschätzung der Baukosten für die Variante mit Holzkonstruktion deutlich von den Ergebnissen der Abschätzung des Primärenergieaufwands. Beim Primärenergieaufwand dominieren in dieser Variante die Dämmstoffe und durch Verwenden weniger energieintensiver Dämmstoffe liesse sich die Primärenergiebilanz verbessern. Bei den Baukosten ist es hingegen tatsächlich der Baustoff Holz, der den grössten Beitrag leistet. Bei der Variante mit Stahlkonstruktion hingegen dominiert der Stahl sowohl Baukosten wie auch Primärenergieaufwand. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Stahlmenge in den Geschossdecken tendenziell überschätzt wird. Würde man diese Menge um 50% reduzieren, dann wäre die Variante mit Stahlkonstruktion nicht teurer als die Variante mit Holzkonstruktion.

Die Variante mit Stahlbetonkonstruktion schneidet am günstigsten ab und in dieser Variante ist der Stahlbeton im Tragwerk nur rund 15% teurer als die Fenster. Der Stahlbeton dominiert damit die Baukosten deutlich weniger stark als den Primärenergieaufwand der Bereitstellung der Bauteile.

Nimmt man nun die Nutzung und Erneuerung des Gebäudes in der Analyse hinzu, dann verändern sich die Ergebnisse vor allem durch die Erneuerung der Fenster in den Varianten mit Stahlbeton- und Holzkonstruktion. Da unter den in Tabelle 17 beschriebenen Annahmen die Fenster alle 30 Jahre ausgetauscht werden, werden diese bei der Variante mit Stahlbetonkonstruktion bereits nach 30 Jahren zum dominierenden Faktor - unter der Annahme, dass die Teuerung der Baukosten nicht wesentlich höher ist als der zur Berechnung der Lebenszykluskosten angenommene Diskontierungssatz.^{xii} Bei der Variante mit Holzkonstruktion sind die Kosten der Fenster nach 30 Jahren in gleichen Grössenordnung wie die Kosten des Holzes; bei der Variante mit Stahlkonstruktion ist dies allerdings erst nach 90 Jahren der Fall. Hier bleibt der Stahl der dominierende Baustoff.

Die Heizenergiekosten sind in allen Varianten im Vergleich zu den Baukosten relativ gering. Bei einer Geschossfläche von 300 m² schätzen wir die jährlichen Heizenergiekosten bei einem Ölpreis von 80 Rappen pro Kilogramm lediglich auf circa 1'200 CHF. Bei einer Nutzungsdauer von 90 Jahren würde man rund 100'000 CHF für Heizwärme aufwenden, d.h. nur ein Sechstel der Baukosten der Varianten mit Stahlbetonkonstruktion (inkl. Kosten der Erneuerung). Damit ergibt sich ein grundsätzlich anderes Bild als bei der Auswertung der Ergebnisse in der Dimension «Umwelt», in der die Nutzungsphase in allen Varianten klar dominierte.

In dieser Betrachtung vernachlässigt werden hingegen die Kosten des Innenausbaus und die Kapitalkosten. Würde man die Analyse entsprechend erweitern, so wäre der relative Beitrag der Baukosten für den Rohbau entsprechend geringer.

^{xii} Tatsächlich wird häufig mit Diskontierungssätzen gerechnet, die weit über der Teuerung der Baukosten liegen. Dies insbesondere bei Investitionsrechnungen, in denen Risiken beim Festlegen der Zinssätze mit einfließen. In diesem Fall nimmt die Bedeutung von Zahlungsflüssen in der Zukunft deutlich ab und die Baukosten haben einen grösseren Anteil an den Lebenszykluskosten.

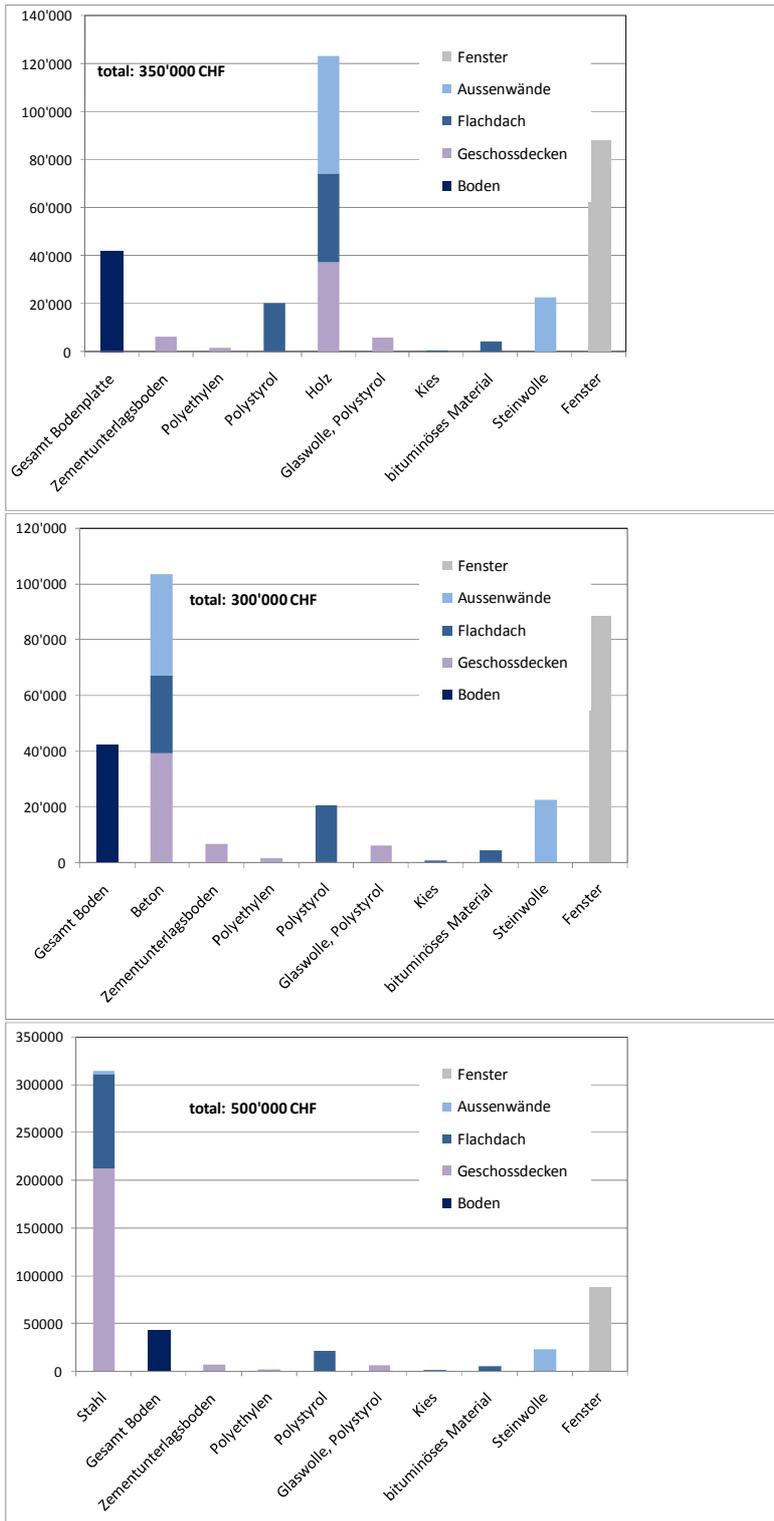


Abbildung 37: Kosten der Bauteile für die drei Varianten in Schweizer Franken (CHF): Holzkonstruktion (oben), Stahlbetonkonstruktion (Mitte) und Stahlkonstruktion (unten). In der linken oberen Ecke ist jeweils der Gesamtbetrag der Baukosten für die hier betrachteten Bauteile angegeben. Quelle: eigene Darstellung.

