

Nachhaltigkeit und Technologie

Développement durable et technologie

Sustainability and technology



Biologisch induzierte Betonerosion in Abwasserreinigungsanlagen

Biologically triggered concrete erosion in wastewater treatment plants

Andreas Leemann, Cathleen Hoffmann

Einleitung

In Nitrifikationsbecken von Abwasserreinigungsanlagen (ARA) wurde in den letzten Jahren eine Erosion der Betonoberflächen festgestellt. Über das Fortschreiten dieser Erosion, ihre Ursachen und mögliche Konsequenzen für die Dauerhaftigkeit war wenig bekannt. Untersuchungen zeigen nun, dass es sich um einen biologisch induzierten Säureangriff handelt, dessen Auswirkungen in erster Linie von der Wasserhärte und erst in zweiter Linie von Betonzusammensetzung, Nachbehandlung und in der ARA verwendeten Verfahren abhängig sind. Die Erosionsraten bewegen sich in einem Bereich, der für die Dauerhaftigkeit der Anlagen kein unmittelbares Problem darstellt. Chemischer Angriff auf Beton kann unter verschiedenen Umweltbedingungen auftreten. Beim Transport und bei der Aufbereitung von Abwasser ist die häufigste Form der Angriff von Schwefelsäure, der von sulfatoxidierenden Bakterien verursacht wird [1,2]. In letzter Zeit wurde festgestellt, dass eine Erosion der Betonoberfläche vorwiegend in Nitrifikationsbecken von ARA auftreten kann (Fig. 1). In solchen Becken findet die Oxidation von Ammonium zu Nitrat statt. Dabei werden Protonen frei [3,4]:



Der pH-Wert in den Nitrifikationsbecken wird bei 7 gehalten, um die Stabilität der Mikroorganismen zu gewährleisten. Da aber die Betonoberfläche durch einen nitrifizierenden Biofilm bedeckt wird, kann sich dort lokal ein saures Milieu etablieren, was zu einem Säureangriff führt. Die so

Introduction

Erosion of the concrete surface of nitrification basins in wastewater treatment plants (WTPs) has been observed in recent years. Little was known about the development of the erosion, its causes and possible consequences for the durability of the concrete structures. Investigations have now shown that it is due to a biologically induced acid attack, whose effects depend primarily on water hardness and secondarily on concrete composition, the curing process and methods applied in the WTPs. The rate of erosion is confined to a range in which there is no immediate problem for the durability of the WTPs. Chemical attack on concrete can be observed in a variety of environments. During transport or in the treatment of wastewater the most common form present is attack due to sulphuric acid formed by sulfate reducing bacteria [1,2]. However, recently erosion of the concrete surface in nitrification basins of WTPs has been observed (Fig. 1). In these basins, the oxidation of ammonium to nitrate takes place. In this reaction protons are produced [3,4]:



The pH value of the water in the basins is kept at a neutral value of 7 to ensure the stability of the bioorganisms. But as the concrete surface in such basins is covered by a nitrifying biofilm, locally an acid environment between biofilm and concrete surface can be created leading to an acid attack. The erosion of the concrete surface decreases the thickness of the concrete cover protecting the re-

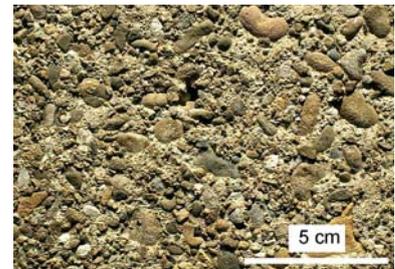


Fig. 1
Erodierte Betonoberfläche in einer ARA.
Eroded concrete surface in WTP.

verursachte Erosion verringert die Dicke des schützenden Überdeckungsbetons und damit möglicherweise die Dauerhaftigkeit der Becken. Die Abtragraten an der Betonoberfläche sind allerdings nicht bekannt. ARA in der Schweiz sind unterschiedlich stark von diesem Phänomen betroffen. Die Gründe dafür waren bisher noch unklar.

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist es, die entscheidenden Parameter für die biologisch induzierte Betonerosion und ihre Variation zu identifizieren und zu werten. Es wurden dazu Betone in Nitrifikationsbecken von vier verschiedenen ARA ausgelagert, um die Erosionsrate und den Einfluss von Zementart, Wasserzementwert (w/z) und Wasserhärte zu untersuchen.

Materialien und Methoden

Die für die Betonherstellung verwendeten Zementarten sind in Fig. 2 aufgeführt. Alluvialkies, hauptsächlich aus Sandstein und Kalk bestehend, und mit einer maximalen Korngröße von 32 mm wurde als Gesteinskörnung verwendet.

Prismen der Abmessungen 72 x 72 x 150 mm³ wurden aus Betonwür-

inforcement and with it possibly the durability of the structure. However, little is known about the degree of erosion of the concrete surface, though the effect varies widely between different WTPs in Switzerland. Up till now the reasons for these variations have not been clarified.

The goal of the present project is the identification and assessment of the parameters responsible for the biologically triggered concrete erosion in WTPs and the reasons for its variation. Thus, concrete specimens were exposed in the nitrification basin of four different WTPs to investigate the rate of erosion and the influence of cement type, water-cement ratio (w/c) and water hardness.

Materials and methods

The cements used and the mix design of the concrete are given in Fig. 2. Alluvial gravel consisting mainly of sandstone and limestone with a maximum grain size of 32 mm was used as aggregate.

Prisms with a size of 72 x 72 x 150 mm³ were cut from the produced concrete cubes. A calibrated depth gauge combined with a steel plate having angles and 20 predrilled holes ensured that surface erosion was always measured at identical points. The repeatability of the method as tested is about 0.02 mm.

The first set of specimens was exposed in four different WTPs (A–D, Fig. 6) after air curing at 20 °C and 70% relative humidity for 28 days, the second set after water curing at 20 °C for 90 days. The range of water hardness of the different WTPs is 19.5–32.0 fH°. The measured surfaces were cleaned every three months and erosion was measured up to an age of 282 days. Afterwards, the specimens of one WTP were removed for microstructural analysis with a scanning electron microscope (ESEM-FEG XL30).

Results

The microstructure of the surface area of the different mixtures always exhibits the same features. Four different zones can be

mixtures	C-OPC-1, C-LS, C-SL	C-OPC-2
cement types	CEM I 42.5 N, CEM II/A-LL 42.5 N, CEM III/B 32.5 R	CEM I 42.5 N
cement content [kg/m ³]	325	375
aggregate 0/32 mm [kg/m ³]	1935	1940
water [kg/m ³]	163	150
superplasticizer [kg/m ³]	–	5.6
w/c	0.50	0.40

Fig. 2

Betonrezeptur. Die Bezeichnung der Betone in der ersten Zeile stimmt mit der Reihenfolge der Zementarten in der zweiten Zeile überein. (CEM I = Portland Zement, CEM II/A-LL = Portland-Kalkstein-Zement, CEM III/B = Hochofenzement).

Mix design of the concrete. The names of the concrete mixtures given in row 1 correspond to the order of cements given in row 2 (CEM I = ordinary Portland cement, CEM II/A-LL = Portland limestone cement, CEM III/B = Portland slag cement).

feln geschnitten. Eine kalibrierte Tiefenlehre kombiniert mit einer gelochten Stahlplatte gewährleistete, dass die Erosionsrate immer an identischen Punkten gemessen wurde. Die Wiederholbarkeit der Messungen lag im Bereich von 0,02 mm.

Die erste Serie Prüfkörper wurde in vier verschiedenen ARA (A–D, Fig. 6) nach 28 Tagen Lagerung bei 20 °C und 70% relativer Feuchte ausgelagert, die zweite Serie nach 90 Tagen Wasserlagerung bei 20 °C. Die Wasserhärte in den vier ARA lag zwischen 19,5 und 32,0 fH°. Alle drei Monate (bis zu einem Alter von 282 Tagen) wurden die Messflächen gereinigt und die Erosion wurde gemessen. Danach wurden die Prüfkörper aus einer ARA entfernt, um sie mit einem Elektronenmikroskop (ESEM-FEG XL30) zu analysieren.

Resultate

Die Mikrostruktur im Oberflächenbereich der verschiedenen Betone zeigt immer dieselben Charakteristiken. Vier verschiedene Zonen können aufgrund der Porosität identifiziert werden (Fig. 3):

- Zone 3: stark poröse Lage direkt an der Betonoberfläche (Dicke: 0,3–0,6 mm)
- Zone 2: dichte Lage (Dicke: 0,01–0,02 mm)

distinguished based on their porosity (Fig. 3):

- zone 3: highly porous layer at the concrete surface (thickness: 0.3–0.6 mm)
- zone 2: dense layer (thickness: 0.01–0.02 mm)
- zone 1: layer with increased porosity compared to unaltered concrete (thickness: 0.7–1.3 mm)
- zone 0: unaltered paste

Apart of the differences in porosity, the defined zones also show differences in composition. The differences mainly relate to the Ca/Si ratio (Fig. 4). Zone 3 is depleted in Ca as a result of port-

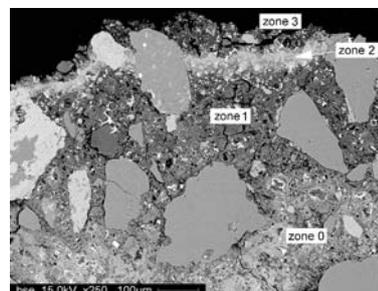


Fig. 3

Oberflächenbereich des Betons C-OPC-2 mit dem unveränderten Kern (zone 0), der inneren porösen Lage (zone 1), der dichten Calcit-Lage (zone 2) und der äusseren porösen Lage (zone 3). Surface area of concrete C-OPC-2 with unaffected core (zone 0), inner porous layer (zone 1), dense calcite layer (zone 2) and outer porous layer (zone 3).

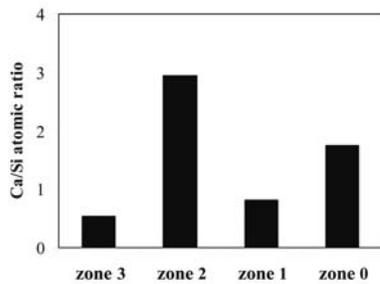


Fig. 4
Atomares Calcium-Silizium-Verhältnis in den verschiedenen Zonen des Betons C-OPC-2.
Atomic calcium-silicon ratio (Ca/Si) in the different zones of concrete C-OPC-2.

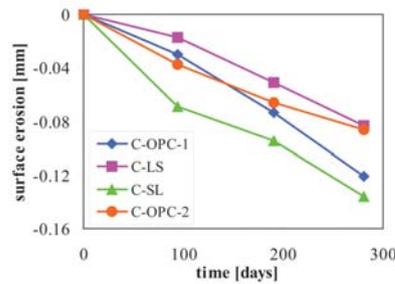


Fig. 5
Oberflächenerosion der verschiedenen Betone. Mittelwerte für alle ARA.
Surface erosion of the different concrete mixtures. Mean values for all ARA.

