



Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau

Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau

Das Thurgauer Baustoffrecycling-Konzept geht in die Umsetzung. Die Studie zum Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau erscheint anlässlich der Eröffnung des Erweiterungsbaus der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) im Frühjahr 2021.

Herausgeber

Kantonales Hochbauamt Thurgau
Verwaltungsgebäude Promenade
8510 Frauenfeld

Amt für Umwelt Thurgau
Verwaltungsgebäude Promenade
8510 Frauenfeld

Verfasser

Dr. Deuring + Oehninger AG
Dipl. Bauingenieure ETH SIA USIC
Christoph Nay
Römerstrasse 21
8401 Winterthur

Koreferent: Roland Ledergerber
Kantonales Hochbauamt Thurgau

Fotografien PHTG: Michael Egloff, Zürich
Gestaltung: Roman Strupler, Frauenfeld
Lektorat: Miriam Waldvogel, Frauenfeld
Herstellung: Ströbele AG, Romanshorn

Copyright © 2021

Kantonales Hochbauamt Thurgau

Management Summary	A
1 Ausgangslage	2
2 Stand der Forschung	6
2.1 Einleitung	7
2.2 Normative Anforderungen	8
2.3 Betontechnologie	8
2.3.1 Zement	8
2.3.2 Gesteinskörnung	9
2.4 Zusatzmittel	13
2.5 Wasserzementwert	13
2.6 Frischbetonverhalten	13
2.7 Festbetoneigenschaften	14
2.8 Ökologische Aspekte	18
2.8.1 Allgemeine Hinweise	18
2.8.2 Klinkerreduzierte Zemente	19
2.8.3 Nachhaltigkeitsstandard	20
3 Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG)	22
3.1 Das Thurgauer Baustoffrecycling-Konzept geht in die Umsetzung	23
3.2 Betontragwerk	24
3.3 Betonsorten	32
3.4 Kosten	34
4 Schlussfolgerungen	38
4.1 Einsatzgebiete	39
4.2 Hinweise für den Bauherrn	40
4.3 Hinweise für die Projektierung	41
4.4 Hinweise für die Submission	41
4.5 Hinweise für die Ausführung	42
4.6 Hinweise zu den Kosten	43
4.7 Hinweise zur Ökologie	43
4.8 Fazit der Studienverfassenden	43
Anhang	46
Grundlagen	47
Abbildungs- und Quellenverzeichnis	48
Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) – Interviews mit den am Bau Beteiligten	49
Faktenblatt Ökologie NovoCon	63

Management Summary

Damit Ressourcen geschont, Stoffkreisläufe geschlossen und zu deponierende Bauabfälle minimiert werden können, stellt der Kanton Thurgau mit dem Konzept für den Einsatz von Recyclingmaterial im Hoch- und Tiefbau die Zielsetzung, Betongranulate (C) möglichst im Konstruktionsbeton wiederzuverwenden und Mischabbruchgranulate (M) zu hohen Anteilen im Magerbeton einzusetzen. Wie die Praxis zeigt, steht der Erfüllung dieser Zielsetzung aus technischer Sicht nichts im Weg. Recyclingbetone konnten in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt werden. Je nach Anteil der rezyklierten Komponenten erreichen Recyclingbetone nahezu die gleichen Festbetoneigenschaften wie Betone aus natürlicher Gesteinskörnung (Primärbetone). Entsprechend ist die Prüfung der Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbetonen bei jedem Hochbauvorhaben angebracht.

Die massgeblichen normativen Anforderungen an Recyclingbetone sind im Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» festgehalten. Dieses wird derzeit überarbeitet, um wichtige markttechnische Entwicklungen, Erkenntnisse und Veränderungen der vergangenen Jahre aufzunehmen.

Bei Recyclingbeton aus Betongranulat RC-C besteht die Gesteinskörnung > 4 mm im Wesentlichen aus:

- mindestens 25 M.-% rezyklierte Körner R_c , bestehend aus Beton, Betonprodukten, hydraulisch gebundener Gesteinskörnung, Mörtel sowie Mauersteinen aus Beton gemäss SN EN 12620 und
- höchstens 5 M.-% rezyklierte Körner R_b , bestehend aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen und nicht schwimmenden Porenbetonsteinen gemäss SN EN 12620.

Bei Recyclingbeton aus Mischgranulat RC-M enthält die Gesteinskörnung > 4 mm:

- mindestens 5 M.-% R_b und
- mindestens 25 M.-% ($R_b + R_c$)

Recyclingbetone weisen eine geringere Druckfestigkeit, einen niedrigeren E-Modul sowie ein grösseres Kriech- und Schwindmass auf als Primärbetone, wobei sich aber die Betoneigenschaften über den Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung steuern lassen. Je höher der Anteil rezyklierter Gesteinskörnung ist, desto grösser sind die Abweichungen der Betoneigenschaften von jenen eines Primärbetons. So können zum Beispiel innerhalb eines Bauwerks die Geschossdecken, bei denen eine hohe Festigkeit und ein grosser E-Modul benötigt werden, aus einem RC-C mit geringerem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung gefertigt werden, während für die Wände ein höherer Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung oder sogar ein Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat eingesetzt werden kann.

Für Bauteile der Expositionsclassen «Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride» (XD[CH]), «Frostangriff mit oder ohne Taumittel» (XF[CH]) und «Chemische Angriffe» (XA[CH]) ist der Einsatz von Recyclingbetonen nicht zu empfehlen oder nur nach erfolgreichen Voruntersuchungen zulässig. Für die Expositionsclassen XD[CH], XF[CH] und XA[CH] sowie generell für Spannbeton und ermüdungsgefährdete Bauteile darf RC-M nicht verwendet werden. Für alle weiteren Bauteile ist der Einsatz von RC-C respektive RC-M grundsätzlich möglich.

Beim Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) wurde die Planung und der Einsatz von Recyclingbetonen vorbildlich umgesetzt, indem das gesamte Planungsteam in enger Zusammenarbeit ab den ersten Projektstufen die objektspezifischen Randbedingungen genau berücksichtigte und Recyclingbetone für all jene Bauteile eingesetzt wurden, die dies technisch erlaubten. Einzig die weitgespannten Decken musste man in Primärbeton fertigen, damit diese so schlank wie möglich konstruiert werden konnten und so eine grösstmögliche lichte Raumhöhe unter Einhaltung der vorgeschriebenen Gesamtgebäudehöhe zulassen. So wurden bei besagtem Objekt ca. 80 % der gesamten Betonkubatur mit Recyclingbetonen gefertigt.

Für einen erfolgreichen Einsatz von Recyclingbetonen gilt es, bereits in den ersten Projektphasen zu prüfen, welche Möglichkeiten der Markt im Umkreis des geplanten Objekts bietet. Dabei sind u.a. folgende Fragen zu beantworten: Welche Betonwerke kommen für eine Lieferung von Recyclingbetonen infrage? Welche Betoneigenschaften werden mit den Recyclingbetonen dieser Werke erzielt? In der Projektierungsphase sind die effektiven Festbetoneigenschaften des eingesetzten Recyclingbetons zu beachten und die Bauteildimensionen auf Basis dieser Eigenschaften zu definieren. Anhand der aus den Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen resultierenden Bauteilabmessungen ergibt sich die objektspezifische Festlegung, für welche Bauteile der Einsatz von Recyclingbeton sinnvoll ist. Für Sichtbetonbauteile lohnt es sich zudem, in einer sehr frühen Projektphase die relevanten Details abzuklären und gegebenenfalls auch bereits Musterflächen anzufertigen. Die Eigenschaften des Recyclingbetons, insbesondere der E-Modul sowie der RC-Anteil, sind im Rahmen der Submission klar zu definieren und in der Ausführungsphase zu kontrollieren.



1

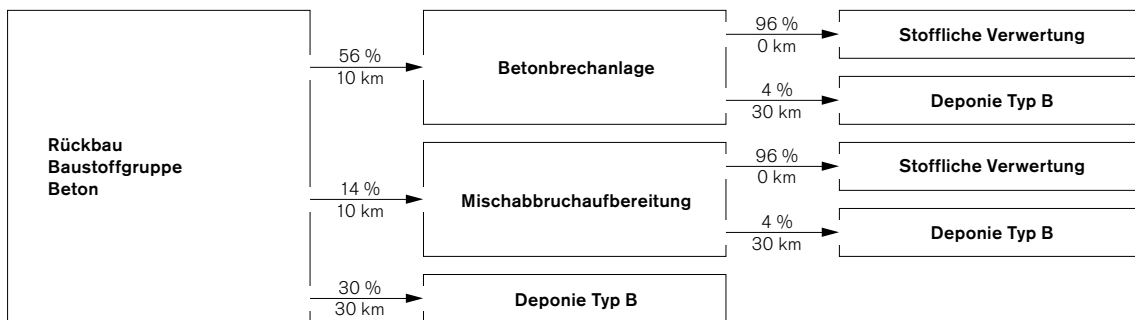
Ausgangslage

Mit dem erhöhten Einsatz von Recyclingbetonen sollen die knappen Kiesressourcen geschont, die Landschaften geschützt, die Stoffkreisläufe geschlossen und die zu deponierenden Bauabfälle minimiert werden.

Gemäss dem Konzept für den Einsatz von Recyclingmaterial im Hoch- und Tiefbau des Departements für Bau und Umwelt Thurgau (Grundlage 1) sollen Betongranulate (C) im Konstruktionsbeton wiederverwendet und Mischabbruchgranulate (M) zu möglichst hohen Anteilen im Magerbeton eingesetzt werden. Ziel ist es, den Anteil an C im Konstruktionsbeton von 15 % im Jahr 2016 auf 50 % im Jahr 2030 anzuheben. Beim Einsatz von M im Magerbeton wird ein Anstieg von 61 % (2016) auf 70 % (2030) sowie beim Einsatz im Konstruktionsbeton von 19 % (2016) auf 30 % (2030) angestrebt.

Mit dem erhöhten Einsatz von Recyclingbetonen sollen die knappen Kiesressourcen geschont, die Landschaften geschützt, die Stoffkreisläufe geschlossen und zu deponierende Bauabfälle minimiert werden.

-1- Der Weg des Betons vom Rückbau bis zur stofflichen Verwertung oder Deponierung



Der Weg des Betons vom Rückbau bis zur stofflichen Verwertung¹ oder Deponierung². Die Prozentangaben beziehen sich jeweils auf den Prozess links des Pfeils. Die durchschnittlichen Transportwege zwischen den Prozessen in der Schweiz sind jeweils in km angegeben.

Der Kanton Thurgau will damit eine Vorreiterrolle einnehmen und auch private Bauherren dazu animieren, gleichermaßen zu agieren und der Ökologie Rechnung zu tragen.

Aktuell werden die Ressourcen aus Bauwerken wenig genutzt. Dies hat verschiedene Gründe. Recyclingstoffen haftet noch immer ein schlechtes Image an, und das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von Recyclingmaterial ist bei vielen Akteuren des Bauwesens nur beschränkt vorhanden. Gleichermassen fehlt den Bauherren oft der Mut zur Wahl innovativer Baustoffe.

In den vergangenen Jahren wurden Recyclingbetone eingehend erforscht, und das Produkt Recyclingbeton erfuhr stetige Weiterentwicklung, sodass heutzutage mit Recyclingbetonen bezüglich Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und Elastizität annähernd gleiche Resultate wie mit Primärbetonen erreicht werden können.

¹ Eine stoffliche Verwertung liegt vor, wenn die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle angestrebt wird. Es werden also Sekundärrohstoffe hergestellt. Im Sprachgebrauch bezeichnet man die stoffliche Verwertung auch als Recycling. Im konkreten Fall wird Betonabbruch in der Betonbrechanlage zu Betongranulat aufbereitet, das als Zuschlagstoff für die Erstellung von Recyclingbeton aus Betongranulat RC-C verwendet wird. Mischabbruch wird in der Mischabbruchaufbereitung zu Mischabbruchgranulat aufbereitet, das als Zuschlagstoff für die Erstellung von Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat RC-M verwendet wird.