5.3.2. Ergebnisse der Parametervariation

Die Parametervariationen fokussiert auf die Grösse des Gebäudes. Da die Nutzung und die Erneuerung des Gebäudes nur einen vergleichsweise geringen Beitrag zu den hier betrachteten Kosten leisten (Baukosten Rohbau; Erneuerung Rohbau und Heizenergiekosten) wird auf eine Variation der Nutzungsdauer verzichtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Baukosten pro Quadratmeter Geschossfläche mit zunehmender Grösse des Gebäudes sinken. Bei einer Geschossfläche von 75 m² sind die Baukosten der Varianten mit Holz- bzw. Stahlbetonkonstruktion vergleichbar (siehe Anhang C). Mit zunehmender Grösse des Gebäudes nehmen die Kosten der Variante mit Stahlbetonkonstruktion ab, während die Baukosten in den anderen beiden Varianten zunächst leicht abnehmen und anschliessend wieder zunehmen.

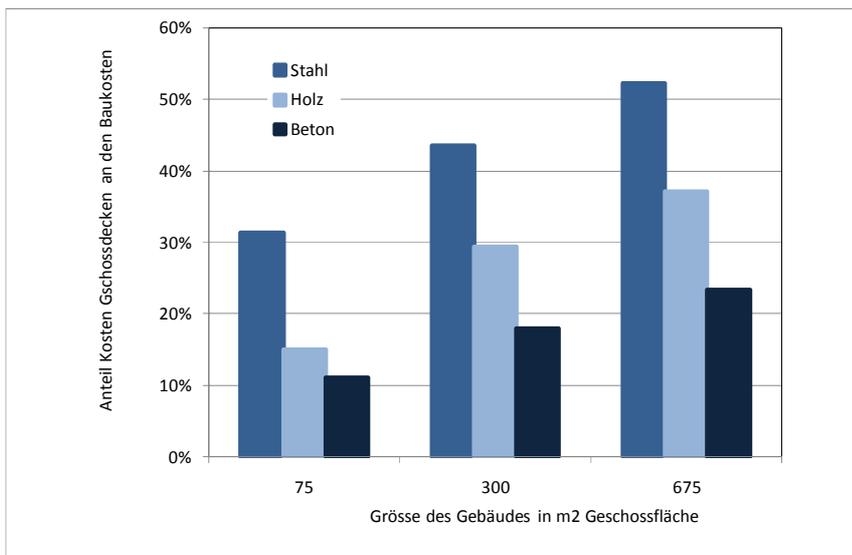


Abbildung 38: Anteil der Kosten der Geschossdecken an den Gesamtkosten des Rohbaus für drei Varianten mit unterschiedlicher Gebäudegrösse. Quelle: eigene Darstellung.

Wie auch bei der Primärenergie ist dies darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Gebäudehülle an den Baukosten im Rohbau mit zunehmender Gebäudegrösse abnimmt. Damit verlieren vor allem die Kosten der Fenster an Bedeutung – pro Quadratmeter Geschossfläche. Ab einer gewissen Gebäudegrösse ist aber der Anteil der Gebäudehülle so gering, dass die Zunahme der Materialien in den Geschossdecken diesen Gewinn kompensiert. Abbildung 38 zeigt die zunehmende Bedeutung der Geschossdecken insbesondere bei den Varianten mit Holz- bzw. Stahlkonstruktion.

5.4. Ergebnisse für die Dimension «Gesellschaft»

Durch den Entwurf des Modellhauses wird die Nutzungsflexibilität für alle drei Varianten der Wahl von Tragwerksmaterialien konstant gehalten. Bei zunehmender Gebäudegrösse führt dies zu einer Erhöhung der Masse des Gebäudes – insbesondere bei der Variante mit Stahlbetonkonstruktion. Durch Einbau von Stützen bspw. könnte die Masse gesenkt werden – und damit auch der Primärenergieaufwand. Hinsichtlich der Baukosten ist dieser Effekt nicht so klar. Es besteht aber vor allem in den Varianten mit Stahlbeton- und Holzkonstruktion ein Zielkonflikt zwischen der Nutzungsflexibilität und der Materialeffizienz im Neubau (ohne Nutzung und Instandhaltung).

In Bezug auf die Brandsicherheit schneidet die Variante mit Stahlbetonkonstruktion klar am besten ab. Holz- und Stahlkonstruktion sind beide schlechter in Bezug auf die Brandsicherheit. Hier müssten wahrscheinlich zusätzliche Massnahmen getroffen werden, die dann wiederum mit einem erhöhten Primärenergieaufwand bzw. erhöhten Baukosten verbunden sind.

5.5. Schlussfolgerungen

Können die einleitend beschriebenen Hypothesen durch die Ergebnisse der Modellrechnungen gestützt werden?

Hypothese 1: Die erste Hypothese kann grundsätzlich bestätigt werden. Begrenzt man den Vergleich verschiedener Materialien in der Tragwerkkonstruktion auf den Rohbau, dann werden Unterschiede zwischen alternativen Materialien sichtbar. Die Modellrechnungen zeigen aber ergänzend, dass vor allem die Wahl der Dämmstoffe die Ergebnisse des Vergleichs mit Holzkonstruktionen deutlich beeinflussen.

a. Primärenergieaufwand

Eine Tragwerkkonstruktion aus Stahl hat einen deutlich höheren Primärenergieaufwand als Tragwerkkonstruktionen aus Holz und Stahlbeton. Der Unterschied wird in den Modellrechnungen tendenziell überschätzt, da die Stahlmenge im Modellhaus sehr grosszügig bemessen wird. Der Unterschied im Primärenergieaufwand ist jedoch fast 50% gegenüber dem Stahlbeton und knapp 100% gegenüber dem Holz, so dass wir davon ausgehen können, dass diese Aussage auch angesichts möglicher Fehler in den Abschätzungen robust ist.