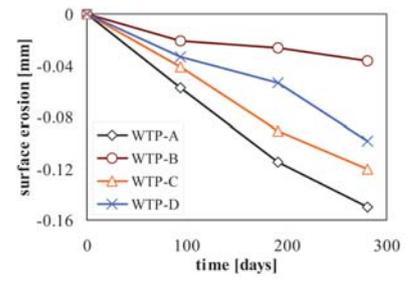


Fig. 6
Oberflächenerosion in den verschiedenen ARA. Mittelwerte für alle Betone.
Surface erosion in the different wastewater treatment plants. Mean values for all concrete mixtures.

– Zone 1: Lage mit gegenüber dem unveränderten Beton erhöhten Porosität (Dicke: 0,7–1,3 mm)
– Zone 0: unveränderter Beton
Abgesehen von der Porosität zeigen diese Zonen auch Unterschiede in ihrer Zusammensetzung, die in erster Linie das Calcium-Silizium-Verhältnis (Ca-Si) betreffen (Fig. 4). Zone 3 ist wegen der chemischen Auflösung von Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und der Destabilisierung der Haupthydratphasen (C-S-H) bezüglich Ca ausgelaugt. Die hohe Dichte in Zone 2 wird durch eine Ausfällung von Calcit (CaCO_3) verursacht. Die Auslaugung in der Zone 1 führt wiederum zu einem relativ tiefen Ca-Si-Verhältnis verglichen mit dem unveränderten Beton (Zone 0). Die Erosion des Betons C-SL ist am höchsten und die des Betons C-LS am tiefsten (Fig. 5). Eine Verringerung des w/z von 0,50 zu 0,40 verringert die Erosion. Zwischen den verschiedenen ARA treten substantielle Unterschiede in der Betonerosion auf (Fig. 6). Die Prüfkörper mit der besseren Nachbehandlung (Dauer 90 Tage) zeigen geringere Erosionsraten als die schlechter nachbehandelten (Dauer 28 Tage).

Diskussion

Mit fortschreitender Erosion wird Portlandit aufgelöst und das Calcium wird aus dem C-S-H ausgelaugt, wie das durch die Ände-

landite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dissolution and decalcification of the main hydration product (C-S-H). The high density in zone 2 is due to calcite (CaCO_3) precipitation. Ca leaching in zone 1 leads to a relatively low Ca/Si ratio compared to the unaffected core (zone 0). The degree of concrete erosion is

rungen des Ca-Si-Verhältnisses aufgezeigt wird. Allerdings beeinflusst die chemische Ausfällung von Calcit (Zone 2) den Fortschritt der Erosion. Calcit wird ausgefällt, wenn das im Beton gelöste Ca mit dem im Wasser gelösten Bikarbonat (HCO_3^- = «Wasserhärte») reagiert. Diese Calcit-ausfällung versiegelt den Beton und verlangsamt den weiteren Angriff [5]. Sie wird durch eine hohe Wasserhärte begünstigt, und die Erosion wird damit verringert. Wegen ihrer hohen Porosität weisen die ausgelaugten Zonen nur eine geringe Festigkeit auf. Ihre Entfernung durch Reinigen würde die Betonerosion wieder beschleunigen und sollte deshalb vermieden werden [6, 7]. Die jährliche Erosionsrate der alle drei Monate gereinigten Betonoberflächen variiert zwischen 0,02 und 0,30 mm in den vier ARA. Eine gute Nachbehandlung verbessert den Erosionswiderstand. Wegen der Bildung der schützenden Calcitschicht nimmt die Erosion von nicht gereinigten Betonoberflächen nicht linear über die Zeit ab. Deshalb kann erwartet werden, dass die experimentell bestimmten Erosionsraten bei längeren Reinigungsintervallen tiefer liegen würden. Innerhalb der geplanten Instandsetzungsintervalle von 25 Jahren kann erwartet werden, dass die Betonerosion zu keiner verringerten Dauerhaftigkeit führt.

Referenzen/References

- [1] C. Parker; The corrosion of concrete. Isolation of a species of bacterium associated with the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulphide. Aust. J. Exp. Biol. Med. Sci. 23 (1945) 14–17.
- [2] A. Attal, M. Brigodiot, P. Camacho, J. Manem; Biological mechanisms of H_2S formation in sewer pipes, Water Sci. Technol. 26 (1992) 907–914.
- [3] W. Sand; Microbiological mechanisms of deterioration of inorganic substrates – a general mechanistic overview. Int. Biodet. Biodeg. 40 (1997) 183–190.
- [4] S. Okabe, H. Satoh, Y. Watanbe; In situ analysis of nitrifying biofilm as determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes. Appl. Envir. Microbiol. 65 (1999) 3182–3191.
- [5] W. Pflingsten; Experimental and modeling indications for self-sealing of cementitious low- and intermediate-level waste repository by calcite precipitation. Nucl. Tech. 140 (2002) 63–82.
- [6] H. Grube, W. Rechenberg; Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer. Beton 11 (1987) 446–451.
- [7] A. Leemann, B. Lothenbach, C. Hoffmann, S. Bischof, P. Lunk; Concrete corrosion in a wastewater plant. In: Concrete in Aggressive Aqueous environments, in: M.G. Alexander, A. Bertron (Eds), Proc Inter RILEM TC 211-PAE Final Conf, Toulouse, 2009, 116–124.

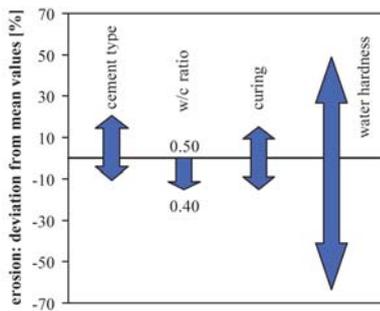


Fig. 7
Einfluss von Zementart, w/z und Wasserhärte basierend auf den experimentellen Daten.
Influence of cement type, w/c and water hardness based on the experimental results.

the highest for C-SL and the lowest for C-LS (Figure 4). A reduction of w/c from 0.50 to 0.40 decreases the erosion.

There are substantial differences in concrete erosion between the different WTPs (Fig. 6). The specimens with a curing time of 90 days in water exhibit a lower rate of erosion than specimens that have been air cured for 28 days.

Discussion

With progressing erosion, portlandite is leached and CSH is decalcified as shown by the changes in the Ca/Si ratio (zones 1–3). However, the precipitation of calcite and the resulting formation of a dense calcite layer (zone 2) influences erosion propagation. Calcite is precipitated when the dissolved calcium ions in concrete react with the bicarbonate that is present in the attacking solution. The precipitated calcite seals the surface of the concrete efficiently, slowing down further attack [5]. Moreover, calcite formation increases with water hardness and the erosion rate decreases. Due to their high porosity, the leached zones are of low strength. The removal of these protective zones by cleaning the concrete surface will accelerate concrete erosion and should be prevented [6, 7].

The yearly erosion rates of concrete surfaces cleaned four times per year vary between 0.02 and 0.30 mm in the four WTPs. Good

Die Erosionsrate in einer ARA wird durch die Zementart, den w/z und die Wasserhärte beeinflusst. Basierend auf den experimentellen Resultaten kann der Einfluss der verschiedenen Parameter mit der Wasserhärte als dominierenden Grösse spezifiziert werden (Fig. 7).

Schlussfolgerungen

Die Erosion von Betonoberflächen in Nitrifikationsbecken von ARA wird durch das Auflösen der Hydratphasen aufgrund eines biologisch induzierten Säureangriffs verursacht. Die Erosionsrate wird hauptsächlich durch die Wasserhärte und die damit zusammenhängende Calcit ausfällung reduziert und weniger stark durch die Betonzusammensetzung gesteuert. Da der pH-Wert im Beton nur in der angegriffenen Zone verändert wird, besteht keine erhöhte Gefahr für Bewehrungskorrosion, solange die Erosion nicht das Niveau der Bewehrung erreicht. Bei der vorhandenen Erosionsrate wird die Dauerhaftigkeit der Becken nicht gefährdet. Ein SIA-Merkblatt mit Empfehlungen für den Betonbau in ARA ist in Bearbeitung.

Danksagung/Acknowledgements

Das Projekt wurde von der cemsuisse gefördert.
The project was supported by cemsuisse.

curing increases the resistance of the concrete surface to erosion. Due to the formation of protective layers, erosion of uncleaned concrete surfaces is a nonlinear process that decreases with time. Therefore, the experimentally determined erosion rates can be expected to be lower for longer cleaning intervals. In the planned intervals of 25 years for the rehabilitation of the structures, concrete erosion is not expected to lead to decreased durability. The erosion rate in a WTP is influenced by cement type, w/c ratio and water hardness. Based on the experimental results, the importance of the different parameters can be specified, the water hardness being the most dominant one (Fig. 7).

Conclusions

Erosion of the concrete surface in nitrification basins of WTPs is caused by the dissolution of hydration products due to a biologically triggered acid attack. The rate of erosion is mainly reduced by water hardness and the related calcite precipitation with the concrete composition having a smaller impact. Since the pH value in concrete is only influenced in the zone of attack, there is no increased danger of corrosion of the reinforcement, provided the erosion does not penetrate below the depth of cover. The erosion rates indicate that the durability of the structures is not endangered. A Swisscode (SIA) guideline with recommendations for concrete in WTPs is in preparation.

Autoren/Authors

Andreas Leemann
Dr. sc. nat, dipl. Geol. ETH
Empa, Abteilung Beton/Bauchemie
CH-8600 Dübendorf
andreas.leemann@empa.ch

Cathleen Hoffmann
dipl. Bauing. TU
Empa, Abteilung Beton/Bauchemie
CH-8600 Dübendorf
cathleen.hoffmann@empa.ch

Optimierung des Betonsystems der Alptransit-Baustelle Sedrun

Optimisation of the concrete production at the Alptransit construction site of Sedrun

Conradin Hürlimann

Einleitung

Um die Zunahme des alpenquerenden Verkehrs zu bewältigen, realisiert die Alptransit Gotthard AG eine Flachbahn. Als Herzstück dieser Transversale wird der 57 km lange Gotthard-Basistunnel in fünf Teilabschnitten aufgeföhren (Fig. 1). Das Teilstück Sedrun als mittlerer Abschnitt des Tunnels wird durch einen 1 km langen Zugangsstollen und zwei anschließende, parallele, 800 m tiefe Schächte erschlossen [1, 2]. Sämtliche Materiallieferungen erfolgen durch einen dieser Schächte.

Die Gesteinskörnung für den Beton wird aus dem Ausbruchsmaterial des Vortriebs über Tag aufbereitet und wieder zum Schacht-

Introduction

In order to cope with the increase in transalpine traffic, Alptransit Gotthard AG is constructing a minimum-gradient rail link. As the centrepiece of this transalpine link, the 57 km long Gotthard base tunnel is being driven in five partial sections (Fig. 1). The Sedrun section, as the central section of the tunnel, is accessed by means of a 1 km long access tunnel and two connecting, parallel, 800 m deep shafts [1, 2]. All deliveries of materials take place through one of these shafts.