² D. Savi, M. Klingler: Recycling am Bau: Quoten sagen nicht alles, tec21 10/2020

Das Konzept für den Einsatz von Recyclingmaterial im Hoch- und Tiefbau (Grundlage 1) definiert verschiedene Massnahmen, um die Wiederverwendung von Betongranulat zu fördern, u.a. die Umsetzung von Vorzeigeprojekten, die Begleitung der Vorzeigeprojekte sowie Schulung, Weiterbildung und Erfahrungsaustausch. Mit dem Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) wurde ein erstes Vorzeigeprojekt realisiert. Bei diesem zweigeschossigen Bau wurden fast 80 % des gesamten Betonverbrauchs durch Recyclingbetone gedeckt und damit Ressourcen geschont.

In Anlehnung an die Zielsetzung «Schulung, Weiterbildung und Erfahrungsaustausch» gemäss Grundlage 1 beauftragte das Kantonale Hochbauamt Thurgau die Dr. Deuring + Oehninger AG mit der Erarbeitung der Studie «Empfehlung zum Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau». Die Studie soll aufzeigen, bei welchen Bauteilen von Hochbauten der Einsatz von Recyclingbetonen geeignet ist, mit welchen Besonderheiten dabei zu rechnen ist und welche Aspekte bei der Projektierung sowie bei der Ausschreibung zu beachten sind.

Die Studie beschränkt sich vorerst auf Hochbauten. Eine spätere Ausdehnung auf den Tiefbau ist empfehlenswert. Mit der Studie sollen primär die nachstehenden Bereiche abgedeckt werden:

- Stand der Forschung³
- Analyse
- Schlussfolgerungen

³ Die Zusammenfassung der aktuellsten Forschungsergebnisse in Kapitel 2 basiert auf den Publikationen zum Thema Recyclingbeton, verfasst durch Cathleen Hoffmann, Holcim (Schweiz) AG.



2 **Stand der Forschung**

In den vergangenen Jahren wurden Recyclingbetone intensiv erforscht und die Produkte stetig weiterentwickelt, um bezüglich Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und Elastizität annähernd gleiche Resultate wie mit Primärbetonen zu erreichen.

2.1 Einleitung

Ohne Beton wäre das «Bauwerk Schweiz»⁴ kaum vorstellbar. Von den knapp 1.5 Milliarden Tonnen an Baumaterialien, die hierzulande im Hochbaubestand verbaut sind, macht Beton mit über 800 Millionen Tonnen mehr als die Hälfte aus. Im Tiefbau sind weitere 306 Millionen Tonnen Beton verbaut (Grundlage 9, Grundlage 10). Die Betonproduktion beansprucht in der Schweiz jährlich rund 50 Millionen Tonnen an Kies und Sand. Um die Kiesressourcen zu schonen, setzen Politikerinnen und Politiker, öffentliche und private Bauherren, aber auch Planungsteams vermehrt auf Recyclingbetone. Mineralische Materialien aus dem Rückbau von Gebäuden werden dabei zu Betongranulat (C) oder Mischgranulat (M) aufbereitet. Sie ersetzen einen Teil der natürlichen Gesteinskörnung für die Herstellung der Recyclingbetone. Der Verbrauch von natürlichen Gesteinskörnungen kann damit vermindert und die Ablagerung von mineralischem Rückbaumaterial in Deponien reduziert werden.

Recyclingbetone hatten 2019 einen Marktanteil von ca. 15 % bezogen auf das gesamte Betonvolumen der Schweiz. Der möglichst optimalen Anwendung von Recyclingbetonen dient das technische Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» (Grundlage 11).

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten von rezyklierter Gesteinskörnung unterschieden: Betongranulat (C) und Mischgranulat (M). Das Betongranulat wird durch die Aufbereitung von Betonabbruch gewonnen, der beim Rückbau von bewehrten oder unbewehrten Betonbauten anfällt (Abbildung 2). Das Mischgranulat entsteht durch die Aufbereitung von Mischabbruch, der aus dem Rückbau von Betonbauteilen, Backstein-, Kalksandstein- und Natursteinmauerwerk gewonnen wird (Abbildung 3). Die beiden rezyklierten Gesteinskörnungsarten weichen in ihren Eigenschaften von den natürlichen Gesteinskörnungen (Abbildung 4) ab und weisen grössere Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung auf.

Je nach verwendeter rezyklierter Gesteinskörnungsart wird unterschieden zwischen einem Recyclingbeton hergestellt mit Betongranulat (RC-C) und einem Recyclingbeton hergestellt mit Mischgranulat (RC-M).

-2, 3, 4- **Betongranulat**



Mischgranulat



Natürliche, gerundete Gesteinskörnung



⁴ Unter dem «Bauwerk Schweiz» versteht man den gesamten Gebäudepark und sämtliche Infrastrukturbauten des Landes. (Quelle: D. Hiltbrunner, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern: Das Bauwerk als Rohstofflager, Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 22/1, 2017)

2.2 Normative Anforderungen

Recyclingbetone können als nicht normierte Mager-, Hüll- und Verfüllbetone und als Konstruktionsbetone nach den Normen SN EN 206 und SIA 262 eingesetzt werden. Entsprechend dem Nationalen Anhang der SN EN 206 gelten für Recyclingbetone die Anforderungen gemäss dem Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» (Grundlage 11). Die Erarbeitung dieses technischen Merkblatts wurde 2009 durch den Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA) in Auftrag gegeben und basiert auf einer Überarbeitung der 1994 herausgegebenen Empfehlung SIA 162/4 zum Einsatz von Recyclingbetonen. Das 2010 veröffentlichte Merkblatt führt in knapper Form die Definitionen und die wesentlichen mechanischen Eigenschaften der Recyclingbetone sowie ergänzende Bemessungsgrundlagen auf. Des Weiteren gibt es Hinweise zu den Einsatzmöglichkeiten dieser Betone. Es richtet sich an Planungsteams, Bauherren und Behörden sowie auch an Unternehmen für Rückbau, Aufbereitung und Betonherstellung und an die Bauunternehmen.

Das technische Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» wird derzeit überarbeitet, um wichtige markttechnische Entwicklungen, Erkenntnisse und Veränderungen der vergangenen Jahre aufzunehmen.

In diesem SIA-Merkblatt werden zwei Arten von Recyclingbetonen definiert:

- RC-C Recyclingbeton mit Betongranulat (C) und
- RC-M Recyclingbeton mit Mischgranulat (M),

wobei ein Recyclingbeton ein Beton ist, dessen Gesteinskörnung > 4 mm grundsätzlich zu mindestens 25 M.-%⁵ aus rezykliertem Gesteinskörnung besteht. Die Deklaration der Zusammensetzung ist gemäss Merkblatt ab einer Korngrösse > 4 mm vorzunehmen, im Gegensatz zur Norm SN EN 933-11 (Grundlage 12), die eine Korngrösse > 8 mm vorsieht.

Bei Recyclingbeton aus Betongranulat RC-C besteht die Gesteinskörnung > 4 mm im Wesentlichen aus:

- mindestens 25 M.-% rezyklierten Körnern R_c , bestehend aus Beton, Betonprodukten, hydraulisch gebundener Gesteinskörnung, Mörtel sowie Mauersteinen aus Beton gemäss SN EN 12620 und
- höchstens 5 M.-% rezyklierten Körnern R_b , bestehend aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen und nicht schwimmenden Porenbetonsteinen gemäss SN EN 12620.

Bei Recyclingbeton aus Mischgranulat RC-M enthält die Gesteinskörnung > 4 mm:

- mindestens 5 M.-% R_b und
- mindestens 25 M.-% ($R_b + R_c$)

2.3 Betontechnologie

2.3.1 Zement

Für die Herstellung von Recyclingbetonen eignen sich alle Zemente, die in der Norm SN EN 206 (Grundlage 13) und dem technischen Merkblatt SIA 2049 «Anforderungen an neue Zemente» (Grundlage 14) zugelassen sind. Zur Reduktion der CO_2 -Emissionen sollen Zementarten mit reduziertem Portlandzementklinker-Anteil verwendet werden (z.B. ZN/D-Zement). Im Vergleich zu Beton mit runder, natürlicher Gesteinskörnung ist mit einem um ca. 20 kg/m^3 höheren Zementbedarf zu rechnen.⁶ Bei Magerbetonanwendungen ist kein erhöhter Zementgehalt erforderlich, jedoch ist mit einem grösseren w/z -Wert⁷ zu rechnen oder ein Verflüssiger oder ein Fließmittel einzusetzen.

⁵ M-% steht für Massenprozent. Hierbei wird die Masse einer betrachteten Mischungskomponente auf die Summe der Massen aller Mischungskomponenten bezogen, der Massenanteil gibt also den relativen Anteil der Masse einer betrachteten Mischungskomponente an der Gesamtmasse des Gemischs an.

⁶ Die Aufbereitung der RC-Komponenten ist analog zum Wandkies entscheidend. Werden die RC-Komponenten gewaschen, sodass die Feianteile ausgeschwemmt werden, muss nicht mit einem höheren Zementgehalt als bei Primärbetonen operiert werden.

⁷ Wasserzementwert $w/z = \text{Masse des Wassers } w / \text{Masse des Zements } z$

2.3.2 Gesteinskörnung

– Allgemeines

Die Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnern werden durch die Herkunft der Rückbaumaterialien und den Aufbereitungsprozess massgebend beeinflusst. Sie unterscheiden sich teilweise stark von denjenigen einer natürlichen Gesteinskörnung.

– Kornform

Aufgrund des Aufbereitungsprozesses, durch das Brechen der Rückbaumaterialien, weist das rezyklierte Gesteinskorn eine gebrochene, meist nicht kubische Kornform auf (Abbildung 2, Abbildung 3).

– Rohdichte

Die Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung ist geringer und schwankt stärker aufgrund der Inhomogenität des Materials als diejenige der natürlichen Gesteinskörnung (Abbildung 5).

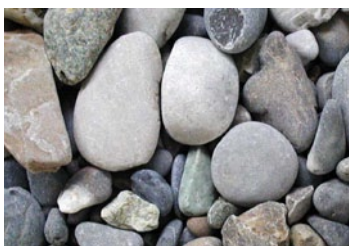
-5- Ofentrockene Rohdichte von rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung

Gesteinskörnung	Ofentrockene Rohdichte [kg/m ³]
Natürliche Gesteinskörnung (Kies, Sand)	2'650 bis 2'700
Betongranulat	2'350 bis 2'550
Mischgranulat	2'100 bis 2'500

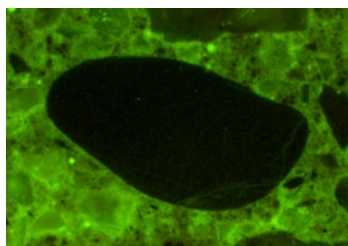
– Wasseraufnahme

Rezyklierte Gesteinskörner weisen infolge ihrer höheren Porosität eine grössere Wasseraufnahme auf (Abbildung 8, Abbildung 9) als natürliche Gesteinskörner (Abbildung 6, Abbildung 7; Grundlage 16 bis Grundlage 18).

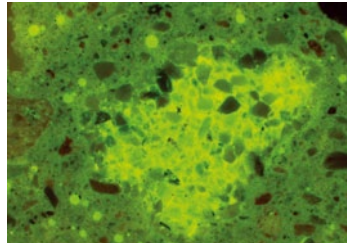
-6, 7- Natürliches Gesteinskorn



Mikroskopische Aufnahme



Mikroskopische Aufnahme im UV-Licht. Dichte Gesteinskörner erscheinen im UV-Licht dunkel, der poröse Zementstein hingegen hell.

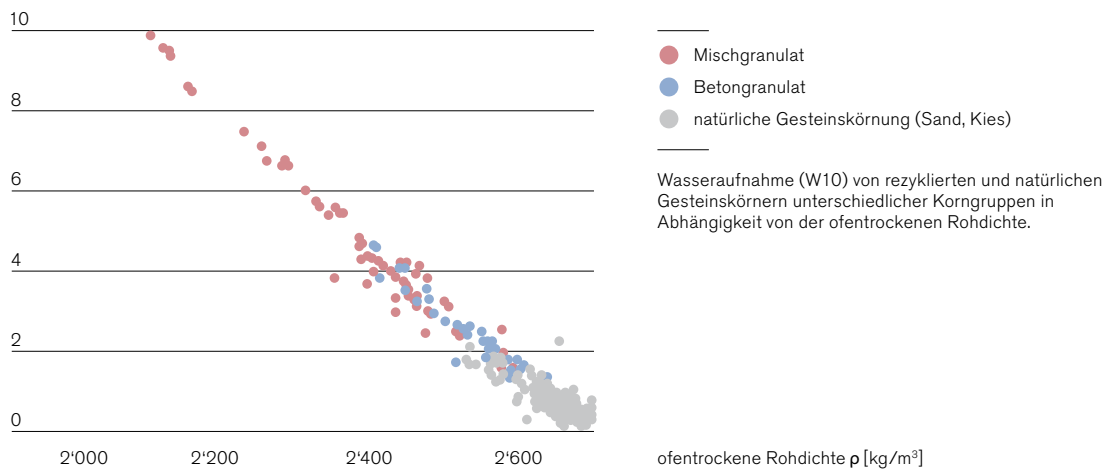
-8, 9- **Rezykliertes Gesteinskorn****Mikroskopische Aufnahme**

Mikroskopische Aufnahme im UV-Licht. Die hohe Porosität des Zementsteins innerhalb des rezyklierten Korns wird im UV-Licht durch die sehr helle Farbe deutlich sichtbar. Sie ist höher als diejenige des umgebenden Zementsteins.

