cemsuisse Forschungsförderung

Self Compacting Concrete (SCC): Nachhaltigkeit

Schlussbericht, April 2006

Verfasser:

Dr. Giovanni Martinola und Dr. Martin F. Bäuml
Concretum Construction Science AG

1. Das Wichtigste in Kürze

Selbstverdichtender Beton (SVB) unterscheidet sich von herkömmlichen Betonen durch eine sehr hohe Fliessfähigkeit in frischem Zustand. Betonbauteile aus SVB werden im Gegensatz zu herkömmlichen Betonen ohne zusätzliches Verdichten hergestellt. Durch die Eliminierung dieses Arbeitsschrittes soll eine höhere Gefügehomogenität und damit eine höhere Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken erzielt werden. Beim Einsatz von SVB ergeben sich neue Möglichkeiten für die nachhaltige Herstellung und den nachhaltigen Unterhalt von Betonbauwerken.

Bei der Verbesserung der Nachhaltigkeit wird die Verwendung der unterschiedlichen Ressourcen optimiert. Ziel ist es, ökologischer, sozialer und ökonomischer zu bauen. Am Beispiel eines bestimmten Betonbauteils wird mit Hilfe einer Produktökobilanz und einer Lebenszykluskostenberechnung überprüft, wie sich die Verwendung von SVB im Vergleich zu herkömmlichem Beton auf die Nachhaltigkeit auswirkt.

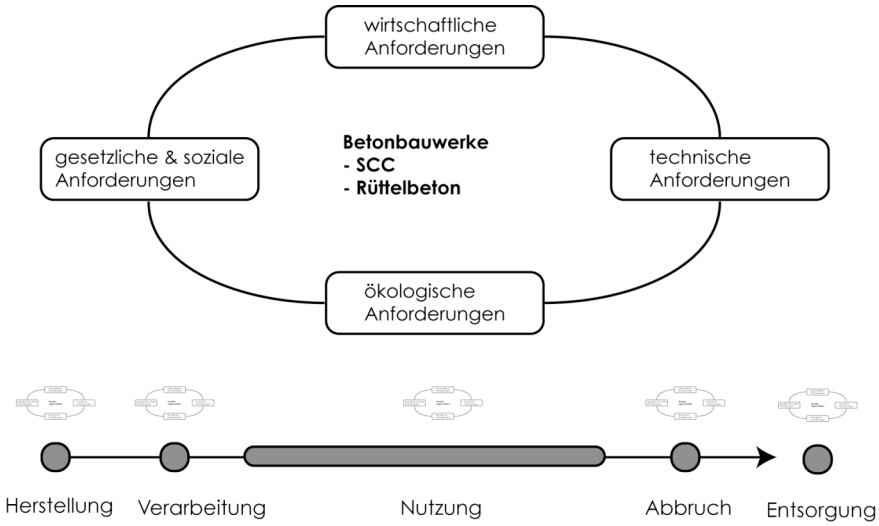

Abbildung 1: Aspekte der Nachhaltigkeit und Definition des Lebenszyklus

Aus den Analysen ist ersichtlich, dass die Berücksichtigung der höheren Dauerhaftigkeit von SCC immer dann von ökologischer Bedeutung ist, wenn bei der Ökobilanzierung der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird. Der Hauptgrund dafür ist die enorme ökologische Auswirkung aufwendiger Betoninstandsetzungen.

Durch die einfachere Verarbeitbarkeit von SVB kann Arbeitszeit und/oder Arbeitsleistung eingespart werden. Diese Einsparung kann 50% und mehr betragen. Die positive soziale Folge dieser Einsparung ist die Reduktion von Langzeiterkrankungen sowie des Risikos von Unfällen infolge der als gefährlich einzustufenden Arbeit des Betoneinbaus.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass der SVB im Vergleich zum RB in allen Bereichen hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit als äquivalent oder besser einzustufen ist.

Im Rahmen dieses Projektes wurden relevante Erkenntnisse für wichtige Prozesse in der Baubranche gewonnen.

2. Projektvoraussetzungen und Ziele

2.1 Einleitung

Unter dem Begriff Nachhaltigkeit versteht man den optimalen Ressourceneinsatz zur Erreichung eines bestimmten Ziels. Hintergrund dieser Optimierung ist ein Spannungsfeld zwischen gesetzlichen Vorgaben, technischer Machbarkeit und den wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Auswirkungen.
Gleichzeitig steht bei der nachhaltigen Dimensionierung von Produkten der gesamte Lebenszyklus des Produktes im Vordergrund. Grundgedanke ist es, zu verhindern, dass Suboptimierungen in den einzelnen Phasen des Lebenszyklus durchgeführt werden.
Die Optimierung eines Bauteiles hinsichtlich Nachhaltigkeit ist in Abb. 1 schematisch gezeigt.

2.2 Ziel der Forschungsaufgabe

Es soll am Beispiel konkreter Stahlbetonbauteile mit bestehenden, geeigneten ökologischen Bewertungsmethoden überprüft werden, wie sich eine höhere und gleichbleibende Betonqualität beim SVB im Vergleich zum normalen Rüttelbeton auf die Nachhaltigkeit der beiden Bauweisen auswirkt. Drei Aspekte der Nachhaltigkeit sollen hierbei betrachtet werden: ökologische, ökonomische und soziale.

2.3 Lösungsansatz

Am Beispiel dreier unterschiedlicher Stahlbetonbauteile wird anhand der Produktökobilanz und der Lebenszykluskostenberechnung unter Berücksichtigung eines sozialen Schutzziels (Gesundheit) die Nachhaltigkeit der Bauweise in SVB und in RB analysiert. Die gewählte Methodik für jeden der drei Aspekte der Nachhaltigkeit, sowie die entsprechenden Werkzeuge und Bewertungsverfahren sind in Tab. 1 zusammengefasst.

	ökologische Aspekte	**Soziale Aspekte**	**Ökonomische Aspekte**
Methodik	Ökobilanzierung	Schutzzieläquivalenz (Gesundheitsschutz)	Lebenszykluskosten-berechnung
Werkzeuge	Produktökobilanz	Ausgleichskosten- und Folgekostenrechnung	Investitionsrechnung
Bewertung	Normalisierung und gemeinsame Bewertung durch Verrechnung der Kosten	gemeinsame Bewertung durch Verrechnung der Kosten	gemeinsame Bewertung durch Verrechnung der Kosten

Tabelle 1 – Ansatz und Instrumente zur Bearbeitung der Frage der Nachhaltigkeit von SVB und RB

2.4 Systemdefinition

Die ökologische, ökonomische und soziale Analyse wird an drei unterschiedlichen Stahlbetonbauteilen durchgeführt, die mit Transportbeton hergestellt werden können.
Als geeignete Bauteile bzw. Bauwerke wurden ein Quertunnel (Verbindungstunnel zwischen zwei Tunnelhauptröhren), ein Hotel (Crowne Plaza, Genf) und ein Brückenkonsolkopf gewählt. Bei allen drei beträgt die erwartete Lebensdauer 100 Jahre. In Abb. 2 sind die drei Objekte dargestellt.

Abbildung 2: Untersuchte Bauobjekte: Quertunnel, Hotel Crowne Plaza und Brückenkonsolkopf

Die Auswahl dieser Bauteile wurde aufgrund der verfügbaren Dokumentationen getroffen. Dahlaus et al (1) haben eine interessante Arbeit über den wirtschaftlichen Einsatz von SVB im Tunnelbau publiziert. In diesem Artikel wurde die Realisierung eines Quertunnels in zwei unterschiedlichen Varianten (SVB und RB) im Detail kalkuliert. Eine Reihe von detaillierten Informationen konnten für diese Studie benutzt werden.

Das Hotel Crowne Plaza wurde im Jahr 2002 erstellt. Bei diesem Objekt konnten praktisch alle Betonierarbeiten auf der Baustelle mit SVB realisiert werden. Eine Reihe von zuverlässigen Informationen sind verfügbar und konnten direkt verwendet werden.

Brückenkonsolköpfe sind stark exponierte und belastete Stahlbetonelemente. Aufgrund der hohen Anforderungen ist der Einsatz sehr dauerhafte Betone entscheidend. Dieses Bauteil eignet sich gut für den Einsatz von SVB. Einerseits aufgrund der höheren Gefügehomogenität von SVB und andererseits, da das Verdichten von stark armierten Bauteilen mit RB oft problematisch ist.

Die wichtigsten Angaben der drei Objekte sind in Tab. 2 aufgelistet.

	Quertunnel	**Hotel Crowne Plaza, Genf**	**Brückenkonsolkopf**
Abmessungen	Länge: 50 m Breite: 5.4 m Blocklänge: 5.0 m	Länge: 75 m Breite: 13 m	Länge: 120 m
Betonvolumen	160 m^3	Total: 10'000 m^3 Nur Tiefgarage: 700 m^3	32 m^3
Exponierte Betonoberfläche	Gewölbe: 450 m^2	Tiefgarage: 1540 m^3	160 m^2
Verhältnis: Beton-vol. / -oberfläche	0.4 m^3/m^2	Total: 6.5 m^3/m^2 Tiefgarage: 0.45 m^3/m^2	0.2 m^3/m^2
Personalreduktion bei den Betonierarbeiten durch die Verwendung von SVB	60%	75%	60%
Quellen	Ref (1)	Ref (2)	intern

Tabelle 2 – Analysierte Bauobjekte

Bei der Analyse dieser Objekte wurden die folgenden Betonrezepturen angenommen.