Eine Tragwerkkonstruktion aus Holz hat einen deutlich geringeren Primärenergieaufwand als Tragwerkkonstruktionen aus Stahl und Stahlbeton. Der Unterschied zum Stahlbeton beträgt in der vorliegenden Modellrechnung jedoch nur rund 30%. Dies ist aber auch dadurch bedingt, dass einerseits die Holzmenge durch die Modellannahmen tendenziell überschätzt wird. Andererseits wird ein Dämmstoff gewählt, dessen spezifischer Primärenergieaufwand relativ gross ist. In der Variante mit einer Tragwerkkonstruktion aus Holz dominiert der Primärenergieaufwand dieses Dämmstoffs die Ergebnisse. Würde man einen weniger energieintensiven Dämmstoff wählen, so vergrösserte sich der Abstand zur Stahlbetonkonstruktion.

Ein Gebäude mit einer Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton liegt damit in Bezug auf seinen Primärenergieaufwand zwischen den beiden betrachteten Alternativen. Es zeichnet sich aus durch seine grosse Masse: Es ist doppelt so schwer wie die beiden anderen Varianten. Damit kompensiert die Masse den relativ geringen spezifischen Primärenergieaufwand des Stahlbetons.

b. Baukosten

Eine Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton ist ungefähr gleich teuer wie eine Tragwerkkonstruktion aus Holz aber deutlich günstiger als eine Tragwerkkonstruktion aus Stahl. Die Unterschiede werden in den Modellrechnungen tendenziell überschätzt, da die Stahl- bzw. Holzmenge im Modellhaus sehr grosszügig bemessen werden. Daher gehen wir davon aus, dass der Unterschied zwischen den Varianten «Stahlbeton» und «Holz» nicht signifikant ist. Der Unterschied in den Baukosten zu Stahl beträgt jedoch rund 65%, so dass wir davon ausgehen können, dass diese Aussage auch angesichts möglicher Fehler in den

Abschätzungen robust ist. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse stark von den Annahmen zu den Materialpreisen abhängen, die insbesondere im Fall von Stahl sehr stark schwanken können.

c. Brandsicherheit

Hier zeigt sich ein deutlicher Vorteil der Variante mit Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton. Die beiden anderen Varianten könnten durch zusätzliche bauliche bzw. technische Massnahmen ein vergleichbares Mass an Brandsicherheit erreichen, was aber mit zusätzlichen Kosten bzw. zusätzlichem Primärenergieaufwand verbunden wäre.

Hypothese 2: Auch diese Hypothese wird grundsätzlich bestätigt. Mit zunehmender Nutzungsdauer der Gebäude sinkt die Relevanz der Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien in der Tragwerkkonstruktion. Aber die Relevanz dieser Unterschiede ist auch bei relativ kurzen Nutzungsdauern klein - vor allem für die Varianten mit Tragwerkkonstruktionen aus Stahlbeton und Holz.

a. Primärenergieaufwand

Der Anteil des Konstruktionsmaterials am gesamten Primärenergieverbrauch ist für eine Tragwerkkonstruktion aus Holz ab einer Nutzungsdauer von 30 Jahren kleiner als 5% (bei einer Gebäudegrösse von 300 m² Geschossfläche). Er sinkt mit zunehmender Nutzungsdauer auf unter 2% bei 90 Jahren. Bei einer Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton liegt diese Spannweite – unter den sonst gleichen Annahmen - zwischen 10% (bei 30 Jahren) und 5% (bei 90 Jahren). Bei der Variante «Stahl» sind es 25% (bei 30 Jahren) und 10% (bei 90 Jahren). Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass wir von einem Neubau mit gutem Energiestandard ausgehen. Daher können wir davon ausgehen, dass der Materialwahl in der Tragwerkkonstruktion bei der Optimierung des Primärenergieaufwands eines Gebäudes keine grosse Priorität zukommt. Insbesondere für Gebäude mit langer Nutzungsdauer ist weder die Materialwahl noch die Materialmenge im Tragwerk entscheidend. Es sollte vielmehr die Nutzungsdauer und der Betriebsenergieverbrauch optimiert werden.

b. Lebenszykluskosten

Bei den Lebenszykluskosten dominieren die Baukosten die Ergebnisse der Analyse, da sich diese unmittelbar auf die Kapitalkosten auswirken. Die Kosten der Betriebsenergie sind vernachlässigbar. Damit ist die Tragwerkkonstruktion aus Stahlbeton die günstigste. In dieser Variante übersteigen jedoch bereits nach 30 Jahren die Kosten der Erneuerung der Fenster, die Baukosten der Tragwerkkonstruktion (unter der Annahme, dass die Teuerung der Baukosten nicht wesentlich höher ist als der zur Berechnung der Lebenszykluskosten angenommene Diskontierungssatz). Bei der Variante mit Holzkonstruktion sind die Kosten der Fenster nach 30 Jahren in der gleichen Grössenordnung wie die Kosten des Holzes; bei der Variante mit Stahlkonstruktion ist dies allerdings erst nach 90 Jahren der Fall. Hier bleibt der Stahl der dominierende Baustoff. Aus diesen Ergebnissen folgern wir, dass auch bei der Optimierung der Lebenszykluskosten für Gebäude mit langer Nutzungsdauer weder die Materialwahl noch die Materialmenge im Tragwerk entscheidend sind. Es sollten vielmehr die Nutzungsdauer und die Instandhaltung/-setzung optimiert werden.

Hypothese 3: Auch diese Hypothese wird grundsätzlich bestätigt. Mit zunehmender Grösse des Gebäudes steigt die Relevanz der Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien in der Tragwerkkonstruktion. Diese Zunahme der Relevanz ist einerseits darauf zurück zu führen, dass grössere und kompaktere Gebäude energieeffizienter sind – damit nimmt die relative Bedeutung des Betriebsenergieverbrauchs ab. Andererseits sinkt die relative Bedeutung der Materialien der Aussenhülle, die einen hohen spezifischen Primärenergieverbrauch haben bzw. relativ teuer sind. Die relative Bedeutung der Geschossdecken hingegen nimmt zu.

Dieser Zusammenhang zeigt sich sowohl beim Primärenergieverbrauch als auch bei den Lebenszykluskosten. Beim Primärenergieverbrauch ist er deutlicher, da die Betriebsenergie hier eine grössere Rolle spielt. Wir schliessen daraus, dass die Materialwahl und die Materialmenge im Tragwerk –

insbesondere in den Geschossdecken - bei grösseren Gebäuden entscheidender ist als bei kleineren Gebäuden. Dies spricht dafür, dass Optimierungsanstrengungen hier anzusetzen sind.

Ein möglicher Ansatzpunkt ist Reduktion der Materialmenge in den Geschossdecken. Dies könnte beispielsweise durch Stützen oder tragende Zwischenwände erreicht werden – was aber die Nutzungsflexibilität des Gebäudes einschränken würde. Andererseits könnte man die verschiedenen Materialien stärker kombinieren und so leichtere Geschossdecken konstruieren.