Die Wasseraufnahme ist umso grösser, je kleiner die Rohdichte des rezyklierten Gesteinskorns ist (Abbildung 10). Um einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons vorzubeugen, wird empfohlen, bei der Betonherstellung die Wasserzugabe zu erhöhen oder die rezyklierte Gesteinskörnung vorzunässen. Im Allgemeinen entspricht die Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnung nach einer 10-minütigen Wasserlagerung (W10) etwa 90 % einer 24-stündigen Wasserlagerung (W24), sodass für die Ermittlung des Wasseranspruchs der Gesteinskörnung die W10-Werte zugrunde gelegt werden.

-10- **Wasseraufnahme von rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnern**

Wasseraufnahme W_{10} [M.-%]

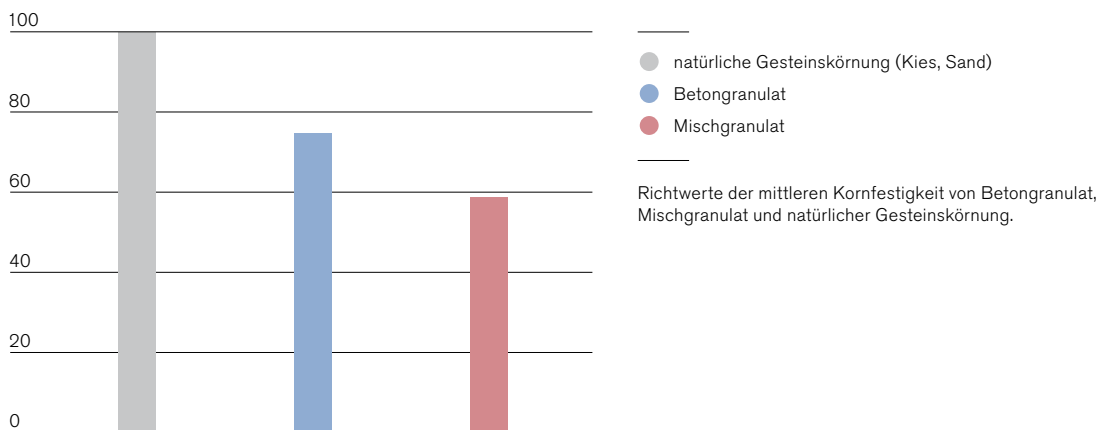


– Kornfestigkeit

Die Kornfestigkeiten der rezyklierten Gesteinskörnungen sind im Allgemeinen geringer als diejenigen von natürlichen Gesteinskörnungen und schwanken in Abhängigkeit von der Materialart (Abbildung 11).

-11- **Richtwerte der mittleren Kornfestigkeit**

Kornfestigkeit [M.-%]

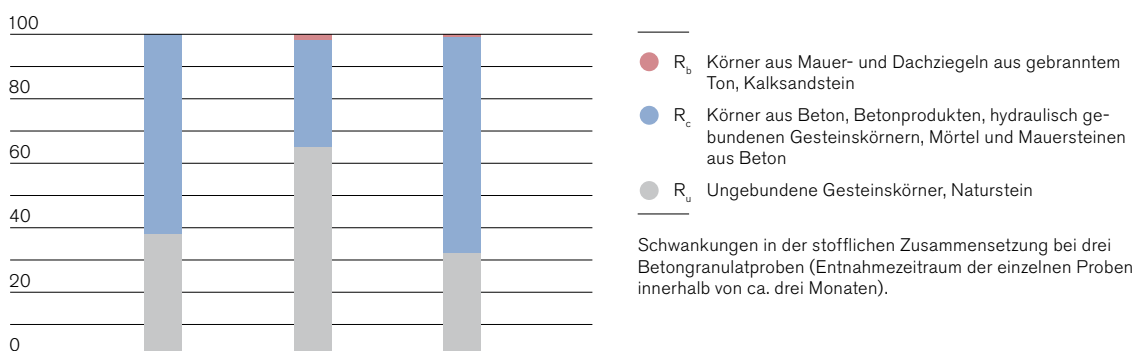


– Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung unterliegt grossen Schwankungen (Abbildung 12 für Betongranulat, Abbildung 13 für Mischgranulat).

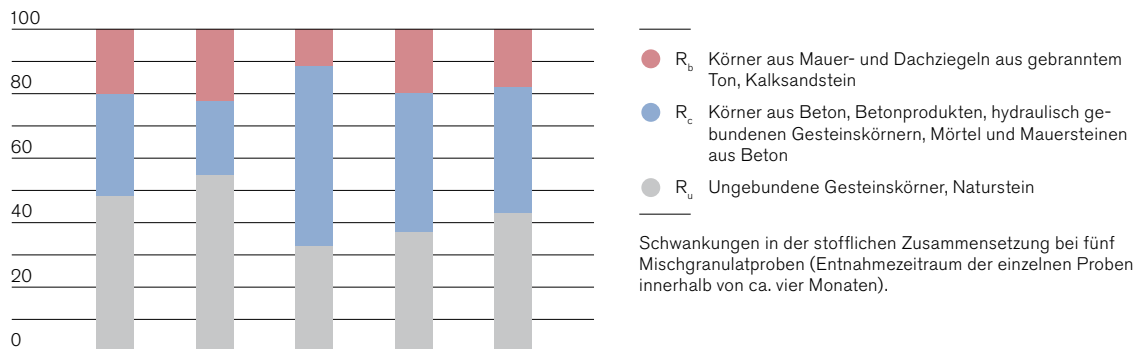
-12- **Betongranulatproben**

Anteil [M.-%]



-13- **Mischgranulatproben**

Anteil [M.-%]

– Alkali-Aggregat-Reaktion⁸

Aufgrund der oftmals unbekanntenen und ständig ändernden Herkunft der Rückbaumaterialien ist es nicht möglich, die AAR-Beständigkeit eines Recyclingbetons mit einem vernünftigen Prüfaufwand repräsentativ nachzuweisen. Deshalb sind rezyklierte Gesteinskörnungen nicht für die Herstellung von AAR-beständigen Betonen zu empfehlen.

– Chloridgehalt

Der wasser- und säurelösliche Chloridgehalt muss bei rezyklierten Gesteinskörnungen kontrolliert werden, um die Verwendung von chloridkontaminiertem Rückbaumaterial bei der Herstellung von Recyclingbetonen zu vermeiden. Für Recyclingbetone nach Eigenschaften gelten dieselben Chloridgehaltsklassen (Cl_x) wie bei Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung.

– Schwefel- und Sulfatgehalt

Sind Schwefelverbindungen in grösseren Mengen im Beton enthalten, können diese zu schädigenden Treiberscheinungen führen, die das Betonbauteil sogar zerstören können. Schwefelverbindungen treten vor allem durch den Rückbau von Gipsputzen, Anhydritestrichen oder nicht separierten Gipskartonplatten in der rezyklierten Gesteinskörnung auf. Um das Risiko dieser Betonschädigung zu minimieren, sind die Mindestanforderungen an die stoffliche Zusammensetzung und an den Schwefel- und Sulfatgehalt gemäss SN EN 12620 (Grundlage 19) zu gewährleisten. Der Anteil an schädlichen Körnern (X), zu denen Gips und Anhydrit zählen, darf in der rezyklierten Gesteinskörnung nicht grösser als 0.3 M.-% sein.

⁸ Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (kurz AKR) oder auch nur Alkalireaktion oder Alkalitreiben, umgangssprachlich auch Betonkrebs, ist die chemische Reaktion zwischen Alkalien des Zementsteins im Beton und der Gesteinskörnung mit alkalilösender Kieselsäure. Die Bezeichnung Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) fasst ähnliche Prozesse zusammen, von denen die AKR die wichtigste ist. Aus Löschkalk $Ca(OH)_2$ und Quarz SiO_2 entstehen durch Kristallbildung u. a. Wollastonit und andere Calciumsilicate, z. B. $Ca(OH)_2 \cdot SiO_2$. Die Reaktion kann schwere Schäden an Betonkonstruktionen wie Brücken und Autobahnbelägen hervorrufen. Sie tritt auf, wenn der Beton der Feuchtigkeit ausgesetzt ist und mit Kies hergestellt wurde, der zu viel lösliche Kieselsäuren enthält. (Quelle: Wikipedia)

2.4 Zusatzmittel

Die Dosiermenge von Fließmitteln kann etwas höher als bei einem vergleichbaren Beton aus natürlicher Gesteinskörnung sein. Für Recyclingbetone werden spezielle, hochwirksame Fließmittel angeboten.

2.5 Wasserzementwert

Für Recyclingbetone gelten die Anforderungen an den Wasserzementwert (w/z-Wert) gemäss SN EN 206 (Grundlage 13). Die Wasseraufnahme ist wie für natürliche Gesteinskörner nach SN EN 1097-6 (Grundlage 20) zu bestimmen und bei der Betonherstellung zu berücksichtigen. Bei der Berechnung des w/z-Werts anhand des ermittelten Wassergehalts aus der Frischbetonprüfung ist es wichtig, die Kernfeuchte der rezyklierten Gesteinskörnung einzukalkulieren.

2.6 Frischbetonverhalten

Bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen schwanken die Frischbetonrohddichten von Recyclingbetonen mit Betongranulat und/oder Mischgranulat in einem grösseren Bereich als bei einem Beton mit 100 M.-% natürlicher Gesteinskörnung, wobei dies auf die unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen ist.

Die Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnung ist in jedem Fall zu bestimmen, da diese die Konsistenz und damit die Verarbeitbarkeit des Frischbetons beeinflusst. Durch die Verwendung von Fließmitteln und/oder die Erhöhung des Zementleimvolumens sowie eine ausreichende Benetzung der rezyklierten Gesteinskörnung vor dem Mischvorgang lässt sich eine gute Verarbeitbarkeit erreichen.

Wie praktische Erkenntnisse zeigen, wird bei gleichbleibender Konsistenz für die Herstellung eines Recyclingbetons tendenziell mehr Zement, mehr Zusatzmittel und/oder mehr Wasser abhängig vom Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung benötigt als für einen Beton mit 100 M.-% natürlicher Gesteinskörnung. Die Aufbereitung der RC-Komponenten ist analog zum Wandkies entscheidend. Werden die Feinanteile der RC-Komponenten ausgewaschen, muss nicht mit einem höheren Zementgehalt als bei Primärbeton operiert werden.