	Zement CEM II	**Flugasche**	**Zuschlag (Moränekies)**	**Fliessmittel (Polykarboxylat)**	**Wasser**	**Betondichte**	**w/z_{eq} Wert**
RB	300 kg/m^3	0 kg/m^3	1'900 kg/m^3	2.25	150 kg/m^3	2.40 kg/l	0.50
SVB	420 kg/m^3	80 kg/m^3	1'600 kg/m^3	6.3	200 kg/m^3	2.35 kg/l	0.44

Tabelle 3 – Betonrezepturen

Diese Standardrezepturen werden in grossen Mengen in der Schweiz produziert. Für die Durchführung der ökonomischen Analyse wurden folgenden Betonpreise (geliefert) angenommen:
- RB : 100 SFr/m^3
- SVB: 160 SFr/m^3

Das Verdichten des Betons ist ein sehr wichtiger Arbeitsschritt bei der Bauteilherstellung. Ein zu intensives Verdichten führt oft zu einer Entmischung des Betons. Wenn der Beton zu wenig verdichtet wird, ist mit Kiesnestern zu rechnen. Bei der Realisierung von Tunneln wird oft mit Gleitschalungen gearbeitet. In diesem Fall erfolgt das Verdichten mittels Oberflächenrüttlern, die direkt auf der Schalung montiert sind. Die Verdichtungsarbeiten während des Betonierens von einfacheren Bauteilen werden meist mit Flaschenrüttlern durchgeführt.

	Verdichtungsenergie Flaschenrüttler	Verdichtungsenergie Oberflächenrüttler
Bauteil	Hotel / Konsolkopf	Quertunnel
RB	0.3 kWh/m^3	2.0 kWh/m^3
SVB	0.0 kWh/m^3	0.0 kWh/m^3

Tabelle 4 – Benötigte Verdichtungsenergie

Die Dauerhaftigkeit eines Bauteils ist abhängig von der Beständigkeit des betreffenden Werkstoffes gegenüber unterschiedlichen Schadensmechanismen. Die häufigsten Schadensmechanismen sind das Eindringen von Chloriden, das Carbonatisieren und der Angriff durch aggressive Wässer. Der Widerstand des Werkstoffes gegen solche Schädigungsmechanismen ist von mehreren Parametern abhängig:

- *Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert)*:
Je weniger Wasser verwendet wird, desto kompakter und dichter wird der Zementstein. Wird der Beton mit einem hohen w/z-Wert hergestellt, so bleibt das überschüssige Wasser im Zementstein und bildet dort Kapillarporen. Diese Poren sind massgebend für das Eindringen von Schadstoffen in das Bauteil. Die Zugabe von Verflüssiger ermöglicht die Reduktion der Anmachwassermenge bei gleich bleibender Verarbeitbarkeit. Der w/z-Wert wird dadurch herabgesetzt und die Dichtigkeit sowie die Dauerhaftigkeit des Betons erhöht.

- *Einsatz von Puzzolanen:*
Puzzolane sind kieselsäurehaltige oder kieselsäure- und tonerdehaltige natürliche Stoffe ohne selbstständiges Abbindevermögen, die zusammen mit Wasser und Calciumhydroxid zu Zementstein reagieren. Durch diese vergleichsweise langsame Reaktion wird die Kapillarporosität des Zementsteins reduziert und somit die Dichtigkeit des Betons erhöht.
Der Einsatz von Flugasche im SVB führt zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit und zu einer Steigerung der Dauerhaftigkeit.
Vergleichende Untersuchungen (3) zwischen RB und SVB zeigen, dass beim SVB die Frost-Tausalz-Beständigkeit durch den Puzzolaneinsatz und den reduzierten w/z-Wert grösser ist als diejenige von RB (siehe Abb. 3).

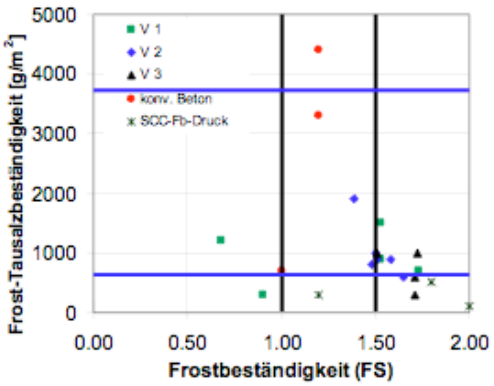

Abbildung 3: Vergleich der FT-Beständigkeit von RB und SVB nach (3)

SVBs werden mit vergleichsweise hohen Zementdosierungen und niedrigen w/z-Werten hergestellt. Mit diesen Merkmalen können solche Betone nach der Empfehlung der Norm SN EN 206-1:2000 für stark exponierte Stahlbetonbauwerke eingesetzt werden.

Festlegung des Lebenszyklus
Die Analyse der Nachhaltigkeit umfasst den gesamten Lebenszyklus der Bauteile. In Abb. 4 ist der betrachtete Gesamtlebenszyklus eines Bauteils schematisch dargestellt.

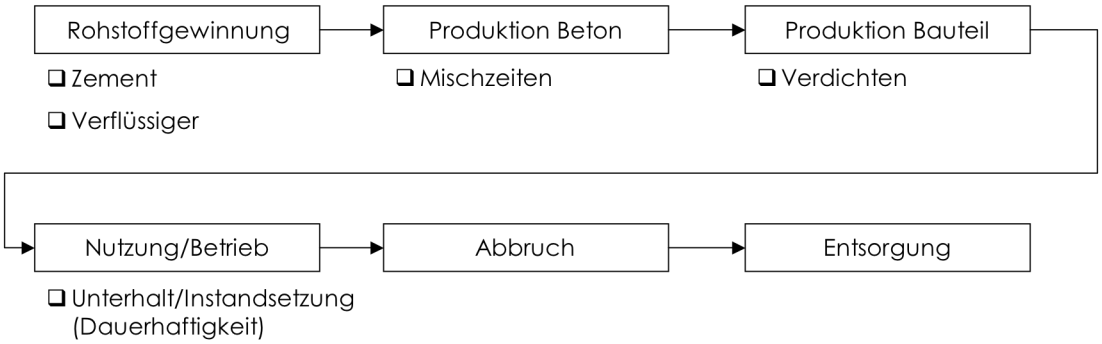

Abbildung 4: Schematische Darstellung des betrachteten Lebenszyklus

Nach der Herstellung des Bauteils beginnt die Nutzungsphase. Während dieser Phase sind Unterhalts- und Sanierungsmassnahmen notwendig. Abhängig von der Dauerhaftigkeit des eingesetzten Werkstoffes sind entsprechende Massnahmen vorzusehen. Aufgrund der höheren Dauerhaftigkeit des SVBs ist eine reduzierte Anzahl an Sanierungsmassnahmen notwendig. Im Fall des Szenarios A wurden innerhalb von 100 Jahren zwei Sanierungsmassnahmen für den RB (alle 33 Jahre) und nur eine (nach 50 Jahren) für den SVB vorgesehen, bevor das Bauteil abgebrochen wird. Dieses Szenario ist in Abb. 5 schematisch dargestellt.

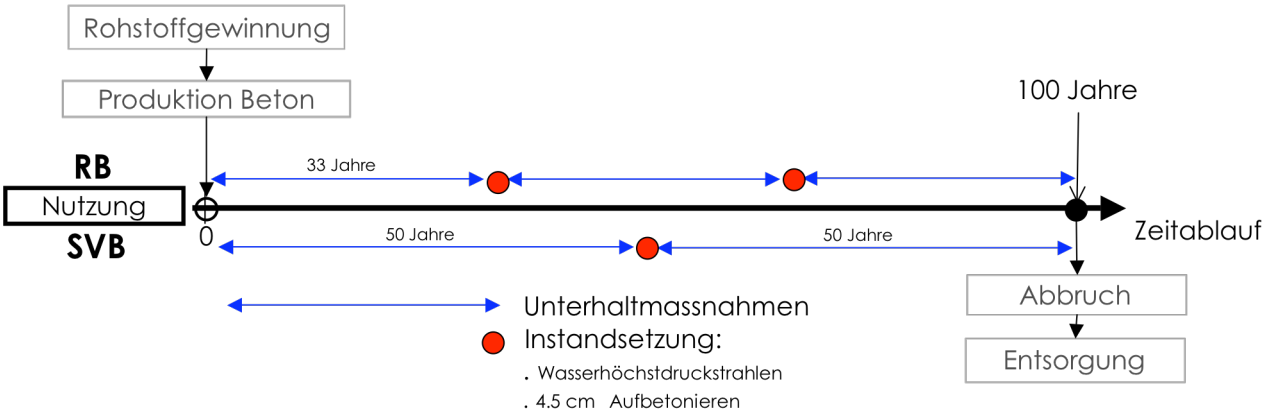

Abbildung 5: Lebenszyklus für Szenario A

Bei den Szenarien B und C wurden drei Sanierungsmassnahmen für den RB und eine für den SVB bzw. drei für den RB und zwei für den SVB vorgesehen. Abb. 6 zeigt alle drei betrachteten Szenarien.

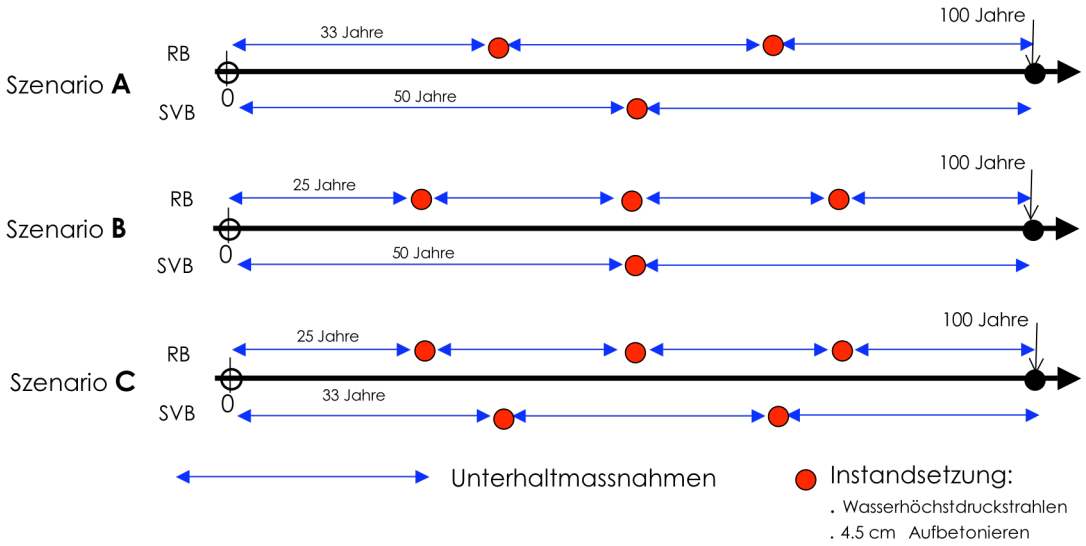

Abbildung 6: Übersicht der Szenarien A, B und C

Bei der Instandsetzung der Bauteile werden nur die exponierten Betonoberflächen behandelt. Die schadhafte (z.B. chlorid-kontaminierte) Betonüberdeckung wird mit Wasserhöchstdruckanlagen abgetragen. Anschliessend wird mit einer neuen Betonschicht reprofiliert.
In Abb. 7 sind die instandgesetzten Betonbereiche der drei untersuchten Bauteile dargestellt.