6. Schlussfolgerungen

Beton zeichnet sich nach dem heutigen Kenntnisstand in Bezug auf seinen Beitrag zum nachhaltigen Bauen weder als besonders negativ, noch als besonders positiv aus. Beton ist in der Schweiz gut verfügbar, breit und flexibel einsetzbar und bietet Vorteile beim Schutz vor Gefahren und bei der Werterhaltung. Er wird als «naturfern» wahrgenommen, aber seine Produktion und Nutzung ist nicht mit gravierenden Schäden von Menschen und/oder der Tieren und Pflanzen verbunden. Die wesentlichen ökologischen Probleme ergeben sich aus den Kohlendioxidemissionen bei der Zementproduktion und aus der Grösse der insgesamt umgesetzten Mengen (Transporte, Flächenversiegelung, Staub etc.).

Beton ist nicht besser und nicht schlechter als andere Baustoffe. Er hebt sich positiv ab gegenüber Stahl, schneidet aber tendenziell schlechter ab als Holz. Bei der Bewertung von Gebäuden zeigt sich die relativ geringe Bedeutung der Materialwahl im Tragwerk. Hier sind andere Faktoren massgeblich wie die Betriebsenergie, die Kosten von Instandhaltung/-setzung, die Nutzungspotenziale (des Gebäudes und des Standorts) oder das Raumkonzept.

Im Bemühen um eine positive Differenzierung des Baustoffes Beton im nachhaltigen Bauen identifizieren wir zwei unterschiedliche Ansatzpunkte:

Ansatzpunkt 1: Die Industrie stellt «nachhaltigen Beton» bereit

Im ersten Ansatzpunkt, der das heute gängige Verständnis widerspiegelt, ist es die Aufgabe der Baustoffindustrie, einen Baustoff herzustellen, der den Anforderungen des Architekten/Planenden genügt. Erweitern sich diese Anforderungen in Richtung «Nachhaltigkeit», so wird auch dieser Anspruch durch die Bauindustrie erfüllt – beispielsweise durch die Lieferung von Recycling-Beton wie in den Kriterien zum Gebäude-Label «Minergie-Eco» gefordert. In diesem Verständnis muss die Beton- und Zementindustrie um die Nachhaltigkeit des Baustoffs Beton besorgt sein – um die Bauwerke und deren Nachhaltigkeit hingegen kümmern sich die Architekten/Planenden.

Nach diesem Ansatz ist die Nachhaltigkeit eines Baustoffs am ehesten gewährleistet, wenn in seiner Produktion und Entsorgung möglichst wenig Ressourcen verbraucht werden (natürliche, soziale und ökonomisch) und die für das Bauen erforderliche Qualität gewährleistet ist. Für den Baustoff Beton liegen die Schwerpunkte im Senken der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung einerseits und dem Recycling des Betongranulats aus dem Rückbau der bestehenden Bauwerks andererseits. Ausserdem muss sichergestellt sein, dass bei der Nutzung des Betons das Wohlbefinden der Gebäudenutzer nicht beeinträchtigt wird – beispielsweise durch die Raumfeuchte infolge mangelnder Austrocknung im Bauprozess.

Ansatzpunkt 2: Der Baustoff Beton unterstützt das Entwickeln «nachhaltiger Bauwerke»

Verlassen wir nun dieses gängige Denkmuster und wenden wir uns einem neuen Ziel zu: Dem Bereitstellen von nachhaltigen Bauwerken. Dies sind Bauwerke, die mit minimalem Ressourcenverbrauch (natürliche, soziale und ökonomische Ressourcen) den maximalen Nutzen für die Gesellschaft bringen - einschliesslich aller nicht in Geldeinheiten ausgedrückten Werte inkl. der Optionswerte für die nachfolgender Generationen.

Welchen Beitrag kann der Baustoff Beton hier leisten? Tabelle 19 beschreibt drei gängige Entwurfsregeln des nachhaltigen Designs und zeigt, welchen Einfluss der Einsatz von Beton hat bzw. wie man diesen Einsatz verbessern könnte. Hier wird deutlich, dass wir heute kein schlüssiges Konzept für ein nachhaltiges Bauen mit Beton haben und uns in widersprüchlichen Zielen verstricken. Betonbauten sollen einerseits leichter werden und andererseits ihre Bauteile als Wärmespeicher nutzen. Sie sollen zum einen durch thermische Aktivierung von Bauteilen Betriebsenergie sparen und möglichst leicht sein. Zum anderen sollen diese Bauwerke aber flexibel nutz- und erweiterbar sein und den Ansprüchen der Nutzer über Generationen gerecht werden. Dies alles vor dem Hintergrund der Forderung nach einem nachhaltigen Baustoff Beton mit möglichst wenig Klinker und möglichst viel rezyklierter Gesteinskörnung.

Entwurfsregel des nachhaltigen Designs	Wie wird der Einsatz von Beton heute tendenziell bewertet?	Welche Verbesserungsmöglichkeiten bestehen?
Möglichst geringer Materialeinsatz pro Einheit des geschaffenen Nutzens	<p>Beton bestimmt je nach Bauweise zwischen 30% und 80% der Masse von Bauwerken im Hochbau.</p> <p>Beton schneidet aufgrund seines relativ hohen spezifischen Gewichts tendenziell schlechter ab als die meisten anderen Baustoffe.</p>	<p>Als Konsequenz werden neue Betonsorten vorgeschlagen, deren Einsatz zu einer Gewichtsreduktion der Bauwerke beitragen (z.B. Leichtbeton oder Hochleistungsbeton).</p> <p>Folgende Nachteile können sich ergeben: Das Erhöhen der Zementmenge, der vermehrte Einsatz von Bewehrung, eine Senkung der Lebensdauer oder der Fehlertoleranz im Bauprozess.</p>
Möglichst geringer Energieeinsatz pro Einheit des geschaffenen Nutzens	<p>Die zur Herstellung des Betons aufgewendete Energie hat nur einen geringen Anteil am Gesamtenergieverbrauch im Lebensweg eines Bauwerks im Hochbau.</p> <p>In bestehenden Gebäuden älteren Baujahrs ist die Betriebsenergie entscheidend. Der relative Anteil der grauen Energie der Baustoffe am Gesamtenergieverbrauch erhöht sich mit zunehmender Energieeffizienz in der Nutzung.</p>	<p>Beton bietet die Möglichkeit zur Reduktion der Betriebsenergie durch Nutzung von Betonbauteilen als Wärmespeicher und ihrer thermischen Aktivierung.</p> <p>Folgende Nachteile können sich ergeben: Die Erhöhung der Masse und allfällige Probleme bei Instandhaltung, Instandsetzung und Rückbau.</p>
Möglichst geringe Lebenszykluskosten pro Einheit des geschaffenen Nutzens	<p>Die Kosten des Betons, seines Einbaus und der Instandhaltung/-setzung von Betonbauteilen haben in der Regel nur einen geringen Anteil an den Lebenszykluskosten von Bauwerken im Hochbau.</p> <p>Die Kapitalkosten sind hier dominant gefolgt von den Kosten der Instandhaltung/-setzung von Bauteilen im Innenausbau und den Betriebskosten.</p>	<p>Beton bietet dann Vorteile, wenn sein Einsatz die Lebensdauer der Bauwerke erhöht, denn dies beeinflusst die Kapitalkosten. Dafür ist die Nutzungsdauer des Bauwerks wichtiger als die technische Lebensdauer der Bauteile. Entscheidend sind Nutzungsflexibilität, Variabilität und die Möglichkeiten zur Erweiterung.</p>

Tabelle 19: Ausgewählte Entwurfsregeln im nachhaltigen Bauen und die Bewertung des Einsatzes von Beton. Quelle: eigene Darstellung.