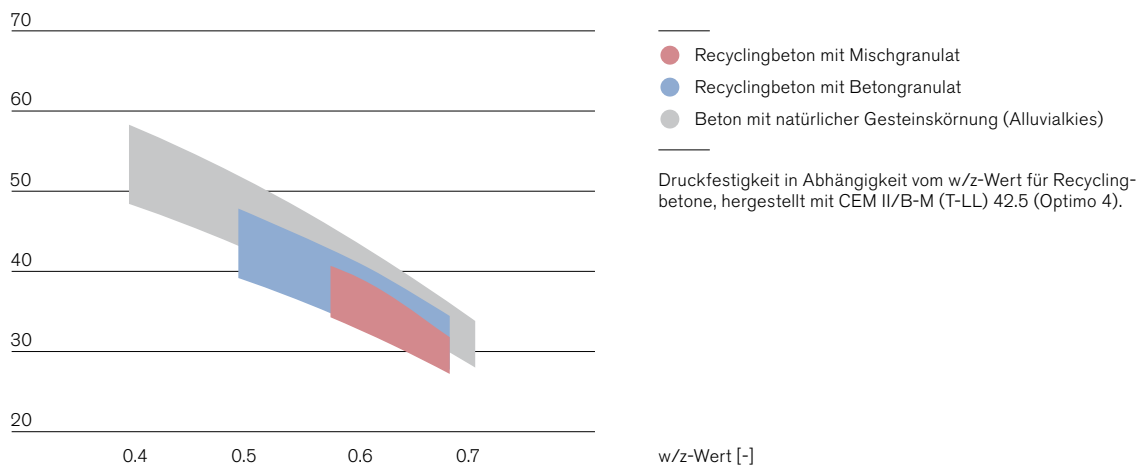
2.7 Festbetoneigenschaften

– Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsklassen des Recyclingbetons entsprechen denjenigen für Betone nach Norm SN EN 206 (Grundlage 13; Festigkeitsentwicklung). Im Vergleich zu Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung weisen Recyclingbetone bei vergleichbarem w/z-Wert tendenziell eine reduzierte Druckfestigkeit auf (Abbildung 14; Grundlage 21). Dies liegt an der geringeren Kornfestigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung und am grösseren Zementleinvolumen.

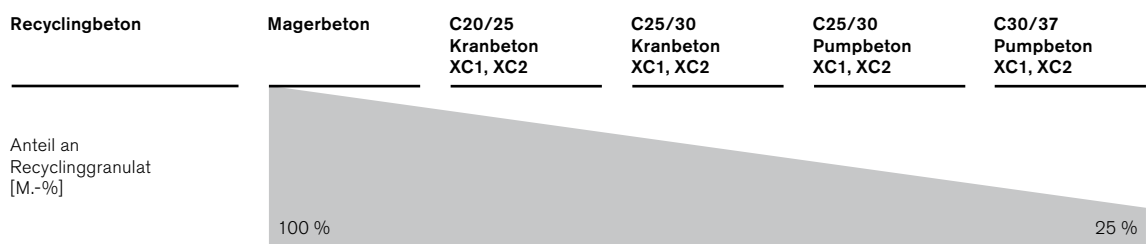
-14- **Betondruckfestigkeit**

Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen [N/mm²]



Je höher der Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung, desto geringer ist die Druckfestigkeit des Recyclingbetons. Recyclingbetone mit einem Anteil an Mischgranulat von bis zu 100 % werden aufgrund ihrer geringen Druckfestigkeit hauptsächlich als Magerbetone eingesetzt. Konstruktionsbetone enthalten je nach geforderter Druckfestigkeitsklasse in der Regel einen Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung von ca. 40 bis 80 M.-%, wobei hierfür hauptsächlich Betongranulat verwendet wird (Abbildung 15).

-15- **Richtwerte Recyclingbetone**



Richtwerte für den Anteil an rezyklierten Gesteinskörnern für unterschiedliche Recyclingbetone.

– Biegezugfestigkeit

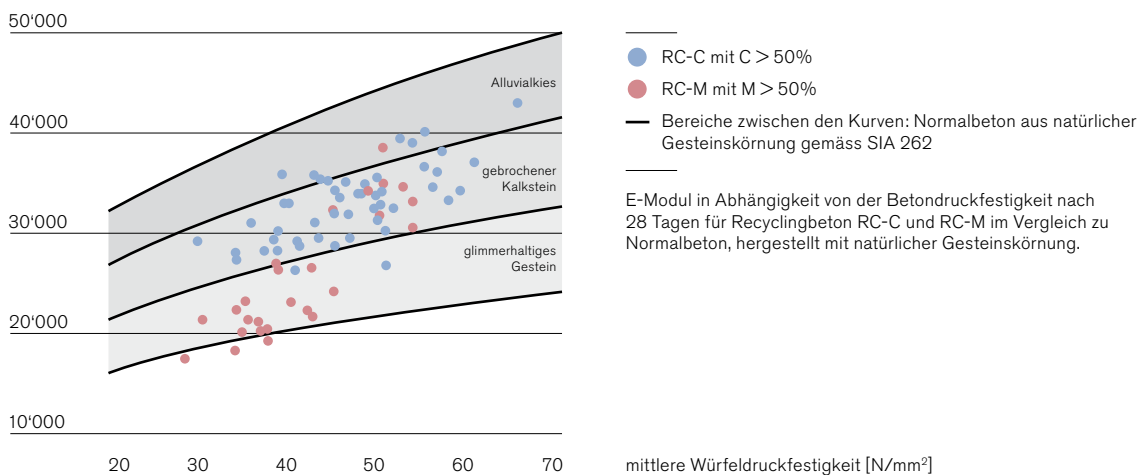
Die Biegezugfestigkeit von Recyclingbetonen nimmt mit steigender Druckfestigkeit zu. Je höher der Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung im Beton, desto tiefer ist dessen Biegezugfestigkeit. Es besteht kein signifikanter Unterschied im Verhältnis von Druckfestigkeit zu Biegezugfestigkeit zwischen einem Recyclingbeton und einem Beton aus natürlicher Gesteinskörnung. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass der Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskorn im Recyclingbeton vergleichbar ist mit jenem im Beton aus natürlicher Gesteinskörnung (Grundlage 21).⁹

– Elastizitätsmodul (E-Modul)

Der E-Modul von Recyclingbeton E_{rcm} ist je nach Art der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungsart geringer als derjenige von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung (Abbildung 16; Grundlage 17, Grundlage 18). Der geringere E-Modul lässt sich auf die niedrigere Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung und auf das höhere Zementsteinvolumen zurückführen.

-16- **E-Modul**

E-Modul [N/mm²]



⁹ Das Verbundverhalten von Stabbewehrung und RC-M unterscheidet sich nicht wesentlich von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung. Die Verankerungslänge der Stabbewehrung kann somit ohne Abminderung gemäss SIA 262, Ziffer 5.2.5.3, Formel (89) berechnet und die Grundwerte derselben der Tabelle 18 entnommen werden. (Quelle: Grundlage 18)

Der E-Modul E_{rc} nach Norm SIA 262/1 ist für Recyclingbeton RC-M bei jeder dritten und für Recyclingbeton RC-C bei jeder sechsten Druckfestigkeitsprüfung zu ermitteln. Diese Erhebung dient der Produktdeklaration gemäss Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» (Grundlage 11).

Wenn für den E-Modul des Recyclingbetons E_{rcm} keine entsprechenden Herstellerangaben oder keine deklarierten Werte vorliegen, ist der E-Modul für Beton aus natürlicher Gesteinskörnung E_{cm} zu verwenden, unter Berücksichtigung eines Umrechnungsfaktors η_r (Abbildung 17, Abbildung 18). Dabei ist für E_{cm} der Wert für Beton gleicher Druckfestigkeit f_{cm} aus natürlicher Gesteinskörnung mit möglichst gleicher Herkunft heranzuziehen oder nach der Norm SIA 262 zu ermitteln.

-17- Gleichung E-Modul

$$\eta_r = \frac{E_{rcm}}{E_{cm}} \leq 1$$

η_r Umrechnungsfaktor für die Eigenschaften von Recyclingbeton

E_{rcm} mittlerer Elastizitätsmodul für Recyclingbeton

E_{cm} mittlerer Elastizitätsmodul für Beton gleicher Druckfestigkeit
 f_{cm} aus natürlicher Gesteinskörnung gleicher Herkunft

$\eta_r = 0.9$ (Gehalt an $R_c \leq 50$ M.-%)

$\eta_r = 0.8$ (Gehalt an $R_c > 50$ M.-%)

Bei Recyclingbeton RC-M sind die folgenden Mindestwerte einzuhalten:

- $E_{rcm} \geq 19'000 \text{ N/mm}^2$
- $\rho_{rcm} \geq 2'000 \text{ kg/m}^3$

Wenn deklarierte Werte fehlen, sind bei der Planung diese Mindestwerte zu verwenden. Ist die Rohdichte angegeben, kann der E-Modul des Recyclingbetons E_{rcm} wie in Abbildung 18 abgeschätzt werden. Dabei gilt für die Rohdichte von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung der Wert $\rho_{cm} = 2'450 \text{ kg/m}^3$.

-18- Abschätzen des E-Moduls

RC-Betontyp	Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung	Elastizitätsmodul	
		ohne deklarierte Werte	bei deklarierter Rohdichte ($\rho_{cm} = 2'450 \text{ kg/m}^3$)
RC-C	$R_c \leq 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0,9$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0,9 \cdot (\rho_{rcm}/\rho_{cm})$
	$R_c > 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0,8$	
RC-M	$R_c \leq 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \geq 19'000 \text{ N/mm}^2$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0,8 \cdot (\rho_{rcm}/\rho_{cm})$
	$R_c > 50 \text{ M.-%}$	$\rho_{cm} \geq 2'000 \text{ kg/m}^3$	

E_{rcm} Mittelwert des Elastizitätsmoduls von Recyclingbeton

E_{cm} Mittelwert des Elastizitätsmoduls von Beton gleicher Druckfestigkeit aus natürlicher Gesteinskörnung möglichst gleicher Herkunft

ρ_{rcm} Mittelwert der Rohdichte von Recyclingbeton

ρ_{cm} Mittelwert der Rohdichte von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung möglichst gleicher Herkunft

– Schwinden und Kriechen

Sowohl das Schwind- als auch das Kriechmass von Recyclingbetonen sind mit zunehmendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung höher als jenes von Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung bei gleicher Druckfestigkeit (Grundlage 17, Grundlage 18). Das verstärkte Schwinden ist vor allem auf den höheren Wassergehalt und das damit höhere Zementsteinvolumen zurückzuführen. Grund für das verstärkte Kriechen ist der höhere Wasseranspruch eines Recyclingbetons gegenüber einem Primärbeton. Tendenziell steigt das Kriechen mit höherem Anteil an Mischabbruch und sinkender Druckfestigkeit an.

Sind dem Planungsteam die Angaben zum Schwind- und Kriechmass des Recyclingbetons nicht bekannt, kann gemäss Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» (Grundlage 11) das Verhalten unter Verwendung des Elastizitätsmodul E_{rcm} analog zum Beton nach der Norm SN EN 206 folgendermassen abgeschätzt werden:

-19- Gleichung Schwindverhalten

$$\epsilon_{rsc, \infty} = \frac{\epsilon_{cs, \infty}}{\eta_r}$$

$\epsilon_{rsc, \infty}$ Endwert des Schwindmasses von Recyclingbeton

$\epsilon_{cs, \infty}$ Endwert des Schwindmasses von Beton nach SN EN 206-1

η_r Umrechnungsfaktor für die Eigenschaften von Recyclingbeton

-20- Gleichung Kriechverhalten

$$\phi_{rc}(t, t_0) = 1.25 \cdot \phi(t, t_0)$$

$\phi_{rc}(t, t_0)$ Kriechzahl von Recyclingbeton

$\phi(t, t_0)$ Kriechzahl von Beton gleicher Druckfestigkeit aus natürlicher Gesteinskörnung möglichst gleicher Herkunft

– Querkraftbemessung und Durchstanznachweis

Beim Einsatz von RC-M gilt es zu beachten, dass aktuell die Querkraftbemessung und der Durchstanznachweis gemäss der Norm SIA 262 mit $D_{max} = 0$ wie für Leichtbetone zu führen ist (Grundlage 11). Aktuellere Forschungen (Grundlage 22) hierzu wurden 2018 vorgenommen. Aufgrund der dabei erhobenen Daten können die Bemessungsgrundlagen für Querkraft und Durchstanzen in SIA 262:2013, Ziffer 4.2.1, Beton, wie folgt formuliert werden:

Für die maximalen Stauchungen sind bei RC-M die folgenden Werte anzusetzen:

$$\epsilon_{c2d} = 0.003 \eta_r \geq 0,002$$

$$\epsilon_{c1d} = 0.67 \epsilon_{c2d}$$

– SIA 262:2013, Ziffer 4.3.3, Querkraft:

Der Wert k_g aus Gleichung (37) ist mit dem Faktor 1.2 zu vergrössern.

– SIA 262:2013, Ziffer 4.3.6, Durchstanzen:

Die Faktoren 2 und 3.5 in Gleichung (69) sind auf 1.5 und 2.5 zu verkleinern.

Für Recyclingbeton RC-C gelten die Regeln der Norm SIA 262.