The aggregate for the concrete is prepared above ground from the material excavated during the driving of the tunnel and trans-

fuss transportiert, wo sich auch die Betonanlage befindet. Hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit prägen das Projekt ebenso wie grosse Herausforderungen an logistische Lösungen. In diesem Umfeld gilt es ein Betonsystem zu betreiben, das sowohl die Anforderungen des Bauherrn als auch jene des Verarbeiters zu erfüllen vermag. Der Unternehmer konnte in Zusammenarbeit mit den Lieferanten den bereits gut funktionierenden Gewölbebeton optimieren und damit noch besser auf die Bedürfnisse der Baustelle abstimmen.

Betonanlage und Transportsystem

Die Platzverhältnisse in der Kaverne, wo sich die Betonanlage befindet, sind beschränkt und die Anforderungen an den maximalen Betonausstoss der Anlage durch das Bauprogramm definiert. Das Verladen des Betons auf die Transportzüge (Fig. 2) darf also nur wenig Zeit in Anspruch nehmen, da sonst die Ausstossmenge der Anlage massiv reduziert würde. Mit den RoCon-Shuttles (Fig. 3) wurde eine spezielle Lösung für diese Baustelle neu entwickelt. Der tägliche Beton-Ausstoss variierte 2009 um die 600 bis 800 m³ mit Spitzen von über 900 m³.

Anforderungen des Bauherrn an den Festbeton

Bereits vor der Ausschreibung der Bauarbeiten mussten potenzielle Anbieterteams – jeweils ein Zement- und ein Zusatzmittellieferant – in einem gross angelegten Präqualifikationsverfahren nachweisen, dass sich mit ihren Produkten die vorgegebenen Betoneigenschaften erreichen liessen. Die vorgeschlagenen Betonmischungen wurden in einem auf-

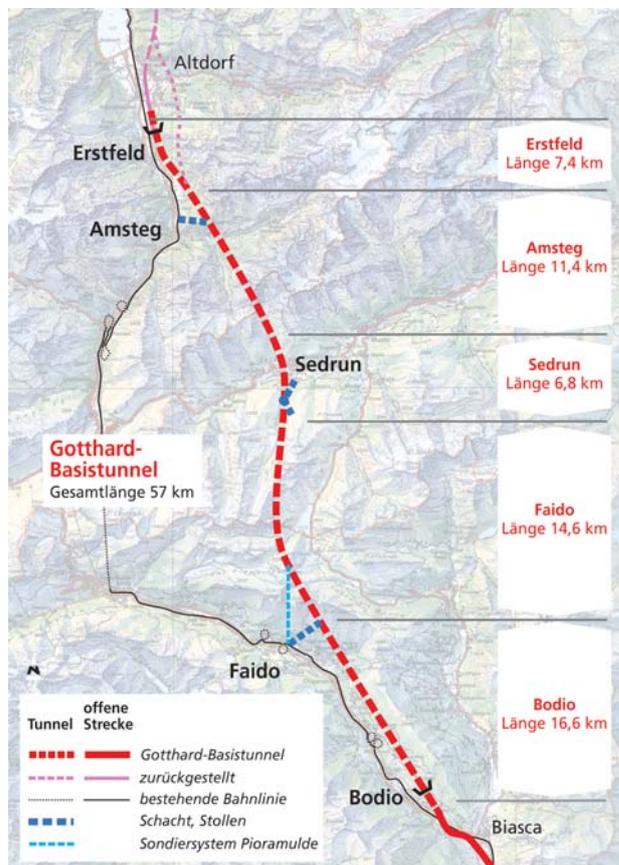


Fig. 1
Übersicht Gotthard Basistunnel (© Alptransit Gotthard AG).
Overview of Gotthard base tunnel (© Alptransit Gotthard AG).

ported again to the foot of the shaft, where the concrete production plant is also located. The project involves high requirements in terms of durability as well as major challenges in terms of logistical solutions. Against this background, the aim is to operate a concrete system that manages to fulfil both the requirements of the owner and those of the contractor. In cooperation with the suppliers, the contractor has been able to optimise the already well-functioning lining concrete and thus tailor it even more closely to the requirements on the construction site.

Concrete production plant and transport system

The space situation in the cavern in which the concrete production plant is located is restricted and the requirements in terms of the maximum output of concrete from the plant are defined by the construction schedule. Thus the loading of the concrete onto the transport trains (Fig. 2) may only take up a small amount of time, otherwise the output quantity of the plant would be massively reduced. A special solution has been developed for this construction site with the RoCon shuttles (Fig. 3). The daily output of concrete varied in 2009 between 600 and 800 m³, reaching sometimes even more than 900 m³.

Owner's requirements with regard to the hardened concrete

Even before the request for tenders for the construction work, potential teams of bidders – consisting in each case of a cement supplier and an additives supplier – had to prove, in a large-scale pre-qualification procedure, that the specified concrete properties are achieved using their products. The proposed concrete mixes were tested thoroughly in an extensive testing process [3]. The requirements for the hardened concrete in the Gotthard base tunnel are intended to guarantee a durability of at least 100 years. Specifically, this means:



Fig. 2
Ladevorgang unter beengten Verhältnissen (© Sika Schweiz AG).
Loading procedure in confined conditions (© Sika Schweiz AG).

wändigen Prüfverfahren getestet [3].

Die Anforderungen an den Festbeton im Gotthard-Basistunnel sind ausgelegt, um eine Dauerhaftigkeit von mindestens 100 Jahren zu gewährleisten. Dies heisst konkret:

- zuverlässige mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit, E-Modul)
- kontrolliertes Schwindverhalten
- erhöhte Sulfatbeständigkeit
- hohe Wasserundurchlässigkeit
- hoher Widerstand gegen Alkali-Aggregat-Reaktion

Die Arbeitsgemeinschaft entschied sich für den Einsatz eines CEM III/B 32,5 N für alle Betonsorten. Damit

- reliable mechanical properties (compressive strength, modulus of elasticity)
- controlled shrinkage behaviour
- increased resistance to sulphates
- high impermeability to water
- high resistance to alkali-aggregate reaction.

The consortium decided on the use of a CEM III/B 32.5 N for all concrete types. This means that the high durability of the concrete for the tunnel lining is reliably achieved and that the temperatures remain low on hydration. For logistical reasons, no second cement can be used in large quantities at the concrete production plant.

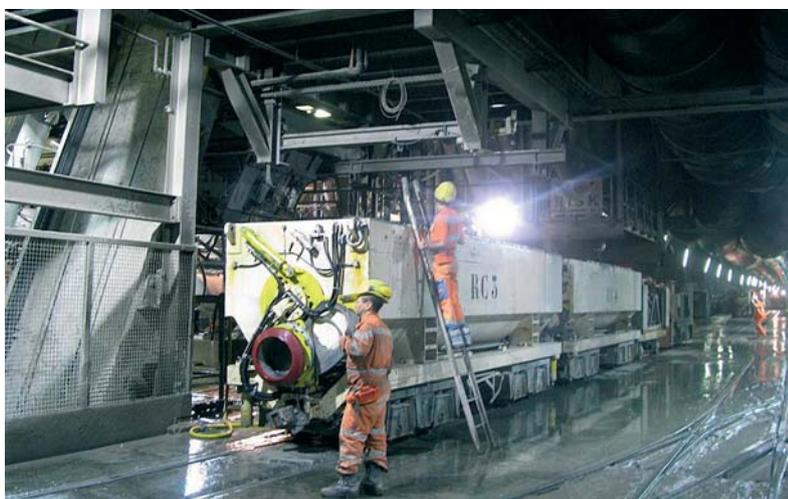


Fig. 3
RoCon-Shuttle beim Ladevorgang unter Tag (© Arge Transco).
RoCon shuttle during loading underground (© consortium Transco).



Fig. 4
Gewölbeschlagen. Montage der Stirnschalung (© Arge Transco).
Lining formwork car. Installation of the bulkhead formwork (© consortium Transco).

Betonmischungen Concrete design mixes		Bestehend Existing	Optimiert Optimised
Zement Cement	CEM III/B 32,5 N [kg/m ³] CEM I 42,5 N [kg/m ³]	375	275 100
Flugasche Fly ash	Hydrolent [kg/m ³]	70	70
Zusatzmittel Additives	Sika ViscoCrete-AT 304 [%] SikaPump-AT 31 [%] SikaTard-AT 11 [%]	1,2	1,5 0,3 0,0–0,2
Gesteinskörnung Aggregate	Total [kg/m ³] Sand 0/4 [%] Kies/Gravel 4/8 [%] Kies/Gravel 8/16 [%] Kies/Gravel 16/32 [%]	1750 22 10 41 27	1750 22 10 41 27
w/z w/c	[-]	~ 0,53	~ 0,52
w/b	[-]	~ 0,45	~ 0,44
Ausbreitmass Flow consistency	bei Herstellung [mm] on mixing [mm]	580–630	600–650
Verarbeitbarkeit Workability	Ausbreitmass > 500 mm [h] flow consistency > 500 mm [h]	3,5	4,0
Ausschalfrist Stripping time	Ab Betonherstellung [h] from mixing [h]	~ 16	~ 12,5

Fig. 5
Betonmischungen mit Anforderungen nach SIA 162 (1989): B40/30, w/b ≤ 0,50, d_{max} = 32 mm, Wasserleitfähigkeit ≤ 10g/m²h bei d = 20 cm, Widerstandsfähigkeit gegen chemischen Angriff XA2 (mit Sulfat).
Concrete design mixes with requirements according to SIA 162 (1989): B40/30, w/b ≤ 0,50, d_{max} = 32 mm, permeability ≤ 10g/m²h at d = 20 cm, resistance against chemical attack XA2 (with sulphates).

lässt sich die hohe Dauerhaftigkeit des Gewölbebetons sicher erreichen, und die Temperaturen bei der Hydratation bleiben gering. Aus logistischen Gründen kann auf der Betonanlage kein zweiter Zement in grossen Mengen verwendet werden.

Anforderungen des Unternehmers an den Gewölbebeton

Für die Herstellung des Betons, Beladung des Zugs, Transport zur Schalung und Einbringen müssen 2,5 bis 3 Stunden eingerechnet werden. Um mögliche Störungen zu berücksichtigen und um eine problemlose Reinigung des Betonzugs vor jedem Befüllen zu erreichen, wird eine Offenzeit von vier Stunden verlangt.

Der Beton soll beim Einbringen noch ein Ausbreitmass von mindestens 500 mm aufweisen. Damit er stabil bleibt, wird er mit einem Ausbreitmass von 600 bis 650 mm hergestellt und in den Zug verladen.

Das ambitionierte Bauprogramm des Unternehmers verlangt, dass in den Bereichen der Einspurröhren jede Schalung (Fig. 4) innert 24 Stunden einmal umgesetzt werden kann. Um zeitgerecht ausschalen zu können, fordert der Unternehmer 10 Stunden nach Ende des Einbringens des Betons eine Festigkeit von mindestens 5 N/mm².