Im Kontext des Ansatzpunkts 1 gelingt es der Zement- und Betonindustrie heute recht gut sich zu positionieren. Insbesondere auch durch aktuelle Initiativen wie (Müller und Harnisch [o.D.]) und (A World Business Council for Sustainable Development [2009]).

Im Kontext des Ansatzpunkts 2 ist derzeit keinerlei bewusste Positionierung der Zement- und Betonindustrie erkennbar. Dies ist sicher teilweise auf die bereits angesprochenen Widersprüche in diesem Ansatzpunkt zurück zu führen. Die Schweizer Zement- und Betonindustrie hat bereits wichtige Weichenstellungen verpasst und damit ihre Handlungsspielräume eingeschränkt. Dies sind insbesondere die Forderung des Einsatzes von Recyclingbeton im Rahmen des Gebäude-Labels «Minergie-Eco» und die Forderung nach einer Trennung von «Primär- und Sekundärstruktur» im Rahmen des SIA Energieeffizienzpfades. Dadurch wird einerseits der Einsatz von Recyclingbeton im nachhaltigen Bauen erzwungen und es werden andererseits Anstrengungen in der Förderung einer thermischen Bauteilaktivierung erschwert.

Gleichzeitig sind die Voraussetzungen einer Positionierung in Richtung eines nachhaltigen Bauens mit Beton ungünstig aufgrund des Images des Baustoffs als «unnatürlicher, kalter Stein» und als «Massenware» und damit Sinnbild einer zu schnell wachsenden Siedlung ohne besondere Qualitäten.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie kann die Zement- und Betonindustrie keine Vorzüge des Baustoffs «Beton» im nachhaltigen Bauen herausstellen, sondern sich lediglich auf die eingangs beschriebene Position zurück ziehen, dass Beton nicht schlechter sei als andere Baustoffe.

Wie kann diese Situation verbessert werden? Wir empfehlen der Zement- und Betonindustrie sich auf eine traditionelle Stärke des Baustoffs Beton zu beziehen und der Bedeutung dieser Stärke im nachhaltigen Bauen nachzugehen. Dies ist die Dauerhaftigkeit – oder konkreter: Die lange technische Lebensdauer von Bauteilen aus Beton. Die Relevanz dieser langen technischen Lebensdauer im nachhaltigen Bauen ist längst nicht mehr unbestritten. Der Zement- und Betonindustrie muss es gelingen zu zeigen, wie man die lange technische Lebensdauer nutzen kann um eine lange Nutzungsdauer zu realisieren (insbesondere in Bezug auf Nutzungsvariabilität und –flexibilität von Gebäuden). Dazu empfehlen wir den folgenden drei Fragen vertieft nachzugehen

- Wie kann man durch geeignete Instrumente und Konzepte des Life-Cycle-Managements die Vorteile der Verwendung von Beton im nachhaltigen Design von Bauwerken unterstützen und die Auswirkungen möglicher Nachteile minimieren (einschliesslich wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Kriterien)?
- Welche Erkenntnisse liefert ein besseres Verständnis und Wissen über die Verwendung von Beton im heutigen Gebäudebestand für eine nachhaltige Bestandsentwicklung und was kann man daraus für den Neubau lernen?
- Wie kann man durch eine geeignete Kombination von Materialwahl (Tragwerk und Innenausbau), Raumkonzept und Konzepte zur Versorgung mit Tageslicht, Luft und –wärme Gebäude erstellen, welche die Ansprüche der heutigen und der zukünftigen Nutzer optimal befriedigen? Wo liegen die Vor- bzw. die Nachteile von Beton als Baustoff in derartigen Kombinationen?

Als zweiten Ansatzpunkt empfehlen wir der Zement- und Betonindustrie den Baustoff Beton als einen möglichen Baustoff im nachhaltigen Bauen zu begreifen und der Frage nachzugehen, wo dieser Baustoff am besten eingesetzt werden sollte. Dazu sollte sie folgenden Fragen nachgehen:

- In welchen Bauteilen/Bauwerken zeichnet sich der Baustoff Beton durch vergleichsweise positive Ausprägungen in den ökologischen, sozialen und ökonomischen Merkmalen des nachhaltigen Bauens aus?
- Bei welchen Bauteilen/Bauwerken sind andere Baustoffe vorzuziehen?

Antworten auf diese Frage liefern Ansatzpunkte für eine bessere Positionierung von Beton im nachhaltigen Bauen ebenso wie Ideen für eine Kombination von Beton mit anderen Baustoffen. Auf der Grundlage der

vorliegenden Untersuchung kann man beispielsweise folgern, dass sich Beton für grössere Gebäude mit einer langen Nutzungsdauer eignet – insbesondere für Nutzungen mit einem erhöhten Sicherheitsbedürfnis der Nutzer. Gleichzeitig bieten die Geschossdecken ein interessantes Feld für die Entwicklung neuer Bauteile, zur Reduktion des Gewichts, Erhöhung der Lebensdauer und Verminderung des Betriebsenergiebedarfs – beispielsweise durch Bauteilaktivierung.