2.8 Ökologische Aspekte¹⁰**2.8.1 Allgemeine Hinweise**

Studien zur Ökobilanz (Grundlage 23) zeigen auf, dass der Einsatz von Recyclingbetonen in der Schweiz vor allem aufgrund des Verzichts auf Kiesabbau und durch die Einsparung von Deponieraum sinnvoll ist. Bezüglich CO_2 -Emissionen ist der ökologische Mehrwert von Recyclingbetonen gegenüber Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung (Sand, Kies) nicht ohne Weiteres gegeben. Denn Betone aus gebrochener Gesteinskörnung benötigen mehr Zement als jener aus den für Naturkies typischen runden, kubischen Gesteinskörnungen.¹¹ Die Bilanz hängt dabei hauptsächlich von der verwendeten Zementmenge und -art sowie von der Kürze der Transportwege ab. Mit der Verwendung von klinkerreduzierten Zementen lässt sich die CO_2 -Emission von Recyclingbetonen senken. Die Verringerung des Klinkeranteils im Zement wird dabei massgeblich durch den Einsatz von weiteren Hauptbestandteilen vorangetrieben.

¹⁰ Kurzzusammenfassung der aktuellsten Erkenntnisse aus der Forschung zum Thema Recyclingbeton, verfasst durch Cathleen Hoffmann, Holcim (Schweiz) AG.

¹¹ Die Aufbereitung der RC-Komponenten ist analog zum Wandkies entscheidend. Werden die RC-Komponenten gewaschen, sodass die Feianteile ausgeschwemmt werden, wird kein höherer Zementgehalt als bei Primärbeton benötigt.

2.8.2 Klinkerreduzierte Zemente

In der Norm SN EN 197-1 (Grundlage 24) sind die Anforderungen an die Zusammensetzung eines Zements definiert. Gemäss dieser Produktnorm ist die Verwendung von anorganischen Bestandteilen wie mineralischen Rückbaumaterialien als Haupt- und Nebenbestandteile nicht zulässig. Mit der Veröffentlichung des technischen Merkblatts SIA 2049 «Anforderungen an neue Zemente» (Grundlage 14) im Jahr 2014 sind jedoch in der Schweiz Möglichkeiten geschaffen worden, Zemente mit genormten und neuen Bestandteilen, die nicht unter die Produktnorm für Normalzement (SN EN 197-1) fallen, für Betone nach SN EN 206 (Grundlage 13) zuzulassen.

-21- Grenzwerte und Zusammensetzung der neuen Zemente in der Schweiz

Kurzzeichen	Bezeichnung	Portlandzementklinker	Bestandteile		Nebenbestandteile
			normiert	neu	
ZB/D	CH-Portlandzement	50 bis 64	36 bis 50		0 bis 5
ZB/E		35 bis 49	51 bis 65		0 bis 5
ZB/F		20 bis 34	66 bis 80		0 bis 5
ZN/D		50 bis 64		36 bis 50	0 bis 5
ZN/E		35 bis 49		51 bis 65	0 bis 5
ZN/F		20 bis 34		66 bis 80	0 bis 5
HSN	CH-Hüttensandkompositzement	0 bis 20	80 bis 100		0 bis 5

Grenzwerte und Zusammensetzung der neuen Zemente in der Schweiz. Die Gehaltsangaben beziehen sich auf die Summe der Gehalte der Haupt- und Nebenbestandteile (in Massenprozent).

Auf Grundlage dieser in der Schweiz spezifischen normativen Regelung entwickelte die Holcim (Schweiz) AG einen neuen Zement unter Verwendung der feinen Fraktion des Mischgranulats als weiterer Hauptbestandteil. Bei diesem Zement handelt es sich um einen zertifizierten CH-Portlandzement ZN/D 32,5 R nach Merkblatt SIA 2049 «Anforderungen an neue Zemente» (Grundlage 14), der aus Portlandzementklinker, hochwertig aufbereitetem Mischgranulat sowie gebranntem Schiefer besteht. Beim Mischgranulat handelt es sich um die feine Fraktion, die bei der industriellen Aufbereitung (Nass- oder Trockenaufbereitung) von regionalem Mischabbruch anfällt und aufgrund ihres nur bedingt möglichen Einsatzes im Konstruktionsbeton bis anhin oftmals deponiert oder in untergeordneten – sogenannten nicht klassifizierten – Betonanwendungen eingesetzt wurde (Abbildung 22).

-22- Portlandzement ZN/D 32,5 R



Fraktion von Mischgranulat zur Herstellung des zertifizierten CH-Portlandzements ZN/D 32,5 R.

Der CH-Portlandzement ZN/D 32,5 R ist im Hochbau für einfache Betonanwendungen bis hin zur Herstellung von Sichtbeton sowie als Beton für massige Bauteile einsetzbar. Die mit diesem Zement hergestellten Betone weisen eine mittlere Entwicklung der Druckfestigkeit (r -Wert) und eine geringe Wärmeentwicklung auf, wodurch die Gefahr von temperaturbedingten Spannungsrissen im erhärteten Beton erheblich reduziert wird. Das Schwindmass dieser Betone ist im Vergleich zu Betonen, die aus anderen Zementarten wie Kalksteinzement (CEM/II (A-LL)), Portlandkompositzement (CEM II/B-M (T-LL)) oder Hochofenzementen (CEM III/B) hergestellt sind, vergleichbar bis geringer.

2.8.3 Nachhaltigkeitsstandard

Um den ökologischen Aspekten beim Bauen Rechnung zu tragen, wird von vielen Bauherren der Einsatz von Recyclingbetonen gefordert (z.B. KBOB-Empfehlung, Grundlage 6), insbesondere bei der Erstellung von Neubauteilen mit dem Nachhaltigkeitsstandard MINERGIE-ECO. Dieser Nachhaltigkeitsstandard stellt folgende Anforderungen an den Gebrauch von Recyclingbeton im Neubau:

- Der Volumenanteil an Bauteilen aus Recyclingbeton (gemäss Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton», Grundlage 11) in Relation zur Betonkonstruktion, für die Recyclingbetone grundsätzlich angewendet werden können, muss mindestens 50 % betragen.
- Die Distanz zwischen Recyclingbetonwerk und Baustelle darf maximal 25 km betragen. Besteht keine Bezugsmöglichkeit in einem Umkreis von 25 km oder muss das Recyclingmaterial weiter als 25 km zum Betonwerk transportiert werden, so sind Recyclingbetone nicht zu verwenden (Grundlage 7).
- Die stoffliche Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung muss die Vorgaben des Merkblatts SIA 2030 «Recyclingbeton» erfüllen (Grundlage 11).
- Recyclingbetone nach Eigenschaften für konstruktiv tragende Bauteile: Der Gehalt der Bestandteile R_c und R_b beträgt mindestens 40 %, ausgezählt nach SN 670 902-11 (Grundlage 12).
- Recyclingbetone nach Zusammensetzung für Füll-, Hüll- und Unterlagsbetone etc.: Der Mindestgehalt der Bestandteile R_c und R_b beträgt mindestens 80 %, ausgezählt nach SN 670 902-11 (Grundlage 12).

Um die Kriterien und Vorgaben einzuhalten, sind durch das Planungsteam folgende Massnahmen zu ergreifen:

- Abklären der Verfügbarkeit der Recyclingbetonsorten
- Festlegen der Bauteile, die aus Recyclingbetonen gefertigt werden können, und Sicherstellen des geforderten Mindestanteils in Bezug zum gesamten Betonvolumen
- Ausschreiben der entsprechenden Recyclingbetonsorten mit den vorhergesehenen Mengen im Devis

Gleichermassen hat der Kanton Thurgau die Möglichkeit, für seine Bauvorhaben den Einsatz von Recyclingbetonen zu fordern, indem obige Anforderungen übernommen oder ähnliche Anforderungen formuliert werden.



3

Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG)

Mit dem Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) hat der Kanton Thurgau ein Vorzeigeprojekt realisiert. Für rund 80 % des gesamten Betonverbrauchs wurden Recyclingbetone verwendet.

3.1 Das Thurgauer Baustoffrecycling-Konzept geht in die Umsetzung

«Bauabfälle bilden den mengenmässig grössten Abfallstrom. Bislang werden sie nur teilweise aufbereitet und wieder dem Baustoffkreislauf zugeführt. Ein beträchtlicher Teil wird deponiert. Die in Thurgauer Bauschutttaufbereitungsanlagen entgegengenommenen Bauabfallmengen – vor allem Betonabbruch und Mischabbruch – nehmen zwar seit Jahren zu und liegen bei knapp 0.5 Mio. Tonnen pro Jahr. Es ist jedoch festzustellen, dass die Verwertung der daraus erzeugten RC-Baustoffe zu rund drei Vierteln in loser Form erfolgt. Zudem werden zur Erreichung bautechnischer Qualitätsvorgaben noch immer über 150'000 Tonnen Primärmaterial zugemischt. Beim verwertbaren Ausbauasphalt liegt die Recyclingquote mit ca. 80 % etwas besser, allerdings waren die letzten Jahre auch geprägt von einem raschen Anwachsen der Materiallager.

Da der noch zur Verfügung stehende Deponieraum und die Kiesreserven endlich und bei der Erschliessung dieser Ressourcen auch Widerstände nicht ausgeschlossen sind, wurde im Auftrag des Regierungsrats ein Recyclingkonzept für den Hoch- und Tiefbau erstellt. Bei der Erstellung des Konzeptes haben zahlreiche Akteure aus Branche, Verwaltung und Verbänden mitgewirkt, so dass es sehr breit abgestützt ist. Das Baustoffrecycling-Konzept wurde im April 2018 vom Regierungsrat genehmigt und soll in den Jahren 2019 bis 2023 umgesetzt werden.

Wieso die Ressourcen aus den Bauwerken bisher wenig genutzt werden, hat verschiedene Gründe. Eine Umfrage hat gezeigt, dass Recyclingbaustoffen noch immer ein schlechtes Image anhaftet und das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten vielfach beschränkt ist. Dass heute qualitätsgeprüfte RC-Produkte anstelle von «Hausmischungen» verfügbar sind, ist oft genauso unbekannt, wie der Einsatz in hochwertigen Betonen, die puncto Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und Elastizität zu klassischen Produkten aufgeschlossen haben und teilweise auch für anspruchsvolle Expositionsklassen verfügbar sind. Fehlende oder alte Qualitätsnachweise und mögliche Garantieforderungen durch die Bauherrschaft schrecken zusätzlich ab.

Im Bereich der Belagsaufbereitung kommt die Schwierigkeit hinzu, dass der technisch mögliche RC-Anteil von 80 % und mehr nur in modernisierten Anlagen erreicht werden kann. Je nach Anforderungen können auch normative Regelungen oder selbst Labels einem Einsatz von RC-Materialien entgegenstehen, etwa bei der Länge des Transportweges. Damit die Recyclingquote der Bauabfälle erhöht werden kann und sich das Image der Recyclingbaustoffe verbessert, ist ein Beitrag aller Beteiligten nötig. Behörden, Verbände und Branche sind gleichermassen gefordert. So werden die Verbände ein Konzept erarbeiten, das die Qualitätssicherungsmaßnahmen von der Produktion bis zur Anwendung der Recyclingbaustoffe möglichst gut definiert und wie häufig und in welchem Umfang Kontrollen durchgeführt werden müssen.»¹²

Der Kanton Thurgau als Bauherr wurde seiner Vorbildfunktion gerecht und realisierte in Kreuzlingen den Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau (PHTG) mit nachhaltig hergestellten Recyclingbetonen (Novo-Con von Möckli Beton AG). Anhand dieses Projekts sollen die Möglichkeiten des Bauens mit nachhaltigen Baustoffen aufgezeigt werden. Statt neuem Kies aus der Kiesgrube wurde gewaschenes und sortiertes Recyclinggranulat verwendet. Der Anteil an Recyclingbeton beträgt knapp 80 % des gesamten Betonvolumens, das für dieses Objekt eingesetzt wurde.