Der Wasserzementwert (w/z) und die Betontemperatur beeinflussen den Konsistenzverlauf und die Entwicklung der Frühfestigkeit gegenläufig. Eine Senkung des w/z oder eine Erhöhung der Ausgangstemperatur vermindert die Offenzeit und beschleunigt die Festigkeitsentwicklung und umgekehrt. Die Gegebenheiten auf der Baustelle verursachen Schwankungen der Frischbetontemperatur zwischen 18 und 24 °C bei gleichzeitig ändernder Sieblinie, Petrografie (insbesondere Glimmergehalt) und Feuchtegehalt der Gesteinskörnung. Die Betonrezeptur muss deshalb insbesondere eine Robustheit gegenüber diesen Schwankungen aufweisen, um sowohl die Anforderungen an

Contractor's requirements with regard to the tunnel lining concrete

Between 2.5 to 3 hours must be allowed for the production of the concrete, loading of the train, transport to the formwork and placement. In order to take into account possible interruptions and to achieve a problem-free cleaning of the concrete train before each filling, an open time of four hours is required.

The concrete should still display a flow consistency of ≥ 500 mm on placement. In order that the concrete should remain stable, it is mixed and loaded into the train with a flow consistency of 600–650 mm.

The contractor's ambitious construction schedule demands that each formwork (Fig. 4) can be relocated once within 24 hours in the area of the single-track tunnels. In order to allow the formwork to be struck on schedule, the contractor demands a strength of at least 5 N/mm² ten hours following the end of placement of the concrete.

The water/cement ratio and concrete temperature have a contrary influence on the consistency and the development of early strength. A reduction in the water/cement ratio or an increase in the initial temperature reduces the open time and accelerates the development of strength and vice versa. The conditions on the construction site cause fluctuations in the fresh concrete temperature between 18 and 24 °C, with simultaneous changes in the particle size distribution curve, petrography

Verarbeitbarkeit als auch jene an die Frühfestigkeiten zu erfüllen. Die ursprüngliche Rezeptur (Fig. 5) bewährte sich eigentlich sehr gut. Die Frühfestigkeitsentwicklung ist jedoch für die kommenden Etappen in den Einspurröhren zu langsam.

Feldversuche auf der Baustelle

Um aussagekräftige Versuchsergebnisse zu erhalten, wurde der Beton auf der Anlage unter Tag produziert und im RoCon gelagert. Mit fortschreitender Anzahl von Feldversuchen erwies sich die Aussagekraft der vorgängigen Laborversuche in diesem speziellen Fall als sehr gering. So zeigten zum Beispiel Beschleuniger, die im Labor keinen Einfluss auf die Offenzeit hatten, beim Baustellenversuch mit derselben Betonmischung ein markant schnelleres Ansteifen des Betons [4].

Lösungsvarianten für die Optimierung

Zuerst wurde der Wechsel auf einen CEM III/B 42,5 N untersucht. Die Frühfestigkeiten verbesserten sich markant. Die gleichbleibende Offenzeit musste jedoch mit einem stärker verzögernden Fließmittel erkaufte werden, was den Gewinn an Festigkeiten etwas schmälerte.

Der Wechsel des Zements barg jedoch zu grosse Risiken: Obschon die Optimierung nur für eine einzige Rezeptur notwendig war, hätten sämtliche Betonrezepturen der Anlage auf einen Schlag umgestellt werden müssen. Daher wurde versucht, die erwünschte

(in particular the mica content) and moisture content of the aggregate. Therefore, the concrete mix design must, in particular, display robustness with respect to these fluctuations in order to fulfil both the requirements in terms of both workability and early strength.

The mix design (Fig. 5) has actually proved to be very successful. However, the development of early strength is too slow for the subsequent stages in the single-track tunnel tubes.

Field testing at the construction site

In order to obtain meaningful test results, the concrete was produced underground at the plant and stored in the RoCon. As the number of field tests increased, the importance of the precedent laboratory tests was shown to be surprisingly low in this particular case. For example, accelerators which had no influence on the open time in the laboratory led to a strikingly faster loss of workability of the concrete in tests on site using the same concrete mix [4].

Solution variants for optimisation

First, the change to a CEM III/B 42.5 N was investigated. The early strengths improved markedly. However, keeping the open time the same required the use of a more strongly retardant superplasticizer, which somewhat reduced the increase in strength.

However, changing the cement involved excessively high risks. All the concrete mix designs at the plant would immediately have to be changed, even though the optimisation is only necessary for a single formulation. For this reason the attempt was made to achieve the desired increase in strength using the existing CEM III/B 32.5 N with different additives. The original superplasticizer proved throughout the trials to be the optimal one for the combination of the cement with the problematic aggregate.

A further variant was added during the trial phase: The partial

Owner

Alptransit Gotthard AG

Project authors

Ingenieurgesellschaft Gotthard-Basistunnel Süd c/o Lombardi AG, Minusio; Amberg Engineering AG, Regensdorf; Pöyry AG Zurich

Execution

Consortium Transco - Sedrun: Implenia Bau AG, Aarau; Frutiger AG, Thun; Bilfinger Berger AG, Reichenburg and Munich (D); Pizzarotti SA, Bellinzona and Parma (I)

Concrete system

Holcim (Schweiz) AG, Zurich; Sika Schweiz AG, Zurich

Bauherrschaft

Alptransit Gotthard AG

Projektverfasser

Ingenieurgesellschaft Gotthard-Basistunnel Süd c/o Lombardi AG, Minusio; Amberg Engineering AG, Regensdorf; Pöyry AG Zurich

Ausführung

Arge Transco - Sedrun: Implenia Bau AG, Aarau; Frutiger AG, Thun; Bilfinger Berger AG, Reichenburg and München (D); Pizzarotti SA, Bellinzona und Parma (I)

Betonsystem

Holcim (Schweiz) AG, Zurich; Sika Schweiz AG, Zurich

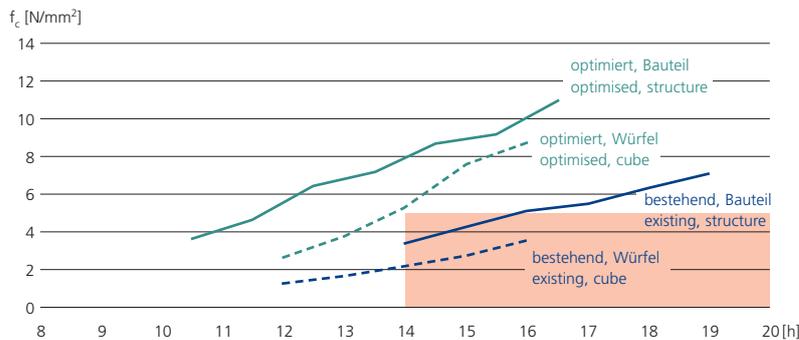


Fig. 6

Frühfestigkeitsentwicklung optimierter und bestehender Rezepturen mit Anforderungen des Unternehmers (> 5 N/mm² nach 14 h, roter Bereich).
Development of early strength of existing and optimised mix design with contractor's requirements (> 5 N/mm² after 14 h, red zone).



Fig. 7

Fertig betonierte Gewölbeblöcke (Vorläufer) (© Arge Transco).
Finished concreted lining sections (front carriage) (© consortium Transco).

Festigkeitssteigerung mit dem bestehenden CEM III/B 32,5 N mit anderen Zusatzmitteln zu erreichen. Das ursprünglich eingesetzte Fließmittel erwies sich über die ganze Dauer der Versuche als optimal für die Kombination des Zements mit der problematischen Gesteinkörnung.

Während der Versuchsphase kam eine weitere Variante hinzu: Der teilweise Ersatz des CEM III/B 32,5 N durch einen CEM I 42,5 N, um u.a. die Frühfestigkeiten zu steigern. Verschiedene Mischungen mit dieser Grundidee wurden geprüft. Diese Variante weist folgende Vorteile auf:

- Dosierung des CEM I 42,5 N nur bei dieser Betonsorte notwendig. Alle andern Rezepturen können unverändert beibehalten werden.
- Bedarf an CEM I 42,5 N ist so gering, dass nur ein Silo der Betonanlage damit bestückt werden muss.
- Für die Mischung werden nur Zusatzmittel verwendet, die

substitution of the CEM III/B 32.5 N with a CEM I 42.5 N. The aim here was to increase early strength. Different mixes were tested following this basic idea. This variant has the following advantages:

- Addition of the CEM I 42.5 N is only necessary with this concrete type. All other mix designs can be retained without any change.
- The quantity of CEM I 42.5 N required is so low that only one silo at the concrete production plant would be necessary for this.
- Only additives which are already available at the concrete production plant and which have been tried and tested on site are used for the mix.
- The mix offers some flexibility in reacting to temperature influences. For example, at low temperatures, if the early strengths are not achieved, more CEM I 42.5 N can be added.
- The outstanding properties of the hardened concretes in terms of durability, which were achieved using the pure CEM III/B 32.5 N, are only minimally reduced.

This solution fulfils all the requirements in terms of workability and strength development (Fig. 6). The decision was therefore made in favour of this last variant. Since the construction management team approved this mix, it is being used successfully (Fig. 7).

bereits auf der Betonanlage vorhanden sind und die sich auf der Baustelle bewährt haben.

- Die Mischung bietet eine gewisse Flexibilität, auf Temperatureinflüsse zu reagieren. So kann bei tiefen Temperaturen, sollten die Frühfestigkeiten nicht erreicht werden, mehr CEM I 42,5 N zugegeben werden.
- Die hervorragenden Eigenschaften des Festbetons bezüglich Dauerhaftigkeit, die mit dem reinen CEM III/B 32,5 N erreicht wurden, reduzieren sich nur minimal.

Mit dieser Lösungsidee können die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und die Festigkeitsentwicklung erfüllt werden (Fig. 6). Die Entscheidung fiel daher zugunsten dieser letzten Variante und erhielt die Bewilligung der Bauleitung. Seither wird diese Mischung mit Erfolg eingesetzt (Fig. 7).

Referenzen/References

- [1] P. Teuscher, P. Zbinden; Die Alptransit-Projekte am Lötschberg und am Gotthard, Betonbau in der Schweiz, SIA für fib-CH, 2002.
- [2] D. Marti, R. Meier, A. Theiler; Gotthard-Basistunnel – Teilabschnitt Sedrun, tunnel 4/2004, S. 22 ff.
- [3] B. Gugelmann; Optimierung der Betonproduktion auf der AlpTransit-Baustelle Bodio, SIA für fib-CH, 2006.
- [4] J. Schlumpf; Beschleunigter Konstruktionsbeton, Betonbau in der Schweiz, SIA für fib-CH, 2006.