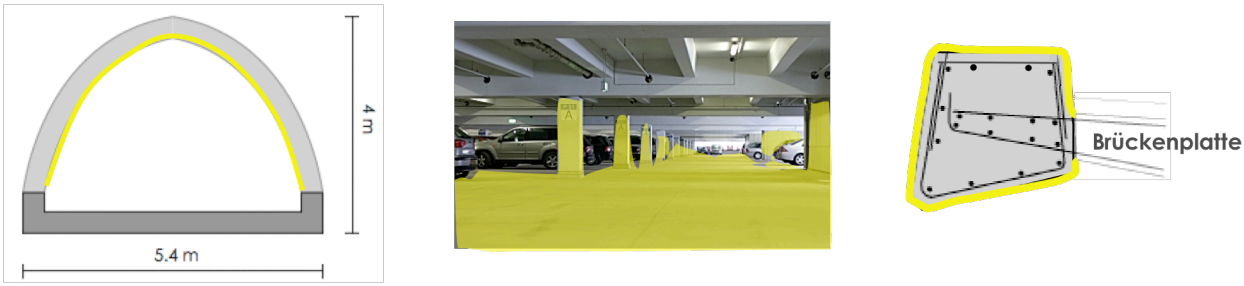

Abbildung 7: Instandgesetzte Flächen

3. Durchgeführte Arbeiten

3.1 Einleitung

Die Analyse der Nachhaltigkeit umfasst drei Gebiete. In Tab. 5 sind die Arbeitsschritte jedes untersuchten Gebietes zusammengestellt.

ökologische Aspekte	soziale Aspekte	ökonomische Aspekte
Systemabgrenzung	Definition der Schutzziele	Berechnung der Herstellungskosten
Ökobilanzierung der Werkstoffe	Festlegung der Gefährdungsklassen	Berechnung der Lebenszykluskosten (Investitionsrechnung)
Ökobilanzierung des Bauwerkes	Abschätzung des Risikos	Abschätzung der indirekten Kosten (Verkehrsbehinderungen, etc.)
Berechnung unterschiedlicher Szenarien	Abschätzung des vermeidbaren Schadens (monetär)	Berechnung unterschiedlicher Szenarien

Tabelle 5 – Überblick der durchgeführten Arbeiten

3.2 Ökologische Bewertung

Die Ökobilanz dient zur Erfassung des Einflusses eines Prozesses, einer Massnahme oder eines Produktes auf die Umwelt. Sie kann dazu verwendet werden, unterschiedliche Prozesse oder Produkte zu vergleichen. Ausgegangen wird von den Rohstoffen aller zur Produktion des Endproduktes eingesetzten Stoffe. Anschliessend werden alle Umwandlungsprozesse betrachtet, die vorgenommen werden müssen, um aus den einzelnen Rohstoffen das gewünschten Endprodukt herzustellen.

Für jeden Herstellungsprozess und für den Zeitraum der Nutzung und Entsorgung des Produktes werden der Energieverbrauch und die beim Prozess entstandenen Emissionen (Gase, Schadstoffe, Abfälle) berechnet.

Durch die Integration der Schritte Herstellung (Beton und Bauteil), Nutzung (Unterhalt, Sanierung) und Entsorgung eines Produktes wird der gesamte Lebenszyklus dieses Produktes berücksichtigt.
In Abb. 8 ist eine Darstellung der ökologischen Bewertungsmethodik angegeben.

Anschliessend werden diese bilanzierten Emissionen und der Energieverbrauch, die während des Lebenszyklus anfallen, hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt untersucht und unterschiedlichen Wirkungskategorieen zugeordnet. Ein Beispiel für die Zuordnung der Emissionen zu Wirkungskategorieen ist die Wirkung von Abgasen aus Diesel auf den Treibhauseffekt. Die Emissionen unterschiedlicher Substanzen werden auf die Menge einer bestimmten Referenzsubstanz umgerechnet, die bezüglich einer Wirkungskategorie die gleiche Wirkung zeigt. Die berücksichtigten Wirkungskategorieen sind ebenfalls in Abb. 8 dargestellt.

Die einzelnen Wirkungskategorieen können nicht miteinander verglichen werden, weil es nicht möglich ist, bei unterschiedlichen Grössen festzustellen, welche Umweltauswirkungen kurzfristig oder längerfristig der Umwelt den grösseren Schaden zuführen.
Dieses Modell der Ökobilanz (Modell des CML Leiden) erlaubt also lediglich, die Umwelteinflüsse ohne Bewertung aufzuzeigen.

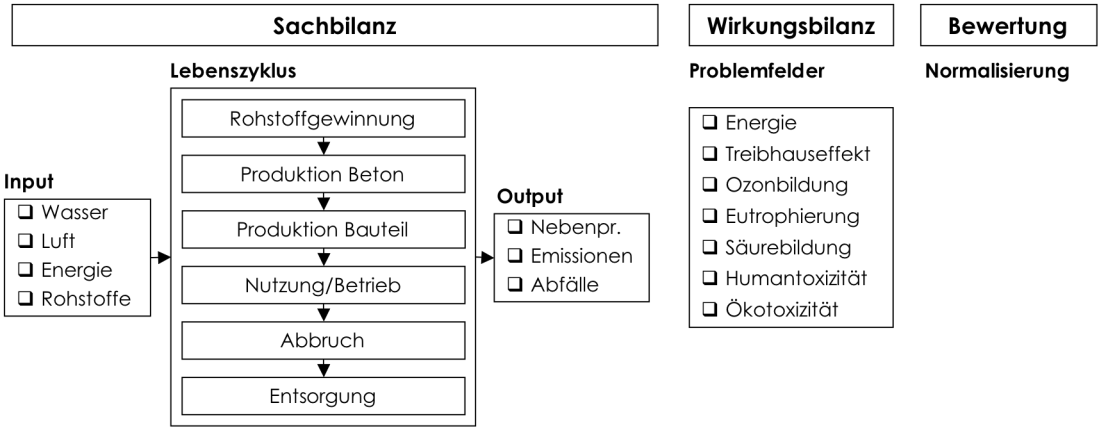

Abbildung 8: ökologische Bewertungsmethodik

Als Normalisierung bezeichnet man den Vergleich der berechneten ökologischen Auswirkungen eines Produktes mit den ökologischen Auswirkungen einer definierten Region. In der vorliegenden Arbeit wurden für Normalisierungen die Auswirkungen der jährlichen anthropogenen Schadstoffemissionen im Raum West-Europa (als Schnitt über die Jahre 1990-1994) gemäss (4) angesetzt. Die absoluten Werte mit den angegebenen Datenunsicherheiten sind in Tab. 6 aufgeführt.

ökologische Probleme	Energie	Treibhauseffekt	Ozonbildung	Eutrophierung	Säurebildung
Einheit	MJ	kg CO_2 – Äq.	kg C_2H_4- Äq.	kg PO_4-Äq.	kg SO_2-Äq.
Wert	$1.19 \cdot 10^{14}$	$4.2 \cdot 10^{12}$	$6.30 \cdot 10^{9}$	$1.58 \cdot 10^{10}$	$3.40 \cdot 10^{10}$

Tabelle 6 – Normalisierungswerte: jährliche Auswirkungen anthropogener Schadstoffemissionen im Raum Westeuropa (4)

Treibhauseffekt
Beim Treibhauseffekt wird angenommen, dass Wasserdampf, Kohlendioxid und andere Gase (Freone, Halone wie $CFCl_3$, sowie Methan, Ozon und Lachgas) die Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung), die durch die Erdoberfläche abgestrahlt wird, abfangen und nahezu vollständig auf die Erde zurückstrahlen. Eine Zunahme solcher Gase in der Atmosphäre hätte eine Erwärmung der Erdoberfläche zur Folge.

Ozonbildung
Unter photochemischem Smog versteht man jene Mischung aus gesundheitsschädlichen und reaktionsfreudigen Gasen (sogenannten Photooxidantien, z.B. Ozon, aber auch Aldehyde und Peroxy-Nitro-Verbindungen), die sich in der unteren Troposphäre, d.h. über der Erdoberfläche, bilden, wenn Sonneneinstrahlung auf anthropogene Emissionen (vor allem Stickoxide und flüchtige organische Kohlenwasserstoffe aus Verbrennungsgasen) trifft.

Eutrophierung
Unter Eutrophierung versteht man die Überdüngung eines Umweltmediums mit Nährstoffen mit dem Resultat einer Erhöhung der biologischen Produktion. Von Eutrophierung spricht man gewöhnlich im Zusammenhang mit Oberflächengewässern. Ein Resultat der Überdüngung ist häufig eine Anreicherung von Phosphat im Wasser. Phosphat ist ein essentieller, limitierender Grundstoff für den Aufbau vieler wichtiger Moleküle eines Organismus.