¹² Achim Kayser, Dr. sc. nat. ETH, Leiter Abteilung Abfall und Boden, Amt für Umwelt, Kanton Thurgau

3.2 Betontragwerk

Beim Neubau der PHTG handelt es sich um einen zwei- bis dreigeschossigen Skelettbau¹³ mit Betonflachdecken, die auf den Stützen und Betonwänden auflagen. Das Gebäude weist Abmessungen L x B x H = ca. 85 x 27 x 7.5 m auf. Im Bereich der Nordostfassade, entlang der Schulstrasse, krägt das 1. OG (Ebene +1) über das EG (Ebene 0) aus (Abbildung 27, Abbildung 28). Die Fassaden wie auch viele Betonflächen im Innern des Gebäudes sind in Sichtbeton gefertigt. Die Sichtbetonfassade wurde dabei zuerst betoniert, das Gebäudetragwerk folgte in einem zweiten Arbeitsschritt. Die gesamte Fassade liegt auf der Deckenkonstruktion auf. Die geschwungenen Sheds sind ebenfalls als Sichtbetonkonstruktion ausgebildet. Die maximale Gebäudehöhe wurde im Projektwettbewerb vorgegeben, da die Sicht auf die südwestlich des Neubaus gelegene Klosteranlage nicht beeinträchtigt werden sollte. Um nicht unnötig Raumhöhe zu verlieren, musste die Tragstruktur der Geschossdecken schlank gehalten werden. Die in Abbildung 23 bis Abbildung 28 verwendeten Farbcodes widerspiegeln die unterschiedlich eingesetzten Betone, die in Abbildung 29 zusammengefasst sind.

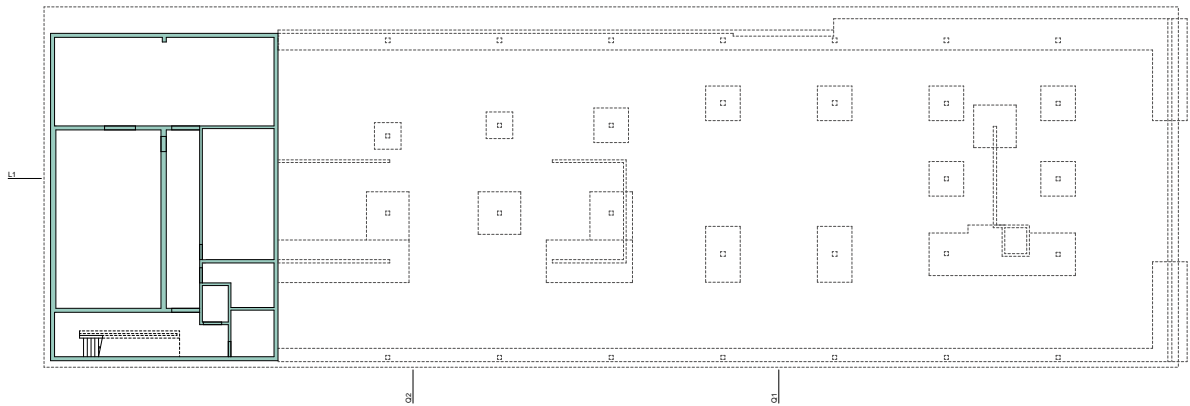
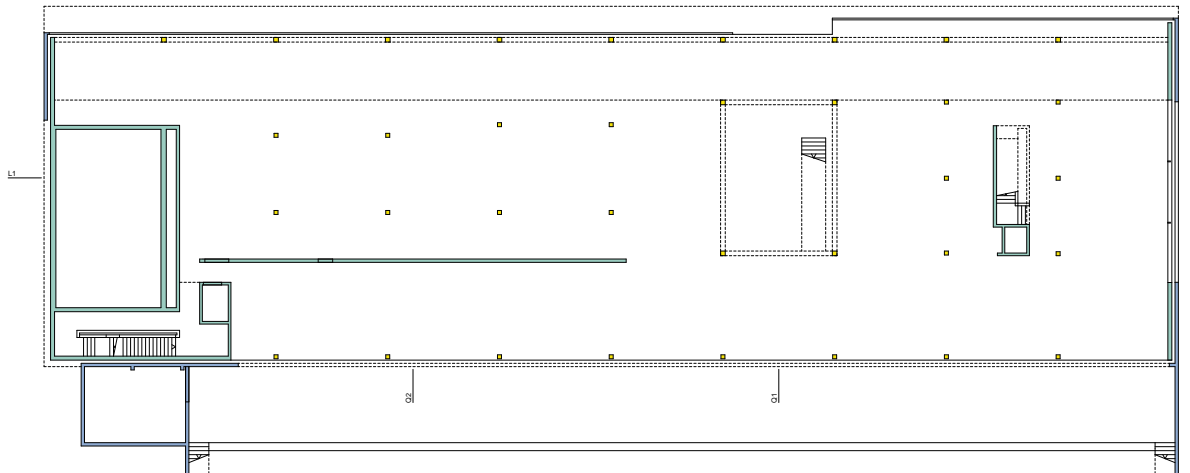
¹³ Ebene -1 nur in einem minimalen Gebäudebereich (Abbildung 23).



Am leicht abfallenden Hang liegt entlang der Schulstrasse der langgestreckte Neubau Z, der als zweigeschossiges Volumen einen verbindenden Aussenraum zum Gebäude M schafft.



Die Fassaden wie auch viele Oberflächen im Innern des Gebäudes sind in Sichtbeton gefertigt. Die Umsetzung zeigt exemplarisch, dass mit den heutigen Eigenschaften des Recyclingbetons dem Einsatz kaum mehr Grenzen gesetzt sind.

-23- Grundriss Ebene -1¹⁴-24- Grundriss Ebene 0¹⁴

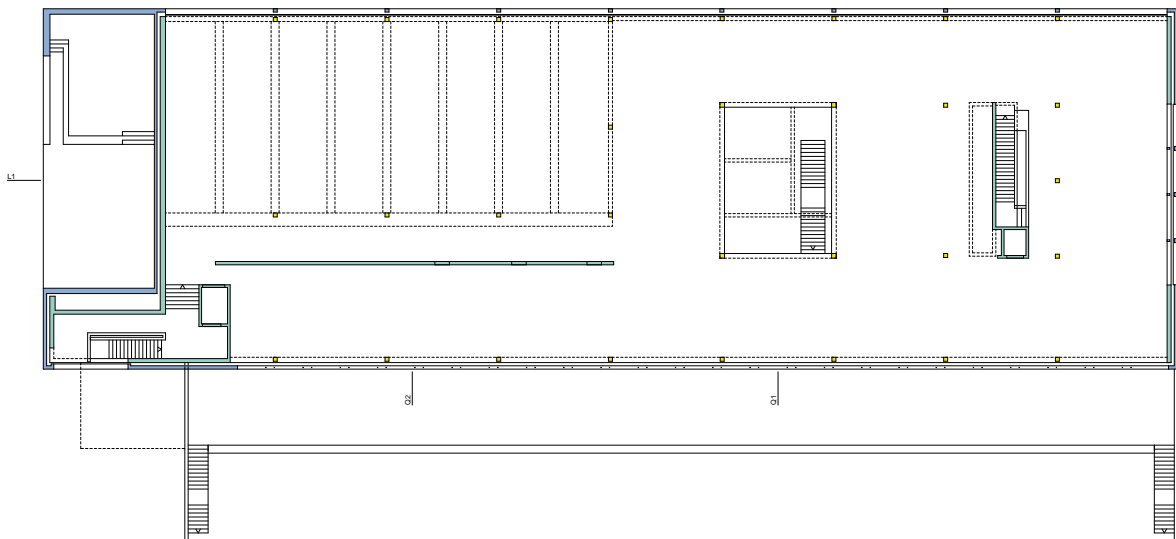


Im zweigeschossigen Foyer führt eine grosszügige Treppe ins Obergeschoss.



Die Räume für das Bildnerische Gestalten erhalten durch die Shedoblichter Ateliercharakter.

-25- Grundriss Ebene +1¹⁵

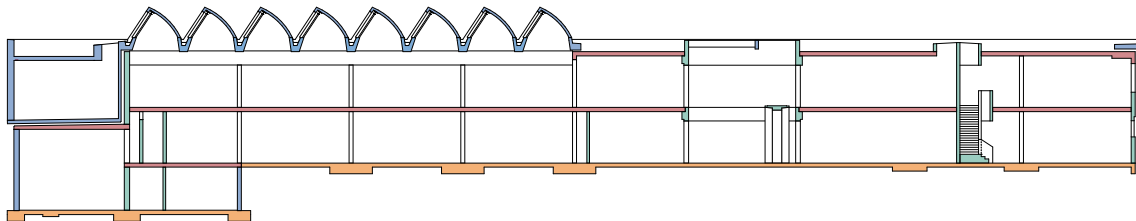


¹⁵ Grundlage: Pädagogische Hochschule Thurgau, Kreuzlingen – Erweiterungsbau 2, Planunterlagen Studie RC-Beton, Plan-Nr. 150.B1, 21. Oktober 2020, Beat Consoni AG



Durch seine offene Bauweise widerspiegelt das Gebäude einen zeitgemässen Schul- und Forschungsbetrieb.

-26- **Längsschnitt L1**¹⁶

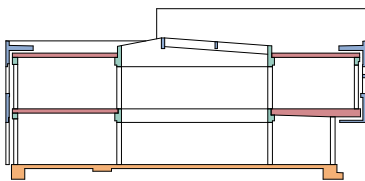


¹⁶ Grundlage: Pädagogische Hochschule Thurgau, Kreuzlingen – Erweiterungsbau 2, Planunterlagen Studie RC-Beton, Plan-Nr. 150.B1, 21. Oktober 2020, Beat Consoni AG

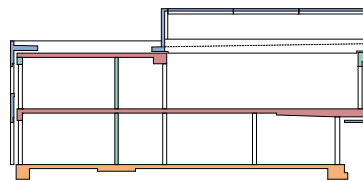


Der gut strukturierte Skelettbau lässt eine grosse Flexibilität für zukünftige Raumeinteilungen und allfällige Nutzungsänderungen zu.

-27, 28- **Querschnitt Q1¹⁷**



Querschnitt Q2¹⁷



Diese Umsetzung zeigt, dass mit den heutigen Eigenschaften von Recyclingbetonen dem Einsatz kaum mehr Grenzen gesetzt sind, dass also praktisch alle Bauteile auch in Recyclingbetonen gefertigt werden können. Selbstverständlich müssen dabei jeweils die materialspezifischen Eigenschaften, die teilweise von jenen der Primärbetone abweichen können, einbezogen werden. Diese Eigenschaften stellen dabei nicht immer einen Nachteil dar. Die «Weichheit» des Betons bringt auch positive Effekte wie die geringere Rissanfälligkeit mit sich. Diese Besonderheiten wirken sich bei der Erstellung von wasserdichten Bauteilen oder auch bei Sichtbetonbauteilen durchaus vorteilhaft aus und ermöglichen so auch grössere Betonieretappen, was wiederum eine Verkürzung der Bauzeit bedeutet. Um ein optimales Endresultat zu erlangen, sollten alle am Bau Beteiligten den Einsatz der Recyclingbetone unterstützen. In erster Linie muss der Bauherr gewillt sein, diese Betone bei seinem Objekt zuzuziehen. Darüber hinaus müssen alle Planerinnen und Planer bei ihren Arbeitsschritten den spezifischen Materialeigenschaften Rechnung tragen. Und schliesslich bedarf es auch eines Materiallieferanten, der die in der Submission geforderten Betoneigenschaften einhält, sowie eines Baumeisters, der mit der nötigen Sorgfalt die Betonierarbeiten ausführt. Diese Voraussetzungen sind aber bei jedem Betonbau und ganz besonders bei jedem Sichtbetonbau zu erfüllen.