Autor/Author

Conradin Hürlimann
dipl. Bauing ETH
Produktionsingenieur Tunnelbau
Sika Schweiz AG
CH-8048 Zürich
huerlimann.conradin@ch.sika.com

Hochwertiger Beton aus Tunnelausbruch am Gotthard-Basistunnel

High grade concrete for the Gotthard Base Tunnel using tunnel spoil material

Rupert H. Lieb

Einleitung

Die AlpTransit Gotthard AG, eine hundertprozentige Tochtergesellschaft der Schweizerischen Bundesbahnen, erstellt eine zukunftsorientierte Flachbahn durch die Alpen. Herzstück der neuen Bahnverbindung ist der Basistunnel am Gotthard. Der mit 57 km längste Eisenbahntunnel der Welt wird voraussichtlich Ende 2017 in Betrieb genommen.

Das Tunnel-, Stollen- und Schachtsystem weist eine Gesamtlänge von mehr als 150 km auf. Ende 2009 sind davon fast 142 km ausgebrochen, dies sind mehr als 93%. Auch die Arbeiten des Innenausbaus kommen gut voran. Mit mehr als 100 km sind rund 90% Sohle betoniert, vom Gewölbe sind es immerhin auch schon fast 60%.

Insgesamt werden am Gotthard-Basistunnel rund 25 Mio. Tonnen Ausbruchmaterial anfallen. Dies entspricht der Länge eines Güterzugs von Zürich nach New York (rund 6350 km). Für die Her-

Introduction

The AlpTransit Gotthard AG, a fully-owned subsidiary of the Swiss Federal Railways (SBB), is constructing a future-oriented low-gradient railway line through the Alps. The centrepiece of the new rail link is the Gotthard Base Tunnel through the Gotthard Massif. With a length of 57 km it will be the longest railway tunnel of the world and its completion and bringing into service is planned for the end of 2017. This pioneer work of the 21st century will lead to a marked improvement in the travel and transportation possibilities in the heart of Europe. The system of tunnel, galleries and shafts has a total length of more than 150 km. Per end of 2009 almost 142 km have been excavated, i.e. over 93%. The interior works are also progressing well. With more than 100 km, around 90% of the tunnel floor has been concreted, and the tunnel lining is not very far behind with almost 60%.

stellung des Spritzbetons für die Ausbruchsicherung und des Betons für den Innenausbau werden bis zum Abschluss der Rohbauarbeiten total mehr als 7 Mio. Tonnen aufbereitete Gesteinskörnungen benötigt werden.

Verwendung von Ausbruchmaterial für Beton

Als in den frühen 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts die Projekte für die alpenquerenden Basistunnel am Gotthard und Lötschberg konkrete Formen annahmen, mussten viele technische Aspekte, zu denen damals nur wenige oder keine gesicherten Erkenntnisse vorlagen, geklärt werden. Im Zusammenhang mit der Betonherstellung waren dies vor allem die Wiederverwendbarkeit von Ausbruchmaterial, der Einfluss der hohen Gebirgstemperaturen auf die Qualität und die gewünschte 100-jährige Dauerhaftigkeit des Betons und Spritzbetons sowie das Thema der Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR).

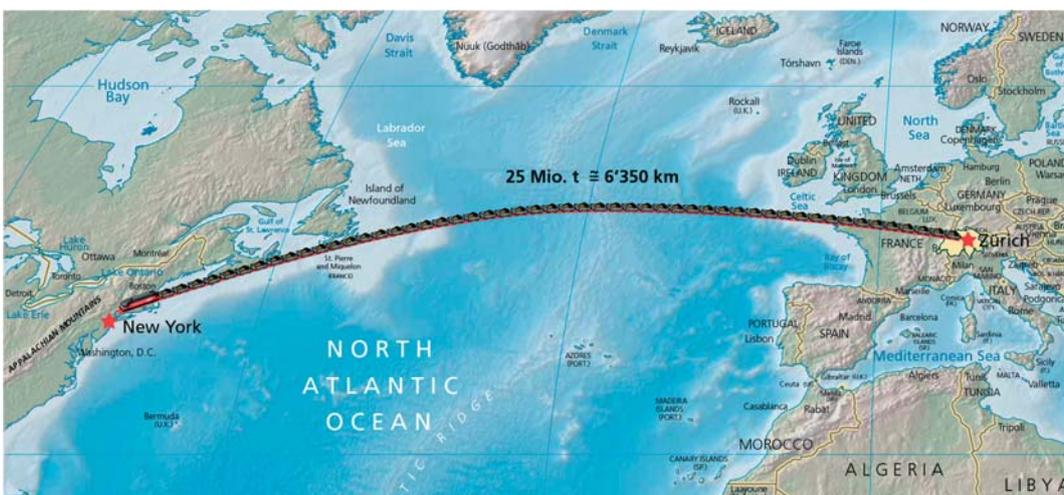


Fig. 1

Das Ausbruchmaterial würde einen Güterzug von Zürich bis New York füllen.

The excavated material would correspond to a packed freight train from Zurich to New York.



Fig. 2
Materialbilanz Gotthard-Basistunnel.
Materials balance in the Gotthard Base Tunnel.

Altogether, for the Gotthard Base Tunnel around 25 million tons of material have to be excavated. This corresponds to the length of a freight train from Zurich to New York (about 6,350 km). For the installation of the primary sprayed concrete outer lining and the concrete for the secondary inner lining up the completion of the construction works, in total more than 7 million tons of processed aggregates will be necessary.

Use of tunnel spoil material for concrete

When in the early 1990s the projects for the alpine-traversing Gotthard and Lötschberg base tunnels assumed definite forms, many technical aspects had to be clarified, for which at that time there was little proven technical knowledge. In connection with the concrete production, this concerned mainly the re-use of spoil material, the influence of the high rock temperatures on the material quality and the required 100-year durability of the concrete and sprayed concrete, as well as the question of alkali-aggregate reaction (AAR).

The recycling of the excavated spoil material was a necessity on site, to be able to fulfil justified environmental demands, but also because of the impossibility of al-

Die Wiederverwertung des Ausbruchmaterials auf den Baustellen war eine Notwendigkeit, um berechnete Umweltauflagen erfüllen zu können, aber auch wegen der Unmöglichkeit einer durchgehenden Fremdversorgung für Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton und Spritzbeton. Der vollständige Abtransport und die anderweitige Verwendung bzw. Ablagerung von nicht verwendetem Ausbruchmaterial wäre auch aus logistischen Gründen (fehlende Transportmöglichkeiten) mindestens in einzelnen Teilabschnitten unmöglich gewesen.

Mit einer Dissertation an der ETH Zürich wurde die grundsätzliche Eignung von aufbereitetem Ausbruchmaterial (insbesondere Material von Tunnelbohrmaschinen) zur Herstellung von Beton und vor allem Spritzbeton mit hohen Anforderungen nachgewiesen [1]. Basierend auf Aufbereitungsversuchen für den Gotthard-Basistunnel wurde ein Prüfplan für die Gesteinskörnungen aus Tunnelausbruchmaterial entwickelt. Dieser enthält sowohl Prüfungen am Rohmaterial wie auch solche an den aufbereiteten Gesteinskörnungen.

Die zeitlichen Abhängigkeiten bezüglich Materialanfall und -bedarf einerseits und die einzuhaltenen Mindestanforderungen

ways ensuring a third-party supply of aggregate to produce the concrete and sprayed concrete. Complete removal and re-use elsewhere or the disposal of unused spoil material would also have been impossible for logistic reasons (no transport possibilities) at least in some sections.

With a dissertation completed at the Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich, the basic feasibility of using processed spoil material (especially TBM material) to manufacture concrete and above all sprayed concrete to high specifications was demonstrated [1]. Based on concrete production tests specially devised for the Gotthard Base Tunnel, a testing plan for obtaining aggregates from tunnel spoil material was developed. This involved testing both the raw materials and the processed aggregates.

The time-dependence with regard to, on the one hand, spoil material becoming available and the specifications and, on the other, meeting the minimum requirements regarding the mechanical and petrographic properties of the spoil material, limited the possibility of self-supply. In the case of the Gotthard Base Tunnel, especially in the initial phase, one had to work with bought material, because not enough processed material was available. New technical frontiers were crossed in order to process as much material as possible. Thus in the subsection Sedrun a mica separation plant to reduce the mica content in the sand (particle size range 0–1 mm) was set up. The method proved to be quite satisfactory and the mica content could be limited, with a minimum use of flotation, to less than 20 mica particles % (i.e. parts per hundred).

Special requirements placed on the production

The overburden for the Gotthard Base Tunnel is up to 2,300 m and thus one has to reckon with rock temperatures of up to about 50 °C. Further, since the distances between the concrete production

der mechanischen und petrografischen Eigenschaften des Ausbruchmaterials andererseits beschränken die Selbstversorgungsmöglichkeit. Am Gotthard-Basistunnel musste vor allem in der Anfangsphase teilweise mit zugekauftem Material gearbeitet werden, da noch nicht genügend aufbereitetes Material zur Verfügung stand. Um möglichst viel Material aufzubereiten, wurde technisches Neuland betreten. So wurde im Teilabschnitt Sedrun eine Glimmerflotationsanlage zur Reduktion des Glimmergehalts im Sand (Korngruppe 0–1 mm) eingesetzt. Das Verfahren hat sich bewährt und der Glimmeranteil konnte auch mit minimalem Einsatz von Flotationsmittel auf unter 20 Stk.-% beschränkt werden (d.h. von 100 Teilchen sind weniger als 20 Teilchen Glimmerteilchen).

Spezielle Anforderungen an die Herstellung

Die Überlagerung am Gotthard-Basistunnel beträgt bis 2300 m; daher muss mit Felstemperaturen von bis zu ca. 50°C gerechnet werden. Da zudem die Distanzen zwischen Betonproduktion und Einbauort im Tunnel bis zu 30 km betragen, sind die Anforderungen an die eingesetzten Betone und Spritzbetone als aussergewöhnlich zu bezeichnen. Um diesen Umständen gerecht zu werden, wurde ein Zulassungssystem für Betonrezepturen entwickelt und öffentlich ausgeschrieben. Dieses umfasste die drei Stufen Eignungsprüfung, Vorversuche unter Laborbedingungen sowie Hauptprüfung unter Baustellenbedingungen. Mit dem Prüfsystem wurde das Ziel verfolgt und erreicht, die Risiken für die Bauherrschaft betreffend Dauerhaftigkeit des Bauwerks und Mitverantwortung als Lieferant von Gesteinskörnungen zu vermindern. Da am Gotthard-Basistunnel unterschiedliche petrografische Verhältnisse anzutreffen sind, wurden drei Prüfabschnitte Erstfeld/Amsteg, Sedrun und Faido/Bodio definiert. Mit den von den interessierten Anbietern entwickelten Betonrezepturen wurden mit den

plant and where it is needed in the tunnel may be up to 30 km, the demands on the specified concrete and sprayed concrete types were exceptionally high. To satisfy these conditions a technical approval system for the concrete mix designs was developed and a call for tenders was published. This covered the three-level suitability testing, preliminary testing under laboratory conditions as well as the main testing under site conditions. With this testing system the goal was pursued and achieved, whereby the risks for the owner concerning the structure's durability and the shared responsibility as supplier of the aggregate are reduced. Since varying petrographic conditions are encountered in the Gotthard Base Tunnel, three testing sections, namely Erstfeld/Amsteg, Sedrun and Faido/Bodio were defined. The concrete mix designs developed by the interested bidders were produced for the sprayed concrete and the concrete with the typical aggregates of each test section. These were tested with a view to workability as also to quality and durability. The tested mix designs comprise the cement content, chemical and mineral admixtures (additives) and approved by means of publication in the Swiss Official Gazette of Commerce.