7. Referenzen

- Achternbosch M., Bräutigam K.R., Hartlieb N., Kupsch C., Richers U. und P. Stemmermann (2003): Heavy Metals in Cement and Concrete Resulting from the Co-incineration of Wastes in Cement Kilns with Regard to the Legitimacy of Waste Utilisation. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6923. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2003.
- Althaus H.-J., Lehmann M. und D. Kellenberger (2008): Ökologische Baustoffliste (v2.06), Empa Abteilung Technologie und Gesellschaft, Dübendorf.
- Arioli M. und M. Haag (2001): Bauabfälle Schweiz-Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege. Band 1 und 2. Umwelt-Materialien Nr. 131, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- BAFU (2008): Ressourcenpolitik Holz. Vorschlag BAFU abgestimmt mit BFE und SECO vom 21.1.2008.
- BAFU (2006): Import und Verwendung von Kohleflugasche und Hochofenschlacke zur Herstellung von Zement und Beton. Vollzugshilfe. Bern: FOEN, 2006.
- BAFU (1997): Abfallentsorgung in Zementwerken – Thesenpapier. Umwelt-Materialien Nr. 70 Abfälle. Bern: FOEN, 1997.
- BAFU (1998): Richtlinie: Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Bern: FOEN, 1998.
- Bartussek, H. (1985): Die Atmungsfähigkeit von Wand- und Deckenkonstruktionen. In: Beton im Wohnbau. Verein der österreichischen Zementfabrikanten. Hrsg: Selbstverlag: Reisnerstrasse 53, 1040 Wien, 1985
- Bauphysik-Taschenbuch (1986/87): Sälzer, Elmar, Gothe, Ulrich. Hrsg: Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1986
- Bebi P., Kytzia S., Lundström C., Walz A., Grêt-Regamey A. und C. Lardelli (2005): NFP48 ALPSCAPE - Schlussbericht, Davos.
- Beton (2005): Nachhaltig bauen mit Beton. Hrsg: InformationsZentrum Beton GmbH, Steinhof 39, 40699 Erkrath, www.beton.org
- BFS (2005): Materialflussrechnung für die Schweiz – Machbarkeitsstudie. Neuenburg 2005.
- Brameshuber W. und A. Vollpracht (2007): Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton – Teilprojekt B2. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens «Nachhaltig Bauen mit Beton». Beuth-Verlag Berlin 2007. S. 225-273.
- BREEAM (2009): The Environmental Assessment Method for Buildings around the World. 2009. www.breeam.org.
- Breyer, G. (1985): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben F 862. Teil 1: Baufeuchte und Austrocknungsdauer von Beton im Wohnbau. (Untersuchungsbericht B 512). Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabriken. (Kurzbericht in: Wohnbauforschung. Jahresbericht 1986. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien)
- BUWAL (2001): Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 2001. Umwelt-Materialien Nr.131, Abfall; Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege; Band 1: Kennwerte
- Calkins M. (2009): Materials for Sustainable Sites. Wiley & Sons New Jersey, 2009.
- DAfStb (2001): Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Sachstandbericht - Nachhaltig Bauen mit Beton, Heft 521. Hrsg: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Fachbereich 07 des NA Bau im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2001
- DAfStb (2007): Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Schlussbericht zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Heft 572. Hrsg: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Fachbereich 07 des NA Bau im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2007
- Dahlhaus, U. und Meisel, U. (2008/09): Nachhaltiges Bauen 08/09. Bauelemente, Kostenwerte, ökologische Bewertung – Arbeitshilfen zur Kostenberechnung und Konstruktionswahl mit Bewertung und Hinweisen für die Bauausführung. Stand 2008/09. Hrsg: Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen GmbH & Co., Essen 2009
- Deutsches Kupferinstitut (2000): Informationsbroschüre: Kupfer - der Nachhaltigkeit verpflichtet. Düsseldorf 2000 (www.kupferinstitut.de)

- DGNB (2009): Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen. Aufbau – Anwendung – Kriterien. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. 2. Auflage 2009. <http://www.dgnb.de>
- DIA Consulting AG (2000): Die Entwicklung der Wiederverkaufswerte von Ein- und Zweifamilienhäusern in Abhängigkeit von der Bauweise. DIA Consulting Aktiengesellschaft, 79098 Freiburg. Kurzfassung des Gutachtens erhältlich unter: http://www.zwk.de/downloads/gutachten_wiederverkaufswerte.pdf [15.07.09]
- Fischer, E.-W. & Schneider, A. (1989): Elektrobiologie. Schriftenreihe gesundes Wohnen. Institut für Baubiologie und Ökologie IBN, D-8201 Neubuurn, 1989
- FSKB (2008): Jahresbericht 2008 des Fachverbands der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie FSKB. www.fskb.ch
- FSHBZ (o.D.): Betonzusatzmittel und unsere Umwelt: Klare Fragen, Klare Antworten. www.fshbz.ch
- Gartner, K. & Winklbaaur, G. (1984): Gesünder wohnen. Orac, Wien, 1984
- Graubner C.-A., Hock C. und C. Schneider (2007): Bewertungshintergrund zur Nachhaltigkeitsbeurteilung – Teilprojekt A1. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens «Nachhaltig Bauen mit Beton». Beuth-Verlag Berlin 2007.S. 9-48.
- Gruhler K., Böhm R., Deilmann C. und G. Schiller (2002): Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe – Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. IÖR-Schriften. Band 38. Dresden 2002.
- Haag C., Gerdes A., Künniger T., Richter K. und F.H. Wittmann (1997): Ökologische Betrachtung zur Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils. Internat. Zeitschrift für Bauinstandsetzen), 3 (2). 1997). S. 167-192.
- Haag M. (2008): Situation der Bauwirtschaft ... wie düster ist die Zukunft? Vortrag am 7. Baukongress am 13. November 2008 in Zürich.
- Haque M.N., Al-Khaiat H. und O. Kayali (2002): Structural Lightweight concrete – an Environmentally Responsible Material of Construction. In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002. P. 306-312.
- Harbi S., Loerincik Y., Margini M. Und Humbert S. (2008): Analyse de cycle de vie de la furniture de gravieres en region Vaudoise, Rapport final, Ecointesys, Lausanne.
- Haselbach L. (2009): Potential for Carbon Dioxide Absorption in Concrete. J. Envir. Engrg. Volume 135, Issue 6, pp. 465-472 (June 2009).
- Hauer B., Klein H., Müller, C., Ruppert J., Schäfer S., Spanka G., Wassing W., Zunzer U., Ramolla S., Rübner K. und B. Meng (2007): Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau – Teilprojekt B1. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens «Nachhaltig Bauen mit Beton». Beuth-Verlag Berlin 2007. S. 131-221.
- Hegger J., Will N., Dressen T., Schneider H.N., Böhle B., Hanenberg N., Brunk M.F., Goer M., Lambertz, M., Zilch K. Niedermeier R., Mühlbauer C. und M. Frantova (2007): Ressourcen- und energieeffiziente, adaptive Gebäudekonzepte im Geschossbau – Teilprojekt C. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens «Nachhaltig Bauen mit Beton». Beuth-Verlag Berlin 2007. S. 275-325.
- IFB (2004): Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau. Institut für Bauforschung e.V. (IFB), Hannover. Forschungsbericht F 815, Juni 2004. Hrsg: Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2005
- IFB (2008): Studie zum Kostenvergleich: Massivhaus / Holzfertighaus, Vorläufiger Schlussbericht (Stand: 02.06.08), Studie IFB-Nr. 18506, Institut für Bauforschung e.V. (IFB), 30163 Hannover. Auftraggeber: Massiv Mein Haus e.V.
- Ionescu A. und T. Hodisan (2002): Demountable Prefabricated Reinforced Structure Designed for Multistorey Car Parks. In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002. P. 466-474.
- ISO 15686-5 (2008): Buildings and constructed assets – Service-life planning. Part 5: Life-Cycle Costing. First edition 2008-06-15.