Wie diese Umsetzung durch das Planungs- und Ausführungsteam der PHTG erfolgte, welche besonderen Herausforderungen die Recyclingbetone mit sich brachten und welche Lehren das Team aus der Umsetzung der PHTG gezogen hat, kann in den Interviews mit den am Bau Beteiligten im Anhang nachgelesen werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Aussagen aus den Interviews aufgeführt und kommentiert:

- Die objektspezifischen Rahmenbedingungen sind in den ersten Phasen zu definieren und zu klären, sodass diese bei der Prüfung des Einsatzes von Recyclingbetonen berücksichtigt werden können. Am Beispiel der PHTG: Die Definition der maximalen Gebäudehöhe und die Forderung nach optimaler lichter Raumhöhe zogen die Notwendigkeit von schlanken Deckensystemen nach sich, weshalb die weitgespannten Decken in Primärbeton gefertigt wurden.
- Manche Planerinnen und Planer verfügen über wenige oder keine Kenntnisse der Eigenschaften und der Verwendung von Recyclingbetonen. Dies führt dazu, dass der mögliche Einsatz von Recyclingbetonen bei Bauprojekten oftmals gar nicht geprüft wird. Die Bauherrschaft soll daher im Rahmen der Projektdefinition und des Projektpflichtenheftes den Einsatz von Recyclingbetonen fordern.
- Die gute Zusammenarbeit innerhalb des Planungs- und Ausführungsteams ist beim Einsatz von Recyclingbetonen noch entscheidender, als dies bei Bauaufgaben ohnehin der Fall ist.
- Unter Berücksichtigung der objektspezifischen Randbedingungen wurde definiert, welche Bauteile mit Recyclingbetonen erstellt und wo Primärbetone eingesetzt werden konnten. Aufgrund der aus der definierten Gesamtgebäudehöhe und der geforderten lichten Raumhöhe resultierenden schlanken Deckenkonstruktionen wurde für die Decken ein Primärbeton eingesetzt (Recyclingbeton hätte aufgrund der geringeren Festbetoneigenschaften grössere Deckenstärken nach sich gezogen), während alle weiteren Betonbauteile mit Recyclingbetonen gefertigt wurden. Die Auseinandersetzung mit den objektspezifischen Randbedingungen ist ein entscheidender Punkt bei der Selektion von Recycling- oder Primärbetonen.

- Bei Sichtbetonbauten, die mit Recyclingbetonen hergestellt werden sollen, ist die Fertigung von Musterflächen noch wichtiger als bei Sichtbetonbauten aus Primärbetonen, weil das Erscheinungsbild je nach Betonwerk und Anteil von Recyclingkomponenten stärker variieren kann. Mit diesen Musterflächen soll auch die Machbarkeit der relevanten Ausführungsdetails geprüft werden. Insbesondere betrifft dies die Frage, welches Schalmaterial und welches Schalöl eingesetzt werden soll und mit welchen Aussparungs- und Einlageabmessungen die geforderten Oberflächeneigenschaften – vor allem der Betonkanten – erreicht werden können. Auch bei den Musterflächen sollte bestimmt werden, wie lange das Bauteil eingeschalt belassen werden kann.
- Der gegenüber Primärbetonen etwas tiefere E-Modul der Recyclingbetone hat auch positive Effekte, indem diese zu weniger Rissbildung neigen, was sich bei Sichtbetonbauteilen oder erdberührten Bauteilen mit erhöhten Anforderungen an die Wasserdichtigkeit vorteilhaft auswirkt.
- Bewitterte horizontale Oberflächen sind aus Sicht des Planungsteams der PHTG zu vermeiden, denn Recyclingbetone neigen zur Bildung von Lunkern, also kleineren Hohlräumen an der Betonoberfläche, weshalb die Dauerhaftigkeit von horizontalen bewitterten und ungeschützten Flächen infrage gestellt wird. Es wird empfohlen, solche Flächen mit einer Abdeckung oder einer Abdichtung zu schützen.
- Die möglichen Betonwerke und die zugehörigen Betoneigenschaften der Recyclingbetone sind in einer sehr frühen Projektphase zu klären, damit die Projektierung auf Basis der korrekten Grundlagen umgesetzt werden kann. Die geforderten Eigenschaften, insbesondere der E-Modul und der RC-Anteil der Recyclingbetone, sind in der Submission klar zu beschreiben und in der Ausführung zu kontrollieren.
- Bei der PHTG wurde nur unterschieden zwischen Recyclingbeton und Primärbeton. Es wäre aber durchaus denkbar und gegebenenfalls sinnvoll, Recyclingbetone mit unterschiedlichen Eigenschaften einzusetzen, indem eine Abstufung des RC-Anteils in Abhängigkeit der statischen Anforderungen vorgenommen wird. Damit könnte man dem ökologischen Gedanken noch besser nachkommen, indem bei Bauteilen mit geringeren statischen Anforderungen ein grösserer Anteil von Recyclingkomponenten eingesetzt wird.

3.3 Betonsorten

Bei der PHTG kamen die in Abbildung 29 aufgeführten Betonsorten zum Einsatz. Sämtliche Bauteile, mit Ausnahme der weitgespannten, hochbeanspruchten und teilweise vorgespannten Decken, wurden aus Recyclingbetonen ausgeführt. Bei den weitgespannten Decken wurde ein Primärbeton verwendet, weil dessen höhere Festigkeitseigenschaften eine schlankere Ausführung der Decken erlaubten. Da aus denkmalpflegerischen Gründen die Gesamtgebäudehöhe vorgeschrieben war und aus Nutzersicht eine optimale lichte Raumhöhe angestrebt wurde, musste die Deckenstärke minimiert werden. Wäre bei diesen Decken ebenfalls der gewählte Recyclingbeton mit einem Anteil an Recyclingmaterial > 65 M-% eingesetzt worden, hätten daraus grössere Bauteilabmessungen und damit weniger lichte Raumhöhen resultiert. Teilweise wurden aber auch Decken mit diesem Recyclingbeton gefertigt, nämlich jene, deren Untersichten als Sichtbeton konzipiert sind. Für diese wurde der gleiche Beton wie für die Sichtbetonwände eingesetzt, um keine optischen Unterschiede zwischen den einzelnen Sichtbetonoberflächen zu bewirken. Bei den Decken, die mit RC-C erstellt wurden, reagierte das Planungsteam mit einer Vergrößerung der Bauteilstärke auf die gegenüber dem Primärbeton reduzierten Festigkeitsanforderungen des Recyclingbetons.

-29- Bei der PHTG eingesetzte Betonsorten, gegliedert nach Bauteilen

<u>Geschoss</u>	<u>Bauteil</u>	<u>RC-Beton</u>	<u>Sichtbeton</u>	<u>Beton</u>
Allgemein	Fundamente, Vertiefungen	● ja	nein	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
UG	Bodenplatte	● ja	nein	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Aussenwände	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Aussenwände	● ja	nein	RC-C, NPK B, C30/37, XC3 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Innenwände	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Innenwände	● ja	nein	RC-C, NPK B, C30/37, XC3 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Decken	● nein	nein	NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
EG	Stützen	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Aussenwände	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Aussenwände	● ja	nein	RC-C, NPK B, C30/37, XC3 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Innenwände	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Innenwände	● ja	nein	RC-C, NPK B, C30/37, XC3 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Decken	● nein	nein	NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
OG	Stützen	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Aussenwände	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Aussenwände	● ja	nein	RC-C, NPK B, C30/37, XC3 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Innenwände	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Innenwände	● ja	nein	RC-C, NPK B, C30/37, XC3 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Decken	● nein	nein	NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax32, Cl. 0. 10, C3
	Fassadensturz	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3
	Sheds	● ja	ja	RC-C, NPK C, C30/37, XC4 (CH), XF1 (CH), Dmax16, Cl. 0. 10, C3

3.4 Kosten

Die Aufbereitung des Recyclinggranulats ist aufwendiger als die Bereitstellung der Zuschlagstoffe aus dem Kiesabbau (Primärmaterial). Dem Produktionsunternehmen entstehen Zusatzkosten aus dem Brech-, Sortier- und Waschprozess sowie durch die Wiederverwendung von schwierig verwertbaren Komponenten im Zementwerk oder durch deren Entsorgung in der KVA, auf einer Innerstoff- oder einer Reaktordeponie, je nach Belastung des Materials. Dadurch resultieren in der Produktion Mehrkosten von ca. 40 bis 50 CHF pro Kubikmeter Beton. Die Zementindustrie kann die ausgewaschenen Feinstkomponenten als Rohmehlersatz in die Produktion einfließen lassen, sodass diese nicht mehr unter Entrichtung von Gebühren entsorgt werden müssen.

Zugleich erhält das Produktionsunternehmen Entsorgungsgebühren für das Abbruchmaterial. Diese Entsorgungsgebühren vermögen die Kosten der vorgängig beschriebenen Mehraufwendungen ungefähr zu decken.

Die Firma Möckli Beton AG bietet den Primär- und den Recyclingbeton daher zu gleichen Konditionen an. Dies hat Urs Hofer, Verkaufsleiter der Möckli Beton AG, anlässlich der Interviews mit den am Erweiterungsbau der PHTG beteiligten Personen vom 10. August 2020 entsprechend bestätigt (Anhang).

Aus den Preislisten anderer Unternehmen geht ebenfalls hervor, dass RC-C-Betone zu den gleichen Konditionen wie vergleichbare Primärbetone angeboten werden. Die Abbildungen 30 und 31 zeigen einen Ausschnitt aus der Preisliste der Toggenburger AG von 2020, wobei in Abbildung 30 die Preise für RC-C-Betone und in Abbildung 31 jene vergleichbarer Primärbetone aufgeführt sind.

Auch der Transport und die Verarbeitung des Recyclingbetons auf der Baustelle sind nicht mit Zusatzkosten verbunden, sodass der Einsatz dieses Materials die Bauherrschaft nicht teurer zu stehen kommt.

Anlässlich der Interviews mit den am Erweiterungsbau der PHTG beteiligten Personen vom 10. August 2020 hat Stefan Luginbühl, stellvertretender Geschäftsleiter der Stutz AG Bauunternehmung, erwähnt, dass die Nutzung von Recyclingbetonen für den Baumeister einen leicht höheren Aufwand gegenüber dem Einsatz von Primärbetonen generiert (Anhang). In der Regel werde aber bei der Kalkulation nicht zwischen Primär- und Recyclingbetonen unterschieden, demnach ergeben sich durch den Einsatz von Recyclingbetonen für den Bauherrn keine Mehrkosten.



4

Schlussfolgerungen

Im Sinne eines umfassenden Verständnisses von Nachhaltigkeit gilt es, den ganzen Kreislauf und Lebenszyklus eines Baustoffs zu berücksichtigen. Auch nach dem Rückbau bleibt Beton ein kostbares Gut. In dafür geeigneten Werken wird das Material zerkleinert und als Beton- und Mischgranulat wieder in den Baustoffkreislauf eingespeist. Der Einsatz von Recyclingbetonen sollte bei jedem Projekt geprüft werden.

4.1 Einsatzgebiete

Die heutigen Recyclingbetone weisen bezüglich Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit und Elastizität im Vergleich mit herkömmlichen Betonen keine grossen Defizite mehr auf. Für die Festigkeitseigenschaften der Recyclingbetone spielt der Anteil der RC-Komponenten eine wesentliche Rolle. Ein RC-C mit dem minimalen Anteil von 25 M-% RC-Komponenten hat praktisch die gleichen Eigenschaften wie ein Primärbeton, während die Festigkeitseigenschaften (Druckfestigkeit, E-Modul) mit zunehmendem RC-Anteil stärker von jenen des Primärbetons abweichen. Entscheidend ist zudem die Aufbereitung des Recyclingmaterials, das nach dem Brechen gewaschen werden sollte, sodass die Feianteile ausgeschwemmt werden. Über die Definition des RC-Anteils ist es möglich, die Betoneigenschaften zu steuern, damit auf die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Bauteile eines Objektes reagiert werden kann. So können beispielsweise innerhalb eines Bauwerks die Geschossdecken, bei denen eine hohe Festigkeit und ein grosser E-Modul benötigt werden, mit einem RC-C mit geringerem RC-Anteil gefertigt werden, während für Wände Betone mit einem höheren RC-Anteil eingesetzt werden können.

Infolge der eher geringen Erfahrungen zu dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekten wie Frost-Tausalz-Widerstand, Chloridwiderstand (wichtig hinsichtlich Bewehrungskorrosion), Gaspermeabilität (wichtig hinsichtlich Karbonatisierung des Betons) und Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) wurde eine eventuell restriktiv erscheinende Beschränkung für die Verwendung von Recyclingbetonen auf bestimmte Expositionsklassen im Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» (Grundlage 11; Abbildung 32, Abbildung 33) vorgenommen. Für Bauteile der Expositionsklassen «Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride» (XD[CH]), «Frostangriff mit oder ohne Taumittel» (XF[CH]) und «Chemische Angriffe» (XA[CH]) ist der Einsatz von Recyclingbetonen nicht zu empfehlen oder nur nach entsprechend erfolgreichen Voruntersuchungen zulässig.