Säurebildung
Die Versauerung des Bodens ist eine Konsequenz des sauren Regens. Während die im Regen enthaltenen starken Säuren (Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure) in kalkhaltigem Boden neutralisiert werden können, schädigen sie bei kalkarmen Böden die Baumwurzeln, waschen Nährstoffe aus und können zu Waldsterben führen.

Humantoxizität
Die Humantoxizität stellt ein Mass für die toxische Wirkung einer Emission auf Menschen dar. In dem Modell von Heijungs (5) wird davon ausgegangen, dass sich die emittierten Schadstofffrachten gleichmässig im entsprechenden Umweltmedium ausbreiten und daher entsprechend verdünnt werden.

Durch Multiplikation dieser Konzentration mit der Menge Luft bzw. Wasser, die ein Mensch durchschnittlich täglich einatmet oder einnimmt, wird die tägliche Belastung errechnet und mit als zulässig angenommenen Grenzwerten für die spezifische Substanz verglichen.

Ökotoxizität
Die Ökotoxizität stellt ein Mass für die toxische Wirkung einer Emission auf die Umwelt dar. Auch hier wird von einer gleichmässigen Verdünnung der Schadstofffracht ausgegangen.

Grundannahme der Bilanzierung
Die durchgeführte ökologische Analyse umfasst Auswirkungen des gesamten Lebenszyklus dreier unterschiedlicher Betonbauteile aus RB und SVB. Dabei werden die Phasen der Rohstoffgewinnung, Betonherstellung, Verarbeitung, Nutzung, Abbruch und Entsorgung zunächst getrennt betrachtet, und anschliessend zu anwendungsspezifischen Szenarien zusammengefügt (siehe Abb. 5 und Abb. 6). Die ökologischen Auswirkungen können damit eindeutig den einzelnen Modulen zugeordnet werden.

Für sämtliche Prozesse wurden die relevanten Stoffe bis zurück zu den Rohstoffen bilanziert. In umfassenden Studien wurden Prozessdaten zu grundlegenden Prozessen der Energieerzeugung resp. der Entsorgung erfasst. Diese Daten sowie das Computerprogramm EMIS der Firma Carbotech, Basel, waren wichtige Instrumente des vorliegenden Projektes. Die Basisrezepturen für die Herstellung beider Betone sind in Tab. 3 angegeben. Der Wirkstoffgehalt (total solid) des Verflüssigers beträgt 35%.

Im Rahmen dieser Studie wurde die Flugasche als Abfallprodukt behandelt. Es wurden also keine Auswirkungen von Schwermetallen und kein Beitrag zur Energie- und CO_2-Bilanz berücksichtigt. Dies ist eine vereinfachende Annahme, denn bei der „Herstellung“ von Flugasche wird Energie benötigt und CO_2 freigesetzt. Ausserdem besteht beim Abbruch und der Entsorgung eines Bauwerkes, das mit flugaschehaltigem Beton erstellt wurde, die Möglichkeit, dass Schwermetalle in die Umwelt gelangen.

Im Sinne einer konservativen Betrachtung wird die Bindung von CO_2 durch Carbonatisierung im Laufe des Lebenszyklus nicht berücksichtigt.

Bei der Instandsetzung infolge von Bewehrungskorrosion wird das Entfernen der Betonüberdeckung mit dieselbetriebenen Maschinen ausgeführt. Für sämtliche weitere Bauprozesse, d.h. für die Prozesse des Verdichtens und des Abbruchs, wird der Strommix angesetzt, der gemäss (6) als „Strom Niederspannung aus CH-Strommix Import“ bezeichnet wird. Für die Herstellung der Baustoffe wird ebenfalls der Strommix CH Import angesetzt. Abb. 9 veranschaulicht die Aufteilung des Strommixes CH-Import auf die einzelnen Energieträger.

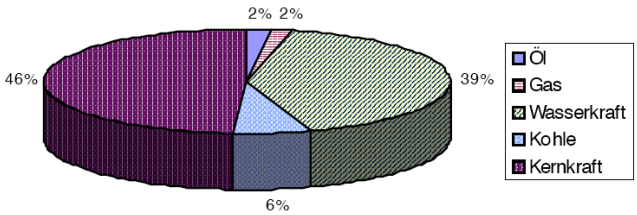

Abbildung 9: Strommix CH-Import nach (6)

Um den Transportaufwand des frischen Betons berechnen zu können, wurde ein mittlerer Transportweg (hin und zurück) von 30 km festgelegt, bei der Betonentsorgung: 50 km.
Bei der betrachteten Instandsetzungsmassnahme werden folgende Schritte berücksichtigt:

- Abtragen der Betonüberdeckung mittels Wasserhöchstdruck (Diesel-Kompressoren) bis in eine Tiefe von 4.5 cm
- Aufbringen einer neuen Betonschicht

Zusätzliche Unterhaltsmassnahmen (wie beispielsweise Reinigung) wurden in der Ökobilanzierung nicht berücksichtigt.

3.4 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung wird durchgeführt, indem die Ergebnisse von Investitionsrechnungen verglichen werden, die den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes umfassen. Dieser Lebenszyklus wird auf 100 Jahre festgelegt. Zukünftige Ausgaben werden mit einem Zinssatz von 4.5% diskontiert.

Folgende Kostenstellen werden berücksichtigt:

- Materialkosten des Betons (geliefert): RB: 100 SFr/m^3, SVB: 160 SFr/m^3 (7)
- Baukosten: SVB ermöglicht bei grossen Projekten eine Zeitersparnis (z.B. Schöneich-Tunnel) und eine Arbeitskräftereduktion (z.B. Hotel Crowne Plaza, Genf (8))
- Lebenszykluskosten (Investitionsrechnung unter Berücksichtigung des Unterhalts und der Instandsetzungen)
- Indirekte Kosten (volkswirtschaftliche Kosten durch Verkehrbehinderungen und Gesundheitsfolgen)

3.4 Soziale Bewertung

Als Basis dieser Analyse wurde als Schutzziel die Vermeidung von Unfällen und Langzeiterkrankungen definiert. Das Erreichen dieses Schutzziels wird beim Einbau von RB gemäss Angaben des Schweizerischen Baumeisterverbandes (SBV (9)) durch folgende Risiken gefährdet (Schwachstellenanalyse):

- Installation/Verschieben der Vibrationseinrichtungen: “manuelles Bewegen schwerer Lasten“
- Bewegen des Krankübels: “eingedrängt und erdrückt werden“
- Bedienung von Betonpumpen: “Bedienen von schwerem Gerät“
- Aufenthalt auf Baustellen: “Stürzen in der Ebene“ (= Stolpern)
- Aufenthalt auf Gerüsten: “Absturz“
- Gefährliche Stoffe: “Hautkrankheit“
- Bedienung von Rüttelflaschen: “getroffen werden“, “Lärm“, “Vibrationen“

Beim Einbringen von SVB sind durchschnittlich nur noch 50% der Arbeitskräfte notwendig, was automatisch zu einer direkten Reduktion der Unfallhäufigkeit und der Folgekosten um 50% führt. Bei der Monetarisierung werden folgende Kosten berücksichtigt (10):

1. Heilungskosten
2. Taggeldzahlungen infolge Arbeitsausfall
3. Invalidenrente infolge Betriebsunfall
4. Todesfälle (Hinterlassenenrente)
5. Indirekte Kosten: ca. 2 x (1. + 2. + 3. + 4.)

Neben der monetären Betrachtung, die nur einen Teil des tatsächlich entstehenden Schadens im Falle von Personenschäden abbildet, wird ausserdem auch die absolute Anzahl von Schadenfällen betrachtet, die durch eine zuverlässigere Erreichung des definierten Schutzziels vermieden werden kann.

4. Resultate

Hinweis:
Alle Angaben hinsichtlich der Quantifizierung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Auswirkungen beziehen sich auf einen Kubikmeter Beton.

4.1 Ökologische Aspekte

Ökobilanzierung vom RB und SVB
In einem ersten Schritt wurde eine reine Produktökobilanz der beiden Betontypen SVB und RB durchgeführt (siehe Tab. 7). Im Wesentlichen sind zwei Dinge für das klare Ergebnis zu Ungunsten des SVB entscheidend. Bedingt durch den höheren Zementgehalt ist sowohl der kumulierte Energieaufwand als auch die CO_2-Emission für SVB um bis zu 40% höher. Einen weiteren Beitrag leistet ausserdem der Verflüssiger, der im Fall von SVB beinahe dreifach dosiert wird (siehe Ozonbildung).

Rohstoff- und Betonherstellung					
RB	**SVB**	1 m^3			
1'110	1'540	[MJ]	Kumulierter Energieaufwand: nicht erneuerbar		
222	309	[kg CO_2- Äq]	IPCC	2001	Klimawandel, GWP 100a, (Treibhauseffekt)
0.14	0.39	[kg ethylene- Äq]	CML	2001	Photochemische Oxidation Hoch-Nox PO (Ozonbildung)
0.46	0.63	[kg NO_x- Äq]	CML	2001	Überdüngungspot., Europ. Durchschnitt (Eutrophierung)
0.34	0.47	[kg SO_2- Äq]	CML	2001	Versauerungspot., Europ. Durchschnitt (Säurebildung)
0.0071	0.0096	[points]	IMPACT	2002+	Menschliche Gesundheit (Humantoxizität)
0.0011	0.0013	[points]	IMPACT	2002+	Ökosystemqualität (Ökotoxizität)

Tabelle 7 – Ökobilanzierung der 2 Betonsorten

Analyse des Quertunnels
In einem zweiten Schritt wird der gesamte Lebenszyklus des Bauwerkes (11) betrachtet. In Abb. 10 ist dies exemplarisch für das Szenario A am Quertunnel dargestellt. Hierbei ist lediglich die CO_2-Bilanz erfasst. Die Tabellen 8 und 9 hingegen enthalten alle Wirkungsgruppen. Drei wichtige Schlussfolgerungen können aus diesen Daten gezogen werden:

- Die Prozesse mit der grössten Auswirkung auf die Ökobilanzierung sind die Rohstoffherstellung und die Instandsetzungen während der Nutzungsdauer. Beispielsweise ist der Betontransport und Einbau nicht nur quantitativ sekundär, sondern ausserdem für beide Betontypen identisch (siehe Abb. 10).