- Jacobs F. (2000): Beton - ein umweltverträglicher Baustoff, Beton- und Stahlbetonbau, 95, H. 6, 352 - 359 (2000).
- Jauberthie R., Lanos C., Rendell F., Cisse I und S. Tamba (2002): The Use of Cellulose Wastes in Lightweight Concrete: Improvement of Properties by Admixtures. In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002. P. 132-138.
- Jensen B.L. und M. Glavind (2002): Consider the Environment – Why and How? In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002. P. 14-21.
- Karade S.R., Caldiera F., Irle M. and K. Maher, Cork (2002): Cranules as Lightweight Aggregate. In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002. P. 254-261.
- Kasser U. (2009): Dämmstoff-Spider. Visuelle Darstellung der Nachhaltigkeits- und Anwendungsaspekte von Wärmedämmstoffen. Bericht über Methodik und Ergebnisse. Zürich 2009.
- Kasser U. und M. Pöll (1999): Ökologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie, Schriftenreihe Umwelt Nr. 307 Ökobilanzen; 1999; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (Hrsg.), Bern.
- KBOB (2000): Umweltmanagement von Hochbauprojekten – Empfehlungen engagierter Bauherren für ein projektbezogenes Umweltmanagement (PUM). Hrsg: KBOB Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes & IPB Interessengemeinschaft privater professioneller Bauherren, März 2000
- Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N. und T. Künniger (2003): Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent 2000 No. 7, EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- KMU Zentrum Holz (2006): Wood Monitoring Public 2006. Hrsg: KMU Zentrum Holz, c/o Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, CH-2504 Biel-Bienne. www.kmuzentrumholz.ch
- Knauff A. und C.-A. Graubner (2008): Ökobilanzstudie – Gegenüberstellung Massivhaus /Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40. Forschungsbericht F04-8-2008 des Instituts für Massivbau an der Technischen Universität Darmstadt. Darmstadt 2008.
- Koide H., Tomon M. and Sasaki T. (2002): Investigation of the Use of Plastic as an Aggregate for Lightweight Concrete. In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002. P. 178-185.
- Kolb, B. (1988): 1000 Tips zum Bauen und Wohnen. Blok Verlag, München, 1988
- Kolbitsch, A. (1995): Bauphysikalisch mangelfreie Konstruktionen mit zement-gebundenen Baustoffen. In: Beton. Hrsg: Verlag des Österreichischen Instituts für Baubiologie und -ökologie. Wien, 1995
- Kritzinger, H.-H. (1958): Von elektrobiologischen Vorzügen des Holzhauses. Mitt. d. D. Ges. f. Holzforsch. Heft 43, 1958
- Kohler, N. (2004): Wieviel Beton ist in einem Haus? In: Hassler U. und H. Schmidt, Häuser aus Beton – Vom Stampfbeton zum Grosstafelbau.
- Kopytziok N. (2005): Handbuch für Abfall- und Umweltberatung, Berlin 2005.
- Körper, A. & Kaufmann, Ph. (2007): Die Schweizer Bauwirtschaft – zyklische Branche mit strukturellen Problemen. In: Die Volkswirtschaft, Das Magazin für Wirtschaftspolitik, Nr. 11 – 2007. S. 36-40
- Künniger, T. und K. Richter (1995): Ökologischer Vergleich von Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armierten Beton und korrosionsgeschütztem Stahl.Forschungsbericht, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf 1995.
- Künniger T., Werner F. und Richter K. (20010): Ökologische Bewertung von Kies, Zement und Beton in der Schweiz. Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf 2001.
- Künniger, T. und K. Richter (1998): Ökologische Bewertung von Eisenbahnschwellen in der Schweiz. Streckenschwellen aus vorgespanntem Beton, Profilstahl und teerölimprägniertem Buchenholz. Forschungsbericht 115/38, EMPA, Dübendorf 1998, 185 S.

- Künzel, H. (1986): Wärmeschutz – Feuchteschutz – Heizenergieverbrauch. In: Beckert, J.; Mechel, F.P.; Lamprecht, H.-O. Hrsg: *Gesundes Wohnen: Wechselbeziehungen zwischen Mensch und gebauter Umwelt; ein Kompendium*. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1986
- Kytzia S., Seyler C., Leuz A.-C. und A. Johnson (2008): *Sustainable Development of the Built Environment. Evaluation of structural changes in the Swiss building industry, Final Scientific report (405440-107105)*. Rapperswil 2008.
- Kytzia S., Schnellmann R., Scherrer B. und P. Hardegger (2008): *CO₂ – Footprint Böschungsstabilitätsverfahren: Tecco System (Netz) im Vergleich zu Spritzbeton. Schlussbericht einer Studie im Auftrag der Geobrug AG (unveröffentlicht)*. Rapperswil 2008.
- Lang, J. (1985): *Die bauphysikalischen Eigenschaften von Beton*. In: *Beton im Wohnbau*. Verein der österreichischen Zementfabrikanten. Hrsg: Selbstverlag: Reisnerstrasse 53, 1040 Wien, 1985
- Leitgeb, N. (1990): *Strahlen, Wellen, Felder. Ursachen und Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt*. Thieme, Stuttgart, 1990
- Lenke, R. & Bonzel, J. (1975): *Luftelektrische Felder in umbauten Räumen und im Freien*. Beton (1975), Heft 11, S. 387-390 und Heft 12, S. 425-430. Nachdruck in: *Zement und Beton* 21 (1976) Heft 1, S. 9-19. Weiters veröffentlicht in: *Betontechnische Berichte* (1975)
- Lichtensteiger T., Henseler G., Pedraza A., Wittmer D. und P. Baccini (2006): *Exploration regionaler Gebäudelager*. In: Lichtensteiger T. (Hrsg.), *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender*. Vdf Zürich 2006. S. 13-26.
- Lichtensteiger, Th. et. al. (2006): *Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender*. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich
- Massiv mein Haus e.V. (k.A.): *Kostenvergleich zwischen Massivhäusern aus Mauerwerk + Beton und Häusern in Leichtbauweise am Beispiel durchgeführter Bauprojekte*. Massiv mein Haus e.V., Falkensteinstrasse 9, 86316 Friedberg, www.massiv-mein-haus.de
- Matasci C. (2006): *Life Cycle Assessment of 21 buildings: analysis of different life phases and highlighting of main causes of their impact on the environment*. Master thesis für den «master of sciences naturelles d'environnement» an der Universität Genf. Genf 2006.
- Mauer-Dietrich, U. (1995): *Thesen und Kriterien zur Herausbildung zeitgemässer Architektursprachen, reflektiert auf gestalterische Eigenschaften des Betons*. In: *Beton*. Hrsg: Verlag des Österreichischen Instituts für Baubiologie und -ökologie. Wien, 1995.
- Maurer-Dietrich, U. (2001), *Oberflächen wirken*, Zeitschrift Baubiologie 2/2001.
- Maurer-Dietrich, U. (2007), *Den Schulbau neu denken, fühlen und wollen. Erneuerung der Fundamente, Entwicklung von Leitbildern und Perspektiven jenseits der Moderne*, bouwstenen Nr. 121, faculteit bouwkunde, Eindhoven, S. 127 – 149.
- Müller D. (1998): *Modellierung, Simulation und Bewertung des regionalen Holzhaushaltes*. Diss ETH, Zürich 1998.
- Müller D. (2006): *Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands*. *Ecological Economics*, 59 (2006), 142-156
- Müller N. und J.Harnisch (o.D.), *A blueprint for a climate friendly cement industry*. WWF International Gland. http://www.panda.org/what_we_do/how_we_work/businesses/climate/climate_savers/
- Naik T. (2002): *The role of combustion by-products in sustainable construction materials*. In: Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), *Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002*. P. 117-130.
- Nixon P.J. (2002): *More sustainable construction: The role of concrete*. In: *Sustainable Concrete Construction*. In Dhir R. K., Dyer T. D. and J.E. Halliday (eds.), *Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotlan UK on 9-11 September 2002*. P. 2-12
- Novatlantis (2004): *Novatlantis – Nachhaltigkeit im ETH Bereich, 2004. Baustoff-management 21 – Stand des Wissens und Forschungsbedarf, Schlussbericht September 2004*.
- Pohlenz, R. (1987): *Der schadenfreie Hochbau. Band 3: Wärmeschutz, Tauwasserschutz, Schallschutz*. Verlag Rudolf Müller, Köln 1987