The following tests were devised and carried out for the technical approval:

- Open time (workability time): Important in warm, damp climatic conditions for underground transport distances of up to nearly 30 km (more than 3 hours between mixing process and placing the concrete)
- Technical specifications: Compressive strength, early strength, impermeability, resistance to chemical attack
- Taking into account durability: Limiting the water-cement ratio; limiting value for the axial expansion in sulphate tests; minimum cement content

In Switzerland, the problem of alkali-aggregate reaction (AAR) has been widely discussed since

für jeden Prüfabschnitt typischen Gesteinskörnungen Spritzbetone und Betone erzeugt. Diese wurden sowohl hinsichtlich Verarbeitbarkeit wie auch bezüglich Qualität und Dauerhaftigkeit geprüft. Die geprüften Rezepturen umfassen die Dosierung von Zement, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln und wurden mit Publikation im Schweizerischen Handelsblatt zugelassen.

Folgende Prüfungen wurden für die Zulassung formuliert und durchgeführt:

- Offenzeit (Verarbeitungszeit): Wichtig in feucht-warmem Klima bei untertägigen Transportdistanzen bis zu fast 30 km (mehr als 3 Stunden zwischen Mischvorgang und Verarbeitung)
- Technische Anforderungen: Druckfestigkeit, Frühfestigkeit, Wasserdichtigkeit, Widerstand gegen chemischen Angriff
- Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit: Begrenzung des Wasserzementwerts; Grenzwert für die Längenänderung bei Sulfatprüfungen; minimaler Zementgehalt

In der Schweiz wurde seit der zweiten Hälfte der 90er-Jahre die Thematik der Alkali-Aggregat-Reaktion breiter diskutiert. Sie ist eine chemische Reaktion zwischen reaktiven Gesteinskörnungen und freien Alkalien des Porenwassers im Mörtel oder Beton. Dabei entsteht als neues Produkt ein expansives Gel, das zu Rissen und im schlimmsten Fall zur Zerstörung des Betons führt. Gestützt auf mehrere Prüfkampagnen an Gesteinsmaterialien aus dem Bereich des Gotthard-Basistunnels und Inspektionen in diversen Untertagbauwerken, wurde eine AAR-Massnahmenplanung für den Gotthard-Basistunnel entwickelt. Dieses AAR-Konzept, das die bestehenden Materialbewirtschaftungskonzepte sowie das bereits bestehende Beton-Prüfsystem berücksichtigen musste, sieht folgende Punkte vor:

- Regelmässige Überprüfung der potenziellen Reaktivität des Rohmaterials und der daraus aufbereiteten Gesteinskörnun-

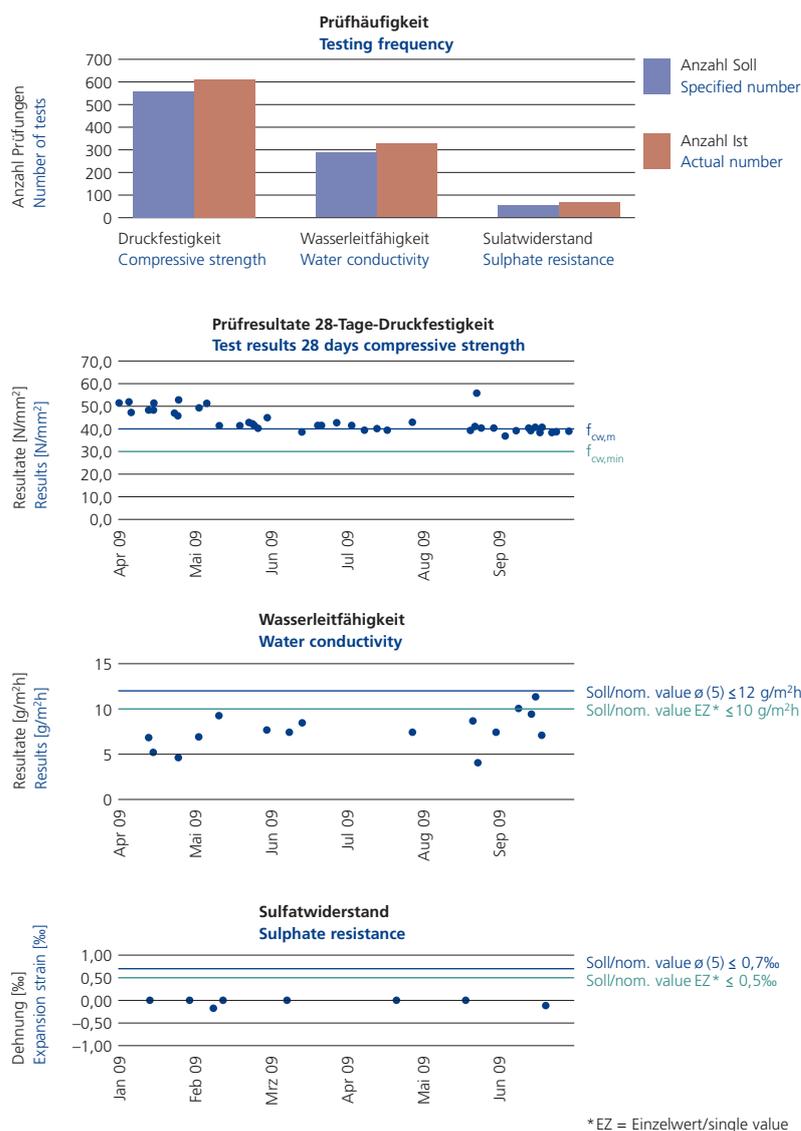


Fig. 3
Ergebnisse der Festbetonprüfungen im Teilabschnitt Sedrun über 6 Monate.
Results of hardened concrete tests in the section Sedrun over a period of 6 months.

1996 or thereabouts. It is primarily a chemical reaction between reactive aggregates and free alkaline impurities in the pore water of mortar or concrete. This produces a new product, an expansive gel, which can lead to cracks and in the worst case to severe damage of the concrete.

Referenzen/References

[1] C. Thalman; Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwendung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen, ETH Diss. Nr. 11721, 1996

- Überprüfung des AAR-Widerstands der Betonrezepturen primär durch stoffliche Nachweise und sekundär durch Performanceprüfungen.
- Konstruktive Massnahmen zum Schutz des Betons vor Wasserkontakt

Während des Baus werden laufend Frisch- und Festbetonprüfungen ausgeführt, die in losbezogenen in Kontrollplänen festgelegt sind. Dabei sind nicht nur

Under the leadership of AlpTransit Gotthard AG, and supported by a number of experimental investigations on rock materials from the region of the Gotthard Base Tunnel together with inspections in various underground structures, for the planning of remedial measures to counteract AAR in the tunnel were developed. This AAR concept, which had to take into consideration the existing material management concepts as well as the existing concrete testing system, covers the following points:

- Regular checking of the potential reactivity of the raw material and the aggregate processed from it using Microbar Testing. Exclusion of strongly reactive raw material before processing.
- Testing the AAR resistance of the concrete mix design primarily by means of material analysis and secondarily by means of Performance Testing
- Constructional measures to protect the concrete from contact with water

During execution, regular testing both on the green concrete and on the hardened concrete is carried out. These tests comply with the Swisscode SIA 262/1 and are specified for each construction lot in the control plans. In this way, not only the criteria to be fulfilled but also the frequencies of testing are defined. The following tests are carried out:

- Green concrete tests: concrete yield, consistency, water content and water cement ratio
- Hardened concrete tests: early strength, cube strength, water conductivity, chemical resistance (proof of resistance to sulphate attack for exposure class XA2)

Fig. 3 summarizes graphically the results of hardened concrete tests in the subsection Sedrun over a period of 6 months.

Experience gained

Today, for the Gotthard Base Tunnel, concrete mix designs are still used that are based on the tested and approved concrete mix



Fig. 4
Zwischenlager mit ausgebrochenem Material.
Interim storage of excavated material.

die Erfüllungskriterien, sondern auch die Prüfhäufigkeiten definiert. Folgende Prüfungen werden durchgeführt:

- Frischbetonkontrollen: Ergiebigkeit, Konsistenz, Wassergehalt und Wasserzementwert
- Festbetonprüfungen: Frühfestigkeit, Würfeldruckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit, chemischer Widerstand (Nachweis gegen Sulfatangriff, Expositionsklasse XA2)

Fig. 3 zeigt beispielhaft die Zusammenstellung der Ergebnisse von Festbetonprüfungen im Teilabschnitt Sedrun über einen Zeitraum von sechs Monaten.

Erfahrungen

Am Gotthard-Basistunnel werden heute noch Betonrezepturen verwendet, die auf den geprüften und zugelassenen Betonrezepturen basieren. Anpassungen an den Rezepturen waren jedoch erforderlich, unter anderem weil Gesetzesvorschriften geändert haben oder Produkte in ihrer

designs. Adjustments to the mix designs were necessary, however, among other things because code provisions have changed or products in their original form are no longer produced today.

At the end of 2009 more than 40 km of single-track tunnel, after technical verifications or approval, are now ready for installation in the railway's technical infrastructure. The concrete quality corresponds in every way to the specifications. Up till now, there was not one single case in which any requirement placed on the concrete in the completed structure was not fulfilled. Thus the chosen concept may be considered to have been successful.

The application of the concept to other projects would appear to be worthwhile in cases where, as for the Gotthard Base Tunnel, there is only limited reliable information available, or even none at all, with regard to the technical questions arising.

ursprünglichen Form heute nicht mehr hergestellt werden.

Per Ende 2009 sind mehr als 40 km Einspurtunnel nach technischen Prüfungen oder Abnahmen bereit für den Einbau der bahntechnischen Installationen. Die Betonqualität entspricht durchwegs den Anforderungen. Bisher gab es keinen einzigen Fall, bei dem am fertiggestellten Bauwerk eine Anforderung an den Beton nicht erfüllt war. Das gewählte Konzept hat sich bewährt.

Eine Übertragung des Konzepts auf andere Projekte erscheint dort sinnvoll, wo wie beim Gotthard-Basistunnel nur wenige oder keine gesicherten Kenntnisse zu technischen Fragestellungen vorliegen.

Autor/Author

Rupert H. Lieb
Dr. sc. techn., dipl. Ing. TU Graz
Leiter Baumanagement
AlpTransit Gotthard AG
CH-6003 Luzern
rupert.lieb@alptransit.ch

Kann man mit Beton nachhaltig bauen?