- Hinsichtlich der Wirkungsgruppen kann ebenfalls ein aussagekräftiger Schwerpunkt gesetzt werden. Betrachtet man den Beitrag der einzelnen Wirkungsgruppen zum absoluten Gesamtwert (siehe Tab. 6), so wird deutlich, dass der Treibhauseffekt infolge CO_2-Emission die massgebende ökologische Auswirkung darstellt. Hinzu kommt, dass die CO_2-Thematik hohe Aktualität besitzt und mit dem Kyoto-Abkommen zusätzlich an Bedeutung gewonnen hat. Auch hinsichtlich möglicher Monetarisierungen erlaubt beispielsweise der Handel mit CO_2-Emissionsberechtigungen gut abgestützte Aussagen (siehe Tab. 10).

- Auch die Eutrophierung ist eine massgebende Auswirkung (siehe Tab. 10), die primär durch die Freisetzung von Stickoxiden bei der Verbrennung von Dieselkraftstoff bestimmt wird. Dies betrifft im Lebenszyklus primär die Sanierungen, bei denen Dieselgeneratoren zur Anwendung kommen. Die Bedeutung der Eutrophierung ist demzufolge primär von der Anzahl der Sanierungen abhängig.

Aufgrund dieser Situation werden die nachfolgenden Darstellungen der Ergebnisse auf die Betrachtung der CO_2-Emission beschränkt.

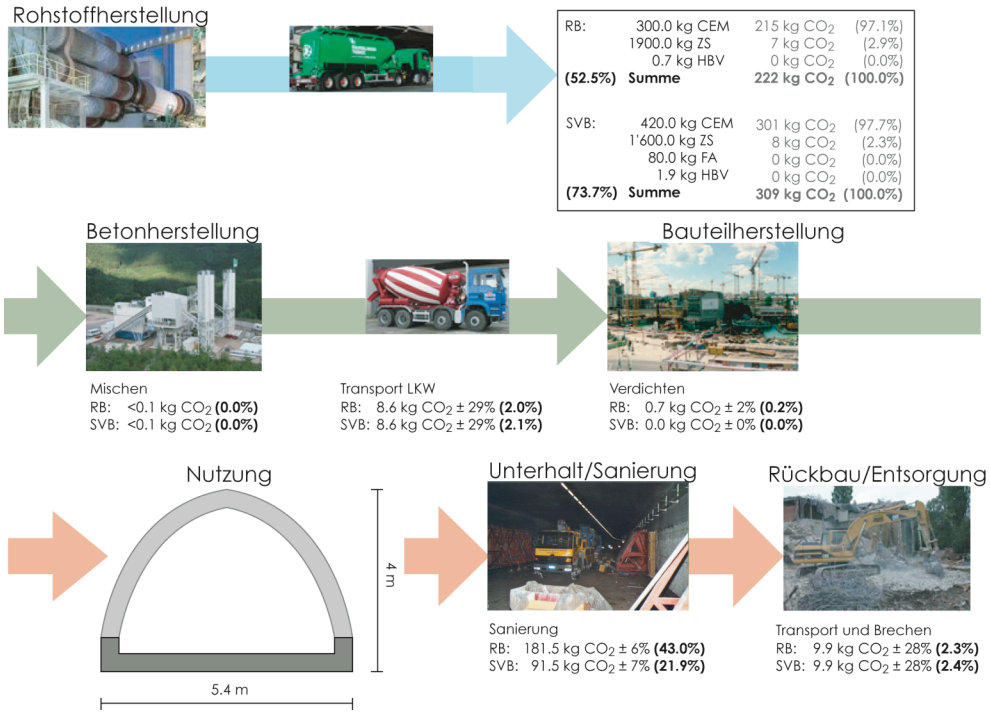

Abbildung 10: Ökobilanzierung des Quertunnels (Szenario A mit Quantifizierung der CO_2 Emissionen)

RB		**Herstellung (Rohstoff u. Beton)**		**Transport Einbau**		**Unterhalt Sanierung**		**Rückbau Entsorgung**		**Total**
Energieaufwand	[MJ]	1105.26	71%	143.44	9%	130.87	8%	171.19	11%	**1551**
Treibhauseffeckt	[kg CO_2- Äq]	221.76	52%	9.29	2%	181.50	43%	9.94	2%	**422**
Ozonbildung	[kg ethylene- Äq]	0.14	77%	0.00	1%	0.04	20%	0.00	1%	**0**
Eutrophierung	[kg NO_x- Äq]	0.46	16%	0.11	4%	2.23	76%	0.04	4%	**3**
Säurebildung	[kg SO_2- Äq]	0.34	21%	0.06	4%	1.13	71%	0.07	4%	**2**
Humantoxizität	[points]	0.01	16%	0.00	4%	0.04	75%	0.00	4%	**0**
Ökotoxizität	[points]	0.00	37%	0.00	7%	0.00	47%	0.00	9%	**1**

Tabelle 8 – Ökobilanzierung des Quertunnels, erstellt mit RB nach dem Szenario A

SVB		**Herstellung (Rohstoff u. Beton)**		**Transport Einbau**		**Unterhalt Sanierung**		**Rückbau Entsorgung**		**Total**
Energieaufwand	[MJ]	1537.35	80%	143.20	7%	69.54	4%	171.19	9%	**1921**
Treibhauseffeckt	[kg CO_2- Äq]	308.67	74%	8.59	2%	91.58	22%	9.94	2%	**419**
Ozonbildung	[kg ethylene- Äq]	0.39	94%	0.00	0%	0.02	5%	0.00	1%	**0**
Eutrophierung	[kg NO_x- Äq]	0.63	32%	0.10	5%	1.12	57%	0.06	6%	**2**
Säurebildung	[kg SO_2-Äq]	0.47	40%	0.06	5%	0.57	49%	0.07	6%	**1**
Humantoxizität	[points]	0.01	32%	0.00	6%	0.02	56%	0.00	6%	**0**
Ökotoxizität	[points]	0.00	53%	0.00	8%	0.00	28%	0.00	11%	**1**

Tabelle 9 – Ökobilanzierung des Quertunnels, erstellt mit SVB nach dem Szenario A

Vergleich RB – SVB:
Der Energieaufwand wird primär durch die Zementherstellung beeinflusst. Aus diesem Grund schliesst der RB in dieser Hinsicht besser ab. Beim Treibhauseffekt schliessen beide Betone nahezu identisch ab. Im Falle von RB wird zwei mal saniert. Die hierbei entstehenden CO_2-Emissionen kompensieren den Vorteil des RBs hinsichtlich seiner niedrigeren CO_2-Emissionen bei der Herstellung.

Die Ozonbildung wird ausschliesslich durch den Verflüssiger beeinflusst. Entsprechend fällt der Vergleich diesbezüglich zu Ungunsten des SVB aus. Auf die anderen Wirkungsgruppen hat der Verflüssiger keinen massgebenden Einfluss. Bei Abbruch und Entsorgung bleibt der Wirkstoff gebunden.

Die Eutrophierung wurde oben bereits diskutiert. Die verbleibenden Wirkungsgruppen werden nicht detailliert diskutiert.

Die längeren Mischzeiten des SVB fallen nicht ins Gewicht, da der verwendete Strommix eine sehr CO_2-arme Energiequelle darstellt (siehe Abb. 9). Die Mehrenergie für das zusätzliche Mischen beträgt 3.6 MJ. Dies entspricht lediglich 0.2% der Gesamtenergiebilanz. Dieselbe Überlegung trifft auf die Rüttelenergie zu. Die hierbei anfallende Mehr-Emission an CO_2 beträgt weniger als 0.1% der Gesamtbilanz.

	Energie	**Treibhauseffekt**	**Ozonbildung**	**Eutrophierung**	**Säurebildung**
Einheit	MJ	kg CO_2 – Äq.	kg C_2H_4- Äq	kg PO_4-Äq	kg SO_2-Äq
Wert	1.19E+14	4.20E+12	6.30E+09	1.58E+10	3.40E+10
Emissionen RB/m^3	1550.77	422.50	0.19	2.84	1.60
Normalisierte Werte	**1.30E-11**	**1.01E-10**	**2.94E-11**	**1.80E-10**	**4.71E-11**
Emissionen SVB/m^3	1921.28	418.78	0.41	1.90	1.16
Normalisierte Werte	**1.61E-11**	**9.97E-11**	**6.52E-11**	**1.20E-10**	**3.41E-11**

Tabelle 10 – Normierung der Emissionen

Analyse der unterschiedlichen Bauteile unter Berücksichtigung der Szenarien A, B und C
Die Bedeutung der Szenarien wurde in Kapitel 3 erläutert. Sie bezeichnen unterschiedliche Kombinationen der Anzahl notwendiger Sanierungen. A: SVB 1x, RB 2x, B: SVB 1x, RB 3x, C: SVB 2x, RB 3x.
Die notwendigen Randbedingungen für die Bilanzierung sind in Tab. 2 zusammengefasst. Für das Hotel beschränkt sich die Analyse auf den Bereich der Tiefgarage. Aus diesem Grund gilt für die Analyse des Hotels das Volumen-zu-Oberflächenverhältnis von 0.45 m^3/m^2.