- Preisig, H. (2002): Massiv- oder Leichtbauweise? In: tec21, Sonderdruck aus Heft 42/2002
- Preisig, H. & Kasser U. (2005): Lebenszykluskosten – Nutzen oft teurer als Bauen. In: Jahresbericht 2005 der Gruppe der Schweizerischen Bauindustrie
- Rast, H. (2005): Berufsbedingte Hautkrankheiten. In: aha!news, Nr. 3, September 2005, S. 8-9
- Redle M. und P. Baccini (1998): Stadt mit wenig Energie, viel Kies und neuer Identität. Gaia 7 (1998), S. 182-195.
- Redle M. (1999): Kies- und Energiehaushalt urbaner Regionen, Diss ETH, Zürich 1999.
- Rubli, S. (2005): Materialflussrechnung für die Schweiz – Machbarkeitstudie. Hrsg: Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel 2005
- Schwarz J. (1991): Ökologie im Bau. Entscheidungshilfen zur Beurteilung und Auswahl von Baumaterialien. Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart 1991.
- Seyler C., Oetjen, L., Bader H.P., Scheidegger R. und S. Kytzia (2007): Potentials for Mineral Construction Wastes as Secondary Resources in Switzerland – Case Study on Concrete Wastes. In: Hilty L, Edelmann X, Ruf A, editors. Proceedings of the R'07 World Congress on Recovery of Materials and Energy for Resource Efficiency. Davos (Switzerland), 2007.
- Seyler C. (2003): Ein inputabhängiges Ökoinventar-Modell für die thermische Verwertung von Abfall-Lösungsmittel in der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Ph.D. Thesis at the ETH Zurich no. 15089. Zürich: ETH Zurich, 2003.
- Seyler C., Hellweg S., Monteil M. und K. Hungerbühler (2005): Life Cycle Inventory for Use of Waste Solvent as Fuel Substitute in the Cement Industry. International Journal of Life Cycle Assessment 2005;10(2):120-130.
- SIA (2009), Norm SIA 380/1 «Thermische Energie im Hochbau». Zürich 2009.
- SIA (2006): SIA Effizienzpfad Energie. Dokumentation D 0216. Zürich 2006.
- SIA (2005): Nachhaltiges Bauen – Hochbau. Ergänzungen zum Leistungsmodell SIA 112. Empfehlung SIA 112/1. 2. Auflage Muttenz 2005.
- SIA (2004): SNARC Systematik zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Architekturprojekten für den Bereich Umwelt. Dokumentation D 0200. Zürich 2004.
- Sigg, R., Kälin, W. & Plattner, H. (2006): LUKRETIA Lebenszyklus – Ressourcen – Technisierung. 14. Schweizerisches Status-Seminar «Energie- und Umweltforschung im Bauwesen», Sept. 2006 – ETH Zürich. Download unter http://www.brenet.ch/pdfstat/lca_sigg.pdf [05.07.09]
- Sinnesbichler H., Lindauer E., Heusler I und H. Erhorn (2007): Energieeffiziente Bauwerke aus beton – Teilprojekt C3. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens «Nachhaltig Bauen mit Beton». Beuth-Verlag Berlin 2007. S. 327-340.
- Steinert, J. (1989): Bestimmung der Austrocknungszeit von Neubauten. IRB Verlag Stuttgart. Best.Nr. T2102. Kurzfassung in : Kurzberichte aus der Bauforschung (1989) Nr. 10, Bericht Nr. 152
- Stoy, C. & Schalcher, H-R. (2007): Residential Building Projects: Building Cost Indicators and Drivers. In: Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 133, No. 2, pp. 139-145
- TFB (1999): Schutz vor Hautkrankheiten durch Zement. In: TFB Cementbulletin, Sondernummer, März 1999
- Tichelmann, K. (2007): Schwerpunkt Wirtschaftlichkeit – Eigenschaften und Potentiale des Leichtbaus, Studie Teil 3, Stand 2007. Im Auftrag von BAU.GENIAL. Erhältlich auf www.baugenial.at [05.07.09]
- Ting M., Koomey J. und M. Pomerantz (2001): Preliminary Evaluation of the lifecycle costs and market barriers of reflective pavements. Energy Analysis Department. Environmental Energy Technologies Division. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA 94720 <http://enduse.lbl.gov/Projects/pavements.html>. November 2001.
- VDZ (2005): Verminderung der CO₂-Emissionen, Monitoring-Bericht 2000-2003. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, Februar 2005
- Waltjen, C. (1995): Über die Gestaltung von Bauwerken aus Beton. In: Beton. Hrsg: Verlag des Österreichischen Instituts für Baubiologie und -ökologie. Wien, 1995

- Waltjen, T. (1995): Beton – Dokumentation einer Kontroverse. In: Beton. Hrsg: Verlag des Österreichischen Instituts für Baubiologie und –ökologie. Wien, 1995
- WertR (2006): Richtlinien für die Ermittlung der Verkehrswerte (Marktwerte) von Grundstücken. (Wertermittlungsrichtlinien – WertR 2006). Deutsches Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), www.bmvbs.de
- Winter, S. & Kehl, D. (2002): Objektive Verkehrswertermittlung von Holzgebäuden im Vergleich zu Massivbauten – Endergebnisse. In: Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER), No.7, 2002
- World Business Council for Sustainable Development (2009): Recycling Concrete. The Cement Sustainability Initiative. www.wbcscd.org
- US Green Buildings Council (2002): LEED – Green Buildings Rating System for New Construction and Major Renovations. Version 2.1. 2002. http://www.usgbc.org/Docs/LEEDdocs/LEED_RS_v2-1.pdf