Can we construct sustainably with concrete?

Susanne Kytzia, Aldo Rota, Felix Wenk, Ulrich Stüssi, Simon Lier

Einleitung

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 [1]. Ein nachhaltiger Umgang mit diesem Baustoff ist deshalb unerlässlich. Und zwar auf ökologischer, gesellschaftlicher und ökonomischer Ebene. Dies wird heute jedoch erschwert durch Vorurteile gegenüber diesem Baustoff sowie wegen der vorherrschenden Rollenverteilung zwischen Architekten/Planenden und der Bauindustrie. Im Bemühen um ein nachhaltiges Bauen verstrickt man sich in der aktuellen Diskussion in widersprüchlichen Zielen – überzeugende Konzepte für ein nachhaltiges Bauen mit Beton fehlen. In diesem Beitrag wird vorgeschlagen, die Anforderungen einer nachhaltigen Nutzung des Bauwerks als Richtschnur für die Entwicklung eines nachhaltigen Baustoffs Beton zu verwenden – unter Ausnutzung aller technischen Möglichkeiten und Berücksichtigung der Bedürfnisse der Nutzer.

Vorurteile verhindern nachhaltiges Bauen

Fragt man Studierende der Bauwissenschaften nach nachhaltigen Baustoffen, so nennen sie Holz, Lehm und Natursteine. Auf Nachfrage erfährt man, dass «Nachhaltigkeit» vielerlei Bedeutung haben kann. Sie umfasst die Vorstellung der Unerschöpflichkeit, z. B. von nachwachsenden Rohstoffen, ebenso wie ein Empfinden von Nähe zur Natur verbunden mit möglichst wenig (technischer) Be- oder Verarbeitung. Technische Prozesse werden mit Umweltbelastungen im Lebensweg der Bau-

Introduction

Concrete is one of the most important construction materials today. Applications in construction seem to be unlimited, ranging from residential and office buildings to industrial construction and infrastructures. Over five billion cubic metres of concrete are produced around the world every year [1]. A sustainable management of concrete, therefore, is essential with regard to all three dimensions of sustainability: environment, society and economics. Yet, this important development is hindered by prejudice against concrete as well as the prevailing division of labour (and role allocation) between the construction industries and architects/planners. Current efforts in sustainable construction with concrete struggle with contradictory goals and there is a lack of convincing concepts and visions. In this article, we suggest taking the requirements of a sustainable use of buildings as a guideline for developing “sustainable concrete” – taking advantage of current innovations in building technologies and considering the users’ needs.

Prejudice impedes sustainable construction

If you ask students in civil and structural engineering to name sustainable construction materials, they will most likely give timber, clay and natural stone as answers. On enquiry you will learn about various meanings of the term sustainability including inexhaustibility often associated with renewable resources as well as solidarity with nature linked to a rejection of technically processed materials. Technical processes are associated with emissions and the exploitation of resources in the material’s life cycle. Concrete can hardly bear comparison with this

stoffe verbunden. Beton schneidet in dieser Betrachtung schlecht ab. Er besteht aus nicht nachwachsenden Rohstoffen und ist ein von Menschen gemachter – «unnatürlicher» – Stein. Gleichzeitig ist er Sinnbild der wachsenden Siedlung und Zersiedlung, die die Natur verdrängt – Stichwort: Zubetonierung der Landschaft.

Derartige Vorstellungen verhindern einen sachbezogenen und lösungsorientierten Zugang zur nachhaltigen Entwicklung. Sie gründen auf zwei Vorurteilen. Zum einen sind nachwachsende Rohstoffe nicht unerschöpflich. Sie sind begrenzt durch das Vorhandensein von fruchtbarer Fläche, Wasser und der für das Wachstum notwendigen Zeit. Angesichts der rasch wachsenden Weltbevölkerung sind diese drei Ressourcen äusserst knapp [2]. Zum Zweiten wächst die Siedlung nicht aufgrund der Verfügbarkeit von Beton, sondern infolge einer wachsenden Bevölkerungszahl, des zunehmenden Wohlstands und der niedrigen Energiepreise. Beton hat sich als gut verfügbarer Baustoff erwiesen, der das rasche Wachstum der Siedlung ermöglicht und er wird eine wichtige Rolle bei ihrer Erneuerung spielen. Anstatt aber Beton als notwendiges Übel zu begreifen, sollten die Bauwissenschaften fragen, wie man die Vorteile dieses Baustoffs als Chancen für eine nachhaltige Entwicklung nutzen kann. Im Zentrum steht dabei die Qualität der heutigen und zukünftigen Nutzung des Bauwerks bezogen auf eine nachhaltige Siedlungsentwicklung, auf das Wohlergehen der Nutzer und einen möglichst effizienten Einsatz von wirtschaftlichen und natürlichen Ressourcen während des gesamten Lebenswegs. Dieser Frage nach den möglichen Vorzügen

notion of sustainable construction materials, as it is made of non-renewable resources and is a technically processed – “non-natural” – stone. In addition, concrete has become a symbol for growing residential areas and the destruction of natural landscapes. In the German language the term «Zubetonieren» (to cover over with concrete) is a slang expression for this unpopular development.

Such ideas hinder a problem-oriented and productive approach to sustainable construction. They are based on two prejudices. On the one hand, renewable resources are not inexhaustible. Their production is limited by availability of fertile land, water and the time necessary for biomass production. In view of the world's growing population these three resources are precious and scarce [2]. On the other hand, residential areas do not grow because concrete is available but due to a growing population, increasing wealth and low prices for fossil fuels. The availability of concrete has enabled the development of the residential areas and will be

gen von Beton im nachhaltigen Bauen wird in einem Forschungsprojekt der cemsuisse nachgegangen [3]. Als Ergebnis liefert es eine erste Auslegeordnung von Fragen an die Bauwissenschaften, die zu einem nachhaltigen Bauen mit Beton beitragen sollen.

Sind die Rollen richtig verteilt?

Die Autoren der Studie hinterfragen bestehende Denkmuster, vor allem die Arbeitsteilung zwischen Baustoffindustrie und Architekten/Planenden. Im heute gängigen Verständnis stellt die Baustoffindustrie einen Baustoff her, der den Anforderungen des Architekten/Planenden genügt. Erweitern sich diese Anforderungen in Richtung Nachhaltigkeit, folgt die Bauindustrie – z.B. durch Lieferung von Recyclingbeton wie im Gebäude-Label Minergie-Eco gefordert [4]. Die Betonindustrie ist also um die Nachhaltigkeit von Beton besorgt – um die Nachhaltigkeit der Bauwerke hingegen kümmern sich die Architekten/Planenden. Dieses Denkmuster spiegelt sich in den meisten Instrumenten zur nachhaltigen Planung wider [5,6,7,8]. Bei der Materialwahl fragt man kaum, mit welchen Baustoffen die gewünschten Gebäudeeigenschaften in Bezug auf die soziale und wirtschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit erreicht werden können, sondern berücksichtigt fast ausschliesslich die Umweltbelastungen. Selten diskutiert werden die vielfältigen Möglichkeiten, den Einsatz von Beton für verschiedenste Anforderungen und Nutzungsbedingungen zu optimieren. In den aktuellen konstruktiven Konzepten wird Beton unbewehrt, bewehrt, vorgespannt, stahl- oder kunststofffaserverstärkt oder im Verbund eingesetzt. Die moderne Betontechnologie bietet vielseitige architektonische Gestaltungsmöglichkeiten: Sichtbeton, pigmentierter Beton, neuerdings auch semitransparenter Beton sowie eine Vielfalt von Schalungsbildern. Diese Möglichkeiten werden aber von der Baustoffindustrie kaum aktiv in die Diskussion

crucial for their renewal in the coming decades. Yet, instead of regarding concrete as a necessary evil, engineers and scientists should find out how sustainable construction could take advantage of the merits that concrete undoubtedly has in construction. This discussion should focus on the quality of current and future use of the built environment with regard to sustainable urban development, wellbeing of users and efficiency in the use of natural and economic resources during the material's entire life cycle. A current research project funded by the Association of the Swiss Cement Industry (cemsuisse) is investigating the benefits of concrete in sustainable construction [3]. The aim is to provide an overview of the research field and formulate research questions to be answered by the construction sciences as a contribution to sustainable construction.

How are roles allocated?

The authors of this study question the prevailing paradigms in construction, especially the current role allocation between the construction industries and architects/planners. In line with the current understanding, the construction industries produce construction materials as required by architects and planners. If requirements change or broaden with increasing awareness of sustainability, the construction industries will follow suit – for example by producing concrete made of recycled aggregates as required by the Swiss standard for environmental construction – Minergie-Eco [4]. The construction industries are concerned to support a sustainable production of concrete. Yet it is the architects/planners who are in charge of the sustainable construction of buildings. Most planning tools in sustainable construction reflect this paradigm (see e.g. [5,6,7,8]). In evaluating construction materials, architects/planners rarely ask how a material could contribute to desired building characteristics with regard to the social and economic dimension

Referenzen/References

- [1] B.L. Jensen, M. Glavind; Consider the Environment – Why and How? In: Dhir R. K., Dyer T. D. and Halliday J.E. (eds.), Sustainable Construction Concrete. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland UK on 9-11 September 2002. S. 14.
- [2] M. Calkins; Materials for Sustainable Sites. Wiley & Sons New Jersey, 2009. S. 272.
- [3] Forschungsprojekt der cemsuisse Nr. 200801; Vorzüge nachhaltigen Bauens mit Beton, vom 1.3.2009 bis zum 31.11.2009.
- [4] Dokumentation zum Minergie-Standard; www.minergie.ch.
- [5] Empfehlung SIA 112/1; Nachhaltiges Bauen – Hochbau. Ergänzungen zum Leistungsmodell SIA 112. 2. Auflage, Muttonen 2005.
- [6] US Green Buildings Council; LEED – Green Buildings Rating System for New Construction and Major Renovations. Version 2.1. 2002.
- [7] BREEM; The Environmental Assessment Method for Buildings around the World. 2009.
- [8] DGNB; Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen. Aufbau – Anwendung – Kriterien. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. 2. Auflage 2009.