Quertunnel		**Herstellung (Rohstoff u. Beton)**		**Transport Einbau**		**Unterhalt Sanierung**		**Rückbau Entsorgung**		**Total**	**Vergleich**
Szenario A / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	74%	8.6	2%	91.6	22%	9.9	2%	**419**	
Szenario A / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	52%	9.3	2%	181.5	43%	9.9	2%	**422**	**1%**
Szenario B / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	74%	8.6	2%	91.6	22%	9.9	2%	**419**	
Szenario B / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	43%	9.3	2%	272.2	53%	9.9	2%	**513**	**23%**
Szenario C / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	60%	8.6	2%	183.15	36%	9.9	2%	**510**	
Szenario C / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	43%	9.3	2%	272.2	53%	9.9	2%	**513**	**1%**

Tabelle 11 – Ökobilanzierung des Quertunnels nach den Szenarien A, B und C

Hotel		Herstellung (Rohstoff u. Beton)		Transport Einbau		Unterhalt Sanierung		Rückbau Entsorgung		Total	Vergleich
Szenario A / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	77%	0.0	0%	80.7	20%	9.9	2%	**399**	
Szenario A / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	57%	0.1	0%	159.7	41%	9.9	3%	**392**	**-2%**
Szenario B / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	77%	0.0	0%	80.7	20%	9.9	2%	**399**	
Szenario B / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	47%	0.1	0%	239.6	51%	9.9	2%	**471**	**18%**
Szenario C / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	64%	0.0	0%	161.40	34%	9.9	2%	**480**	
Szenario C / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	47%	0.1	0%	239.6	51%	9.9	2%	**471**	**-2%**

Tabelle 12 – Ökobilanzierung des Hotels nach den Szenarien A, B und C

Brückenkonsolkopf		Herstellung (Rohstoff u. Beton)		Transport Einbau		Unterhalt Sanierung		Rückbau Entsorgung		Total	Vergleich
Szenario A / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	60%	8.6	2%	183.2	36%	9.9	2%	**510**	
Szenario A / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	37%	8.7	1%	363.0	60%	9.9	2%	**603**	**18%**
Szenario B / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	60%	8.6	2%	183.2	36%	9.9	2%	**510**	
Szenario B / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	28%	8.7	1%	544.5	69%	9.9	1%	**785**	**54%**
Szenario C / SVB	[kg CO_2-Eq]	308.7	45%	8.6	1%	366.3	53%	9.9	1%	**694**	
Szenario C / RB	[kg CO_2-Eq]	221.8	28%	8.7	1%	544.5	69%	9.9	1%	**785**	**13%**

Tabelle 13 – Ökobilanzierung des Brückenkonsolkopfes nach den Szenarien A, B und C

Im Falle des Hotels wurde mit einer Baustellenbetonieranlage gearbeitet. Der CO_2-intensive Betontransport (Dieselfahrzeuge) entfällt. Dies wird am geringen CO_2-Beitrag des Prozessschrittes „Transport/Einbau“ deutlich.

Die Sanierungsmassnahmen haben eine grosse Wirkung auf die CO_2-Emission. Das Verhältnis aus zu sanierender Betonoberfläche und Betonvolumen ist für die drei Bauteile unterschiedlich. Je mehr Oberfläche pro Volumen vorliegt, desto höher sind die Auswirkungen einer Oberflächeninstandsetzung bezogen auf einen Kubikmeter Beton.

Dieser Umstand ist von Bedeutung beim Vergleich der Betontypen. In fast allen Szenarien schliesst der SVB für alle drei Bauteile besser ab. Lediglich Szenario A und C im Falle des Hotels (Tiefgarage) zeigen einen geringfügigen Vorteil für den RB.

4.2 Ökonomische Aspekte

Kalkulation der Lebenszykluskosten
Die Ergebnisse der ökonomischen Analyse sind für den Quertunnel und den Konsolkopf in den folgenden drei Tabellen angegeben. (Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen die Daten für das Hotel noch nicht vor.)

Die Erstellungskosten beinhalten neben den Materialkosten auch alle anderen Baukosten, wie beispielsweise die Arbeitszeitkosten für den Betoneinbau, die Maschinenkosten, etc. Die gewissenhafte Planung der Bauabläufe erlaubt es, mit dem SVB schneller und mit weniger Personal zu arbeiten. Wird dies umgesetzt, ergeben sich trotz der höheren Materialkosten des SVB, niedrigere Erstellungskosten pro Kubikmeter Beton verglichen mit dem RB. Von diesem Fall wird bei der Kostenberechnung ausgegangen. Dies hat auch eine Auswirkung auf die Unterhaltskosten, die vereinfachend als Prozentsatz der Erstellungskosten angenommen wurden.
Als Instandsetzungskosten wurden für alle Fälle 800 SFr/m^2 angenommen.

Alle zukünftigen Ausgaben wurden diskontiert. Der Zeitraum beträgt 100 Jahre und der Diskontsatz 4.5%.
Die Tabellen 14 und 15 vergleichen die beiden Bauteile (Quertunnel und Konsolkopf) hinsichtlich der Lebenszykluskosten.
Die Erstellungskosten variieren stark und hängen von der Komplexität des Bauteils ab. Dies führt in den beiden hier betrachteten Fällen (Quertunnel und Konsolkopf) zu einem Unterschied der Erstellungskosten von mehr als 100%.

Quertunnel		**Szenario A**		**Szenario B**		**Szenario C**	
		SVB	RB	SVB	RB	SVB	RB
Anzahl m^2 Sanierungsfläche pro m^3 Beton		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Erstellungskosten	[SFr/m^3]	864.-	933.-	864.-	933.-	864.-	933.-
Unterhaltkosten	[SFr/m^3]	189.-	202.-	189.-	202.-	189.-	202.-
Instandsetzungskosten 1	[SFr/m^3]	221.-	468.-	221.-	655.-	468.-	655.-
Instandsetzungskosten 2	[SFr/m^3]	-	109.-	-	221.-	109.-	221.-
Instandsetzungskosten 3	[SFr/m^3]	-	-	-	74.-	-	74.-
Lebenszykluskosten	[SFr/m^3]	1'274.-	1'712.-	1'274.-	2'094.-	1'630.-	2'094.-
Vergleich (Mehrkosten)	[%]		**34%**		**64%**		**29%**

Tabelle 14 – Lebenszykluskosten des Quertunnels nach den Szenarien A, B und C

Konsolkopf		**Szenario A**		**Szenario B**		**Szenario C**	
		SVB	RB	SVB	RB	SVB	RB
Anzahl m^2 Sanierungsfläche pro m^3 Beton		5	5	5	5	5	5
Erstellungskosten	[SFr/m^3]	405.-	460.-	405.-	460.-	405.-	460.-
Unterhaltkosten	[SFr/m^3]	88.-	100.-	88.-	99.-	88.-	99.-
Instandsetzungskosten 1	[SFr/m^3]	443.-	936.-	443.-	1331.-	936.-	1331.-
Instandsetzungskosten 2	[SFr/m^3]	-	219.-	-	443.-	219.-	443.-
Instandsetzungskosten 3	[SFr/m^3]	-	-	-	147.-	-	147.-
Lebenszykluskosten	[SFr/m^3]	936.-	1'714.-	936.-	2'480.-	1'648.-	2480.-
Vergleich (Mehrkosten)	[%]		**83%**		**165%**		**50%**

Tabelle 15 – Lebenszykluskosten des Konsolkopfes nach den Szenarien A, B und C

Die Tatsache, dass für beide Bauteile und alle Szenarien der RB besser abschliesst als der SVB, geht auf das Konto der unterschiedlichen Anzahl von Instandsetzungen.

Kostenentwicklung
Die Abbildungen 11 und 12 zeigen die kumulierten diskontierten Kosten der beiden Bauteile. Ins Auge fällt der grosse Kostensprung zum Zeitpunkt der Sanierung. Dieser ist beim Konsolkopf ca. doppelt so hoch verglichen mit dem Quertunnel. Auch hierfür ist das Verhältnis aus zu sanierender Betonoberfläche und Betonvolumen verantwortlich. Dieses ist für den Konsolkopf doppelt so hoch als beim Quertunnel. Entsprechend fallen die Sanierungskosten pro Kubikmeter Beton mehr ins Gewicht.

Der Fall zweier Sanierungen beim SVB und beim RB ist in den Tabellen 14 und 15 nicht als eigenständiger Fall aufgelistet. Aufgrund der reduzierten Erstellungskosten beim SVB infolge der möglichen

Personalreduktion gewinnt auch diesen Vergleich der selbstverdichtende Beton. Ein Breakeven lässt sich aus diesem Grund nicht bestimmen, da der SVB von Beginn an einen Startvorteil aufweist.

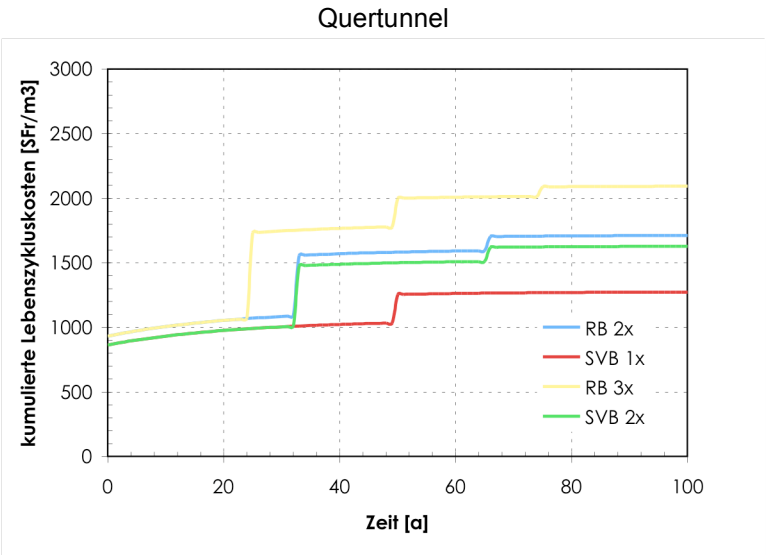

Abbildung 11: kumulierte Kosten des Quertunnels nach den Szenarien A, B und C

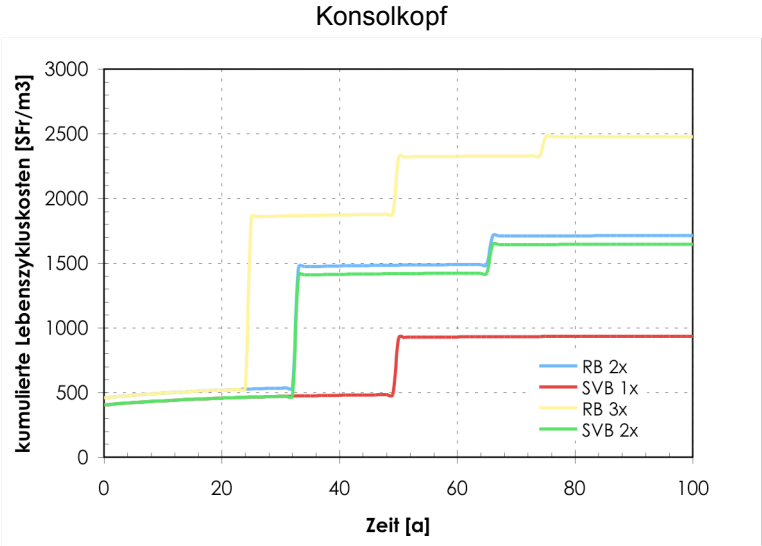

Abbildung 12: kumulierte Kosten des Konsolkopfes nach den Szenarien A, B und C

Zusätzlich zu der hier berücksichtigten Personalreduktion bei der Verwendung von SVB gibt es noch einen weiteren Vorteil. Anstelle einer Personalreduktion, kann beispielsweise auch die Bauzeit verkürzt werden, ohne den Personaleinsatz gegenüber der Verwendung von RB steigern zu müssen. Diese Flexibilität ermöglicht dem SVB auch bei anderen Bauteilen und Randbedingungen den erwähnten Startvorteil. Voraussetzung ist selbstverständlich, dass das Potential des SVBs bereits während der Planung berücksichtigt wird. Nur so kann in vollem Umfang von den Vorteilen profitiert werden.

Durch Bauzeitverkürzungen liessen sich auch indirekte Kosten zugunsten des SVB anführen. Dieser Umstand wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht berücksichtigt. Zum einen entspricht dies einer konservativen Annahme für den SVB, zum anderen sind die entsprechenden Unsicherheiten enorm hoch. Bonus/Malus-Lösungen sind beispielsweise sehr situationsabhängig und die Monetarisierung von Staukosten z.B. weist enorme Schwankungen auf.

4.3 Soziale Aspekte

Als Grundlage wurden Daten aus dem Jahr 2001 verwendet, für das sehr genaue Erhebungen vorliegen. Geht man davon aus, dass Betonierarbeiten ein durchschnittliches Unfall- und Erkrankungsrisiko aufweisen, zeigt die Abschätzung in Tab. 16, dass etwa 180 Schadenfälle pro Jahr in direktem Zusammenhang mit Betonierarbeiten stehen. Tatsächlich zeigt die Schwachstellenanalyse (Kapitel 3), dass das Betonieren gefährlicher ist als die durchschnittliche Bautätigkeit im Bauhauptgewerbe (BHG). Die Annahmen sind also konservativ.

Bauhauptgewerbe (BHG) in der Schweiz im Jahr 2001 (12)	
Anzahl versicherter Personen	125'629
Anzahl Berufsunfälle und -krankheiten	29'355
Anzahl Mannstunden im BHG	516 Mio
Mannstunden für Betonierarbeiten	3.146 Mio
Anteil der Betonierarbeiten an der Gesamttätigkeit im BHG	0.6% vom Total
Schadensfälle bei Betonierarbeiten	**176**

Tabelle 16 - Abschätzung der aktuellen Schadensfälle bei Betonierarbeiten

Das Potential zur Vermeidung von Schadensfällen alleine durch die Umstellung von SVB auf RB beträgt ca. zwischen 100 und 130 pro Jahr. Dies aber nur, wenn die Umstellung vollständig umgesetzt wird.

	Quertunnel / Konsolkopf	Hotel Crowne
Personalreduktion durch Verwendung von SVB	60%	75%
Reduktion der Schadensfälle	**105**	**132**
Anzahl verbleibender Schadensfälle bei Betonierarbeiten mit SVB	71	44

Tabelle 17 - Abschätzung der Reduktion der Schadensfälle bei Betonierarbeiten durch Verwendung von SVB

Die direkten Folgekosten durch Unfall und Krankheit im BHG betragen gut 300 Mio SFr pro Jahr. Die damit verbundenen indirekten Kosten betragen nochmals das Doppelte und entfallen auf Umschulungen, volkswirtschaftliche Schäden durch Erwerbslosigkeit, Zusatzkosten im familiären Umfeld der Opfer, etc. Gesamthaft belaufen sich die Kosten also auf gut 900 Mio SFr jährlich. Geht man davon aus, dass der auf das Betonieren zurückzuführende Teil dieser Kosten proportional zum Arbeitszeitverhältnis ist, ergeben sich Kosten in Höhe von 5.5 Mio SFr jährlich, die auf Betonierarbeiten zurückgeführt werden können.

Kosten Bauhauptgewerbe in der Schweiz im Jahr 2001 (12)		307.6 Mio SFr
zusammengesetzt aus	. Heilungskosten	51.8 Mio SFr
	. Taggeldzahlungen	101.6 Mio SFr
	. Invaliditätsrente	138.3 Mio SFr
	. Todesfälle (Hinterlassenenrente)	15.8 Mio SFr
Indirekte Kosten (2x Gesamtkosten)		615.2 Mio SFr
Totalkosten		922.8 Mio SFr
Bezogen auf Betonierarbeiten (0.6%)		**5.5 Mio SFr**

Tabelle 18 - Abschätzung der Kosten infolge von Schadensfällen bei Betonierarbeiten

Umgerechnet auf einen Kubikmeter Beton erlaubt dies keine signifikanten Einsparungen dank der Verwendung von SVB. Diese betragen lediglich ca. 0.30 SFr pro Kubikmeter Beton. Dabei wurde angenommen, dass die Gesamtbetonproduktion der Schweiz 14.2 Mio Kubikmeter pro Jahr beträgt.

	Quertunnel / Konsolkopf	Hotel Crowne
Personalreduktion durch Verwendung von SVB	60%	75%
Kostenreduktion durch Verwendung von SVB	3.3 Mio SFr	4.1 Mio SFr
Kostenreduktion pro m^3	0.23 SFr	0.29 SFr

Tabelle 19 - Abschätzung der Kostenreduktion aufgrund der Vermeidung von Schadensfällen bei Betonierarbeiten durch den Einsatz von SVB

Dieser Betrag ist sehr klein verglichen mit den anderen Kosten. Viel relevanter ist die Reduktion des Risikos von Schadensfällen durch den Ersatz von RB durch SVB.

4.4 Gesamtauswertung

Die wichtigsten Ergebnisse der bereits durchgeführten Analyse wurden für die drei Bauteile und die entsprechenden Szenarien in den Tabellen 20, 21 und 22 zusammengefasst und monetarisiert. Die für die Monetarisierung benötigten Umrechnungsfaktoren sind folgende:

- Der aktuelle Handelspreis von CO_2 an der European Energy Exchange beträgt etwa 0.04 SFr/kg CO_2
- Der ökonomische Aspekt ist bereits monetär erfasst.
- Aus der Anzahl Mannstunden für Betonierarbeiten (3.146 Mio Mannstd. pro Jahr) und den Folgekosten der Betonierarbeiten (5.5 Mio SFr pro Jahr) errechnet sich der Umrechnungsfaktor für den sozialen Aspekt zu 1.75 SFr/Mannstd.

Szenario **A**	Ökologisch [kg CO_2/m^3]		Ökonomisch [SFr/m^3]		Sozial [Mannstd./m^3]			Monetarisierung [CHF/m^3]	
	SVB	RB	SVB	RB	SVB	RB		SVB	RB
Tunnel	419	422	1274	1712	0.32	0.8		1291	1730
Hotel	399	392	...	...	0.04	0.16		...	...
Konsolkopf	510	603	936	1714	0.12	0.3		957	1739

Tabelle 20 – Überblick der Ergebnisse der ökologischen, ökonomischen und sozialen Analyse nach dem Szenario A

Szenario **B**	Ökologisch [kg CO_2/m^3]		Ökonomisch [SFr/m^3]		Sozial [Mannstd./m^3]			Monetarisierung [CHF/m^3] *	
	SVB	RB	SVB	RB	SVB	RB		SVB	RB
Tunnel	419	513	1274	2094	0.32	0.8		1291	2116
Hotel	399	471	...	...	0.04	0.16		...	...
Konsolkopf	510	785	936	2480	0.12	0.3		957	2512

Tabelle 21 – Überblick der Ergebnisse der ökologischen, ökonomischen und sozialen Analyse nach dem Szenario B

Szenario **C**	Ökologisch [kg CO_2/m^3]		Ökonomisch [SFr/m^3]		Sozial [Mannstd./m^3]			Monetarisierung [CHF/m^3] *	
	SVB	RB	SVB	RB	SVB	RB		SVB	RB
Tunnel	510	513	1628	2094	0.32	0.8		1649	2116
Hotel	480	471	...	...	0.04	0.16		...	...
Konsolkopf	694	785	1648	2480	0.12	0.3		1676	2512

Tabelle 22– Überblick der Ergebnisse der ökologischen, ökonomischen und sozialen Analyse nach dem Szenario C

Die ökologischen und sozialen Aspekte leisten in monetarisierter Form nur einen kleinen Beitrag zu den Gesamtkosten. Der grösste absolute Beitrag der CO_2-Emission beträgt 28 SFr/m^3; der grösste relative lediglich 2%. Bei den sozialen Folgekosten ist es noch geringer: abslout: 1.4 SFr/m^2, relativ: 0.1%.