Entwurfsregel des nachhaltigen Designs	Wie wird der Einsatz von Beton heute tendenziell bewertet?	Welche Verbesserungsmöglichkeiten bestehen?
Möglichst geringer Materialeinsatz pro Einheit des geschaffenen Nutzens	Beton bestimmt je nach Bauweise zwischen 30% und 80% der Masse von Bauwerken im Hochbau. Beton schneidet aufgrund seines relativ hohen spezifischen Gewichts tendenziell schlechter ab als die meisten anderen Baustoffe.	Als Konsequenz werden neue Betonsorten vorgeschlagen, deren Einsatz zu einer Gewichtsreduktion der Bauwerke beiträgt (z. B. Leichtbeton oder Hochleistungsbeton). Folgende Nachteile können sich ergeben: Das Erhöhen der Zementmenge, der vermehrte Einsatz von Bewehrung, eine Senkung der Lebensdauer oder der Fehlertoleranz im Bauprozess.
Möglichst geringer Energieeinsatz pro Einheit des geschaffenen Nutzens	Die zur Herstellung des Betons aufgewendete Energie hat nur einen geringen Anteil am Gesamtenergieverbrauch im Lebensweg eines Bauwerks im Hochbau. 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.	Beton bietet die Möglichkeit zur Reduktion der Betriebsenergie durch Nutzung von Betonbauteilen als Wärmespeicher und ihrer thermischen Aktivierung. Folgende Nachteile können sich ergeben: Die Erhöhung der Masse und allfällige Probleme bei Instandhaltung, Instandsetzung und Rückbau.
Möglichst geringe Lebenszykluskosten pro Einheit des geschaffenen Nutzens	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. Die Kapitalkosten sind hier dominant, gefolgt von den Kosten der Instandhaltung/-setzung von Bauteilen im Innenausbau und den Betriebskosten.	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.

Fig. 1
Gängige Entwurfsregeln des nachhaltigen Designs und Einfluss des Einsatzes von Beton sowie Verbesserungsmöglichkeiten.

um ein nachhaltiges Bauen eingebracht. Traditionell bestimmen Architekten/Planende die «Nachhaltigkeit» des Bauwerks – die Baustoffindustrie liefert die dazu geeigneten Baustoffe.

Denkmuster 1: Die Industrie stellt «nachhaltigen Beton» bereit

Bleiben wir zunächst in diesem gängigen Denkmuster. Wir gehen hier davon aus, dass ein Baustoff tendenziell nachhaltig ist, wenn in seinem Lebensweg möglichst wenig Ressourcen verbraucht werden (natürliche, soziale und ökonomische) und er die für das Bauen erforderliche Qualität gewährleistet.

Wie kann man die Herstellung von Beton nach diesen Kriterien optimieren? Man kann die CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung reduzieren. Verantwortlich ist neben der Verbrennung fossiler Energieträger im Zementofen vor allem der Ausstoss von Kohlendioxid beim Brennen von gemahlenem Kalkstein zu Klinker. Diese CO₂-Emissionen sind «naturgegeben» und können nur durch die Reduktion des Klinkeranteils im Zement gesenkt werden (z. B. durch Kompositzemente). Ausserdem können Sekundärbrennstoffe

of sustainability, but focus on the risk for the natural environment linked to production, use and waste treatment of construction materials such as concrete. Little attention is given to adapting and optimizing concrete applications to the needs of the building's environment and use. Current concrete applications are manifold, ranging from reinforced (with different materials), non-reinforced, prestressed to composite structures. Modern building technologies provide various options for design such as fair-faced concrete, pigmented concrete and semitransparent concrete as well as visual design options given by a variety of formwork finishes. These options are rarely promoted in sustainable construction. Traditionally, architects/planners are in charge of the sustainable construction of buildings and the construction industries deliver construction materials suitable for this purpose.

Paradigm 1: Construction industry delivers "sustainable concrete"

Let us stay with the prevailing paradigm and assume that a construction material tends to be sustainable if its resource efficien-

fe die fossilen Brennstoffe ersetzen. Der zweite wichtige Ansatzpunkt ist das Betonrecycling. In den meisten Kantonen werden heute bis zu 90% der anfallenden Mengen an Betongranulat in loser Form wieder verwertet. Dies ist relativ einfach, denn es wird heute wesentlich mehr gebaut als abgebrochen. Ändert sich dies, dann entsteht ein Überschuss an Betongranulat. Daher wird sein vermehrter Einsatz zur Betonproduktion propagiert.

Ein «nachhaltiger Beton» besteht also aus möglichst wenig Klinker und möglichst viel rezyklierter Gesteinskörnung (Betongranulat) – ohne dass dadurch Qualität oder Anwendungsmöglichkeiten eingeschränkt werden.

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

Verlassen wir 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 erbringen – einschliesslich der nach-

Design rules in sustainable construction	Assessment of concrete applications in buildings	Options for improvements
Minimize material demand per service unit	Concrete dominates the material demand of buildings with a major share in the total mass ranging from 30% to 80%, depending on the type of construction. In principle, concrete's comparatively high density is a great disadvantage when this design rule is applied.	New concrete products are being developed to reduce the weight of components made of concrete such as lightweight or high-performance concrete. Possible disadvantages are increase in the content of cement and reinforcement materials, and a reduction of durability and fault tolerance in construction processes.
Minimize energy demand per service unit with emphasis on fossil fuels	Energy requirements for concrete production only have a minor share in the overall energy demand in a building's life cycle. In existing buildings the technical standards for operational energy are crucial. With increasing energy efficiency in practice, the relative importance of energy demands in construction will eventually grow.	Concrete structures can help to reduce operational energy demands if they are thermally activated or used as heat reservoirs. Possible disadvantages are increase in mass and problems in maintenance, structural modifications and demolition.
Minimize life-cycle costs per service unit	Life-cycle costs of concrete structures and components usually only have a minor share in the sum of a building's overall life cycle costs. Capital costs are a dominant category followed by costs of maintenance and renewal of interior fittings, building equipment and appliances as well as other operational costs.	Concrete helps to reduce life-cycle costs if its application contributes to increasing a building's service life, which is relevant for capital costs. However, durability of construction materials is only one aspect in a building's service life. Flexibility and expandability are even more important and are only indirectly affected by the choice of building materials.

Fig. 1
Design rules in sustainable construction and influence of concrete application as well as its potential for optimization.

cy is high during its entire life cycle (with regard to natural, social and economic resources) and it meets all relevant requirements in construction.

How can we improve sustainability of concrete from this perspective? We can first reduce CO₂-emissions in cement production, which is caused by burning fossil fuels in the cement kiln as well as producing clinker from limestone. In this process of calcination CO₂ is emitted from limestone. This emission is directly linked to clinker production and can only be reduced with decreasing clinker production (e.g. by developing and improving composite cements). In addition, fossil fuels can be substituted by secondary fuels such as used tyres and waste plastics. Recycling is the second important approach for increasing resource efficiency. In Switzerland, almost 90% of all concrete construction waste is recycled – mostly as recycled aggregate in infrastructure construction. This is comparatively easy because currently far more buildings are newly constructed than demolished. This is going to change, eventually resulting in a surplus of concrete waste. In view of this development authorities in waste

folgenden Generationen. Welchen Beitrag kann der Baustoff Beton hier leisten? Fig. 1 beschreibt drei gängige Entwurfsregeln des nachhaltigen Designs und zeigt, welchen Einfluss der Einsatz von Beton hat bzw. wie man ihn 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 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.

Bauwissenschaften müssen Widersprüche auflösen

Die Bauwissenschaften stehen vor der Herausforderung, diese Wider-

management and experts in sustainable construction promote the use of recycled aggregate for concrete production.

From this perspective, producing "sustainable concrete" means minimizing the clinker content and maximizing the content of recycling aggregate without impeding the quality of concrete and its applications.

Paradigm 2: Concrete helps to design "sustainable buildings"

Let us leave the traditional paradigm and turn to a new goal: the production of sustainable buildings. These are buildings that minimize the consumption of natural, social and economic resources, while providing as many benefits for society as possible, including benefits for future generations.

How can concrete contribute to this new goal? Fig. 1 shows three popular design rules in sustainable construction and discusses the influence of concrete application and its potential for optimization. It becomes obvious, that until now we lack a convincing concept for sustainable concrete construction and we struggle with contradictory goals. Architects/planners



Fig. 2
 Beton ist ein wesentlicher Teil unserer gebauten Umwelt.
 Concrete forms an important part of our built environment.

are supposed to reduce the weight of concrete buildings while using concrete compounds as heat reservoirs. They should try to thermally activate concrete compounds to reduce the operational energy consumption required for heating and cooling. Yet, the buildings are supposed to be flexible and expandable for future use. And, all these requirements should be met with concrete containing as little clinker and as much recycled aggregate as possible.

Construction sciences should resolve the prevailing contradictions

Construction sciences have to meet the challenge of resolving the contradictions in sustainable construction using concrete, if they intend to promote sustainable construction in general.

With this aim, it is most important to focus on the requirements of a sustainable use of buildings and to take advantage of current innovations in building – and concrete – technologies. Current research and development should focus on the following questions:

- How can suitable tools and concepts in the life-cycle manage-

sprüche aufzulösen, wenn sie das nachhaltige Bauen voran bringen wollen. Als entscheidend erscheint den Autoren dieser Studie die konsequente Orientierung an den Anforderungen einer nachhaltigen Nutzung des Bauwerks unter Ausnützung aller technischen Möglichkeiten. Im Zentrum stehen die folgenden Fragen:

- Wie kann man durch geeignete Instrumente und Konzepte des Life-Cycle-Managements die Verwendung von Beton im nachhaltigen Design von Bauwerken unterstützen und die Auswirkungen möglicher Nachteile minimieren?
- In welchen Bauteilen/Bauwerken zeichnet sich Beton vergleichsweise positiv aus in Bezug auf ökologische, soziale und ökonomische Kriterien? Bei welchen Bauteilen/Bauwerken sind andere Baustoffe vorzuziehen?
- Welche Erkenntnisse liefern ein besseres Verständnis und Wissen über die Verwendung von Beton im heutigen Gebäudebestand für eine nachhaltige Bestandsentwicklung?

Ein wichtiger Ansatz ist die lange technische Lebensdauer von Bau-



ment of buildings and infrastructures promote the advantages of concrete in sustainable construction and minimize its shortcomings?

- In what types of components, buildings and structures is the application of concrete favourable with regard to all three dimensions of sustainability (environment, society and economics)? In what types of components, buildings and structures does it fail to stand up to comparison with alternative construction materials?
- What can be learnt from a better understanding and knowledge of concrete applications in the built environment, which was constructed after and has been in use since the Second World War, for sustainable renewal as well as new construction?

Durability is one important asset of concrete in sustainable construction. Yet it will only be valued if we succeed in combining it with a long service life of the buildings and infrastructures – affected as they are by architectural concepts as well as real estate and infrastructure management.

teilen aus Beton. Es muss jedoch (wieder) gelingen, diesen Vorzug von Beton zur Geltung zu bringen – durch bessere Konzepte in der Gestaltung wie auch im Management.

Autoren/Authors

Susanne Kytzia
 Prof. Dr., lic. oec. HSG
 skytzia@hsr.ch

Aldo Rota
 Prof. Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH
 arota@hsr.ch

Felix Wenk
 Prof., dipl. Ing. ETH
 fwenk@hsr.ch

Ulrich Stüssi
 BSc FHO in Bauingenieurwesen
 ustuessi@hsr.ch

Simon Lier
 lic. oec. publ.
 slier@hsr.ch
 Institut für Bau und Umwelt an der
 Hochschule für Technik Rapperswil
 CH-8640 Rapperswil