Ungeachtet dieses geringen Einflusses der ökologischen und sozialen Aspekte ist der monetäre Unterschied zwischen den Lösungen SVB und RB enorm hoch. Im Falle des Konsolkopfes kann beim Szenario B (Sanierungen: SVB 1x, RB 3x) eine Kostenreduktion von knapp 60% über den gesamten Lebenszyklus realisiert werden, wenn anstelle eines herkömmlichen RB ein SVB mit hoher Qualität (Dauerhaftigkeit) zum Einsatz kommt.

4.5 Schlussfolgerungen

Eine ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit erlaubt einen repräsentativen Vergleich der unterschiedlichen Betontypen SVB und RB. Die Ganzheitlichkeit umfasst die Berücksichtigung der Ökologie, der Ökonomie und der Gesellschaft über den gesamten Nutzungszyklus eines Bauwerkes. Bei der Durchführung des Vergleiches wird deutlich, dass die drei Bereiche zwangsläufig gekoppelt sind und sich gegenseitig beeinflussen. Von grosser Bedeutung für den Ausgang des Gesamtvergleiches in rein monetärer Hinsicht ist die Dauerhaftigkeit des Betons. Eine Annahme hinsichtlich der Dauerhaftigkeit unterliegt selbstverständlich grösseren Ungenauigkeiten als beispielsweise die Werkstoffkosten. Der Spielraum für eine subjektive Beurteilung des Ergebnisses ist demzufolge nicht vollständig ausgeräumt. Die Aufteilung in die drei erwähnten Bereich erlaubt jedoch eine fundierte individuelle Bewertung.

Ein repräsentativer Vergleich der ökologischen Auswirkungen der beiden Betontypen verlangt eine Lebenszyklusbetrachtung und nicht nur eine Momentaufnahme, wie beispielsweise eine einfache Produktökobilanz.
Neben den Ausgangsstoffen, die zur Produktion von Beton verwendet werden, haben die Unterhalts- und Instandsetzungsarbeiten an einem Betonbauwerk signifikante Folgen für die langfristigen ökologischen Auswirkungen eines Betonbauwerkes. Interessanterweise ist es hinsichtlich des ökologischen Aspektes nicht die einfachere Einbaumethode des SVB, sondern dessen erhöhte Dauerhaftigkeit, die das positive Abschneiden des SVB verursacht. Die höhere Homogenität und Dichtigkeit von SVB im Vergleich zu RB vergrössert die Instandsetzungszyklen eines Betontragwerkes. Bereits eine konservative Annahme der erhöhten Dauerhaftigkeit überkompensiert das gesamte CO_2-Äquivalent der SVB-Lösung um 1 bis 20% verglichen mit der RB-Lösung (je nach Bauteil).

Wird die Leistungsfähigkeit des SVB hinsichtlich der einfachen Einbaubarkeit bereits in der Planungsphase eines Bauwerkes berücksichtigt, entscheidet sich auch der ökonomische Vergleich für den SVB. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Baustoffkosten neben den weiteren Baukosten, wie Personal-, Maschinen-, Overhead- und Bauzeitkosten nur eine kleine Auswirkung auf die Ökonomie eines Bauobjektes haben. Trotz der bis zu 60% höheren Werkstoffkosten des SVB im Vergleich zum RB sind somit Lebenszykluskostenreduktionen von 40% und mehr zu Gunsten des SVB möglich.

Hinsichtlich des sozialen Aspektes wurde zum Zwecke des Vergleichs ein soziales Schutzziel definiert. Bei diesem Ziel handelt es sich um die Vermeidung von Personenschäden in Form von Unfällen und Langzeiterkrankungen als Folge der Arbeit mit Beton im Bauhauptgewerbe.
Durch die Verwendung von SVB anstelle von RB kann zwischen 50 und 75% der Arbeitszeit beim Betoneinbau eingespart werden. Auf diese Art und Weise kann somit die Zahl der mit Betonierarbeiten im Zusammenhang stehenden Personenschadensfälle ebenfalls um 50 bis 75% reduziert werden. Eine vollständige Umstellung von RB auf SVB würde auf diese Weise jährlich mehr als 90 Personenschadenfälle vermeiden; ganz abgesehen von den Gesundheitsfolgekosten, bei denen ein Sparpotential von jährlich mehr als CHF 2.8 Millionen realisiert werden könnte. Die frei werdende Arbeitsleistung würde auf deutlich risikoärmere Arbeiten, wie beispielsweise Labor- und Planungsleistungen entfallen.

5. Bedeutung für die Praxis

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass der SVB im Vergleich zum RB in allen Bereichen hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit als äquivalent oder besser einzustufen ist. Es ist ein innovativer Werkstoff, der in unterschiedlichen Aspekten ein Potential aufweist, das ihn im Vergleich zu herkömmlichen Betonen bevorzugt.

Für die praktische Anwendung von SVBs liefert dies zwei zentrale Argumente:

- SVB ist im Vergleich zu RB ein Werkstoff mit erhöhter Flexibilität. Dies erschöpft sich nicht in seinem Fliessvermögen, sondern betrifft vor allem logistische Überlegungen. Werden ganze Baustellen oder Projektabschnitte unter voller planerischer Ausnutzung der Vorteile von SVB vorbereitet, kann entweder die Möglichkeit der Bauzeitverkürzung oder der Personalreduktion in vollem Umfang genutzt werden. Darüber hinaus gibt es ausserdem die Möglichkeit der freieren Formgebung, die sich ebenfalls zur Optimierung von Bauabläufen und Terminprogrammen nutzen lässt (grössere Etappierungen, keine Anforderungen an die Zugänglichkeit, etc.). Auch die Reduktion der Lärmbelästigung kommt dieser Flexibilität entgegen.

- Ungeachtet dieser eben erwähnten und schwierig quantifizierbaren Aspekte schneidet der SVB gegenüber dem RB auch bei einem objektiven Vergleich kostenmässig besser ab. Durch die Vorteile beim Einbau lassen sich bereits die Erstellungskosten gegenüber RB senken. Über den Lebenszyklus bringt die hohe Qualität von SVB ausserdem einen Kostenvorteil von 5 bis zu 60%.

Diese Argumente sind sowohl für Bauherren als auch für Unternehmer als Entscheidungskriterium von grosser Bedeutung.

6. Empfehlungen für die weitere Umsetzung

Die Ergebnisse erlauben es, die massgebenden Vorteile und Stärken des SVB zu quantifizieren. Je nach Randbedingungen einer realen Bauaufgabe spielen andere Vorteile und Stärken die entscheidende Rolle. Auf dieser Basis können Applikationen mit besonders hoher SVB-Tauglichkeit ausgewählt werden. Im Sinne konkreter Fallbeispiele können diese Applikationen mit einem höheren Detaillierungsgrad geplant und analysiert werden. Auf diese Weise kann jeder Kundengruppe ein konkretes Argument mit hohem Praxisbezug demonstriert werden, das von objektiven Überlegungen anstelle von intuitiven Aussagen gestützt wird.

Aber bereits die im vorliegenden Bericht dokumentierten Ergebnisse erlauben es, auf breiter Front ein Argumentarium für die Technologie des SVB zu erstellen. Die objektive Betrachtungsweise macht daraus ein interessantes Instrument zur Entscheidungsförderung für eine innovative Technologie. Das technische Marketing ist der angemessene Adressat für die weitere Nutzung der gewonnenen Einblicke. Der modulare Aufbau in Bauteile, Nachhaltigkeitsaspekte und Dauerhaftigkeitsszenarien erlaubt eine zielgruppengerechte Verwendung der Einzelergebnisse.

7. Literatur

(1) Dahlhaus, F., Jacob, D. und Müller, S.: *Wirtschaftlicher Einsatz von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Tunnelbau*, Tunnel 6/2005 (2005)

(2) Holcim, *Effizient und schnell, Flextremo 3R* «Crowne Plaza»-Hotel, Genf; Referenzobjekt der Holcim (Schweiz) AG (2004)

(3) Hofmannn C. und Leemann A.; *Selbstverdichtender Beton: Herstellung, Anwendung und Dauerhaftigkei*t, ASTRA Forschungsauftrag 2000/481 (84/00) (2004)

(4) RIZA *working document 97*.110X, RIZA Lelystad Niederlande (1997)

(5) Heijungs R., Guinée J.B., Huppes G., Lankreijer R.M., Udo de Haes H.A., Wegner Sleeswijk A., Ansems A.M.M., Eggels P.G., van Duin R. and de Goede H.P.: *Environmental Life Cycle Assessment Of Products*, Guide October 1992, National Reuse of Waste Research Programme NOH, Centrum voor Milieukunde, Leiden, The Netherlands (1992)

(6) Frischknecht R.,Hofstetter P., Knoefel I., Dones R., Zollinger E.: *Ökoinventare für Energiesysteme : Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Oekobilanzen für die Schweiz*, im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern (1995)

(7) Hastag AG, Gespräch mit Herr O. Konrad

(8) Zschokke AG, Gespräch mit Herr W. Wolf

(9) Schweizerischer Baumeister Verband (SBV), Arbeitssicherheit, interne Berichte, Herr R. Debrunner

(10) SUVA Statistik, Gespräch mit Herr S. Scholz

(11) Haag C, Gerdes A., Künniger T., Richter K. und Wittmann F.H.: Ökologische Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils, Internationale Zeitschtift für Bauinstandsetzen, **3**, S. 167-191 (1997)

(12) Unfallstatistik (UVG), BUV, pp. 132-133, (2001)

für das cemsuisse – Projekt SCC-3: Nachhaltigkeit

Giovanni Martinola und Martin Bäuml – 14.04.2006

Concretum Construction Science AG
Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich
Tel: 044 445 13 46, Fax: 044 445 13 48