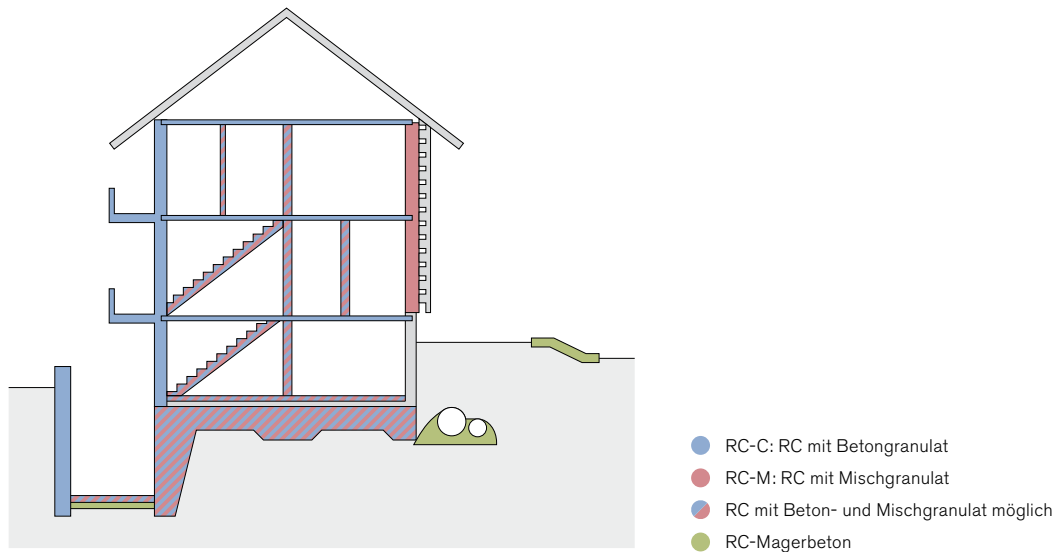
Die Eigenschaften des RC-M (Elastizitätsmodul, Schwinden und Kriechen) unterscheiden sich tendenziell stärker von Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung als jene des RC-C. Deshalb ist ein Einsatz von RC-M in Bauteilen vorzuziehen, bei denen ein verstärktes Schwinden und Kriechen unproblematisch ist. Für die Expositionsklassen XD[CH], XF[CH] und XA[CH] sowie generell für Spannbeton und ermüdungsgefährdete Bauteile darf RC-M nicht verwendet werden.

-32- Einsatzgebiete von Recyclingbetonen

Recyclingbeton		Expositionsklasse				
Anteile		X0(CH)	XC1(CH) trocken	XC1(CH) nass, XC2(CH), XC3(CH)	XC4(CH)	XD(CH), XF(CH), XA1-3(CH)
RC-C	$R_c \geq 25 \text{ M.-%}$ $R_b < 5 \text{ M.-%}$	zulässig				①
RC-M	$5 \text{ M.-%} \leq R_b \leq 25 \text{ M.-%}$ und $R_c + R_b \geq 25 \text{ M.-%}$	zulässig			①	nicht zulässig
	$R_b > 25 \text{ M.-%}$	zulässig		①	①	

① Nach entsprechenden Voruntersuchungen zulässig

-33- Einsatzgebiete von Recyclingbetonen



4.2 Hinweise für den Bauherrn

Der Bauherr muss dem Einsatz von Recyclingbetonen grundsätzlich aufgeschlossen gegenüberstehen, um damit einen Beitrag an die Nachhaltigkeit zu leisten. Er sollte sich bewusst sein, dass Bauteile aus Recyclingbetonen gegebenenfalls mit leicht grösseren Bauteilstärken auszuführen sind, um die geringeren Festbetoneigenschaften kompensieren zu können. Bei Sichtbetonbauten muss er sich mit dem Umstand arrangieren, dass auch in einem Recyclingbeton aus Betongranulat (RC-C) ein kleiner Anteil von maximal 5 M.-% an rezyklierten Körnern R_b , bestehend aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen und nicht schwimmenden Porenbetonsteinen, enthalten sein können, die zu einem anderen Erscheinungsbild führen können als bei einem Primärbeton. Zudem neigen Recyclingbetone zu einer leicht höheren Lunkernbildung.¹⁸ Im Weiteren besteht aufgrund der geringeren Festigkeit eine etwas grössere Gefahr, dass Kanten brechen, weshalb kleine Aussparungen und Einlagen bei solchen Betonen nicht vorgesehen sein sollten.¹⁹ Dafür weisen Recyclingbetone gegenüber Primärbetonen leicht bessere Eigenschaften bezüglich Rissbildung auf.

Bei der Formulierung der Projektdefinition kann der Bauherr den Einsatz von Recyclingbetonen für sein Objekt fordern.

Nicht alle Planungsteams und Baumeister bringen die gleiche Erfahrung und Offenheit im Umgang mit Recyclingbetonen mit. Entsprechend tut der Bauherr gut daran, Firmen zu beauftragen, die bereits Erfahrungen mit Recyclingbetonen gemacht haben oder zumindest neuen Baumaterialien gegenüber offen eingestellt sind.

¹⁸ Unter Lunkern versteht man kleinere Hohlräume mit zumeist unregelmässiger Form, die bei der Erstarrung des Betons in der Schalung an der Betonoberfläche entstehen können. Sie treten vor allem in den oberen Bereichen von vertikalen Bauteilen auf und können den optischen Gesamteindruck der Oberfläche prägen. (Quelle: BetonSuisse: Merkblatt für Sichtbetonbauten, dritte vollständig überarbeitete Auflage, 2020 Merkblatt 02)

¹⁹ Es wird empfohlen, im Rahmen von Musterbauteilen zu prüfen, welche minimalen Abmessungen von Aussparungen und Einlagen mit dem jeweiligen Recyclingbeton noch ausführbar sind. Zudem wird geraten, die Aussparungen und Einlagen konisch auszubilden, um die Gefahr des Abbrechens der Betonkanten beim Ausschalen zu reduzieren.

4.3 Hinweise für die Projektierung

Von den ersten Planungsschritten an bedarf es einer engen Zusammenarbeit im gesamten Planungsteam, um den spezifischen Materialeigenschaften von Recyclingbetonen gebührend Rechnung zu tragen.

Die normativen Vorgaben sind durch das Planungsteam und vor allem durch das projektierende Bauingenieurunternehmen zu beachten. In erster Linie sind sie gefordert, das Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton» (Grundlage 11) heranzuziehen.

Bereits in den ersten Phasen der Projektierung muss sich das Planungsteam mit den Möglichkeiten des Marktes befassen und prüfen, welche Betonwerke für die Lieferung des Recyclingbetons infrage kommen. Es ist dabei sicherzustellen, dass ein Betonwerk im Umkreis von ca. 25 km²⁰ der geplanten Baustelle Recyclingbetone anbietet, und zu untersuchen, welche Eigenschaften die angebotenen Betonsorten aufweisen. Im Rahmen der Projektierung gilt es, die effektiven Betoneigenschaften des eingesetzten Recyclingbetons zu berücksichtigen und die Bauteildimensionen auf Basis dieser Eigenschaften zu definieren. Anhand der aus den Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen resultierenden Bauteilabmessungen sowie auf Basis der Anforderungen der Bauherrschaft und des Architektenteams an das optische Erscheinungsbild ist es angebracht, objektspezifisch zu definieren, für welche Bauteile der Einsatz von Recyclingbetonen sinnvoll ist.

Für Sichtbetonbauteile sollen zudem in den frühen Projektphasen die relevanten Details festgelegt und nach Möglichkeit auch bereits Musterflächen angefertigt werden. Insbesondere sind minimale Bauteilstärken von mindestens 25 cm einzuhalten, analog zu Sichtbeton aus Primärbetonen. Kleine Aussparungen und Einlagen müssen vermieden werden,²¹ während horizontale, bewitterte Flächen nur bei niedrigen Ansprüchen hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit vorzusehen sind.

Die geringere Festigkeit und der reduzierte E-Modul von Recyclingbetonen wirkt sich positiv auf die Rissbildung im Beton aus. Es entstehen weniger Risse, und die Rissweite ist nicht gleich gross wie bei Primärbetonen. Dadurch ist der Einsatz von Recyclingbetonen auch für den Einsatz wasserdichter Betonbauteile («Weisse Wanne») geeignet.

4.4 Hinweise für die Submission

Die Eigenschaften von Recyclingbetonen, insbesondere der E-Modul sowie der RC-Anteil, sind für die Submission vorzugeben und in der Ausführungsphase auch zu kontrollieren. Mit der Submission muss abgefragt werden, bei welchem Betonwerk der Baumeister die Betone beziehen wird, weil nicht jedes Betonwerk mit den gleichen Anteilen von Recyclingmaterial operiert und die Betoneigenschaften sehr stark davon abhängen. Dabei müssen die Betone während der gesamten Bauzeit vom gleichen Betonwerk bezogen werden. Ebenso soll der Zementgehalt des eingesetzten Betons in der Submission bestimmt werden.

Die Ausschreibung eines Recyclingbetons als Beton nach Eigenschaften erfolgt mit dem Zusatz RC-C für Recyclingbeton mit Betongranulat oder RC-M für Recyclingbeton mit Mischgranulat.

Beurteilt werden die Recyclingbetoneigenschaften neben der Gesteinskörnungszusammensetzung anhand des mittleren Elastizitätsmoduls E_{rcm} und der mittleren Rohdichte ρ_{rcm} (Grundlage 11). Diese beiden Betoneigenschaften sind bei der Bestellung von Beton zusätzlich zu den grundlegenden Anforderungen an den Beton nach Eigenschaften nach der Norm SN EN 206 (Grundlage 13) festzulegen.

²⁰ Ökologisch Bauen – Merkblätter nach Baukostenplan BKP, eco-bau Nachhaltigkeit im öffentlichen Bau, Ausgabe 2008 (Grundlage 7)

²¹ Im Rahmen der Erstellung von Musterflächen gilt es zu prüfen, wie gross Aussparungen und Einlagen mit dem gewählten Beton minimal sein können, sodass das angestrebte Resultat bezüglich Ausbildung von Betonkanten noch erreicht werden kann.

Die Gehalte an R_c und R_b werden im Sortenverzeichnis aufgeführt. Sind in der Ausschreibung der Recyclingbetone höhere Gehalte an rezyklierten Körnern R_c als 25 M.-% gefordert, so sind diese gemäss der Kategorien der Norm SN EN 12620 (Grundlage 19) zu definieren. Falls höhere Gehalte an Körnern R_b als 5 M.-% gefordert werden, sind diese in 10-%-Schritten zu definieren (15, 25, ... M.-%).

Beispiel: Bezeichnung eines Recyclingbetons nach Eigenschaften für eine tragende Aussenwand:

Grundlegende Anforderungen:

- Beton nach SN EN 206
- C30/37
- XC4(CH)
- Dmax 32
- Cl 0,10
- C3

Zusätzliche Anforderungen:

- RC-C
- E-Modul $> 25'000 \text{ N/mm}^2$
- Zementart: ZN/D oder glw.
- $R_c + R_b \geq 40 \text{ M.-%}$

4.5 Hinweise für die Ausführung

Es gilt zu beachten, dass Betonkanten beim Ausschalen ein erhöhtes Risiko des Ausbrechens bergen. Um dieses Risiko zu minimieren, sollen (Sicht-)Betonbauteile aus Recyclingbeton länger eingeschalt bleiben. Bei der PHTG wurden die Wände gemäss Aussage von Stefan Luginbühl, Stutz AG Bauunternehmung, nach zwei Tagen ausgeschalt. Dabei ist zu erwähnen, dass die Betonarbeiten beim genannten Objekt vorwiegend im Frühjahr und Sommer ausgeführt wurden. Während des Winters sollten die Bauteile je nach Temperatur ein bis zwei Tage länger eingeschalt belassen werden. Wäre bei der PHTG nicht ein langsam abbindender Modero-Zement verwendet worden, hätte der Baumeister die Wände bereits nach einem Tag ausgeschalt. Aussparungen und Einlagen sollen, wenn möglich, konisch ausgebildet sein, sodass diese besser entfernt werden können. Eine gute, ausreichend lange Betonnachbehandlung²² ist zwingend.

Ansonsten kann die Verarbeitung von Recyclingbetonen auf der Baustelle mit jener von Primärbetonen verglichen werden.

Es ist empfehlenswert, für Sichtbetonbauteile zu Beginn der Ausführung repräsentative Referenzflächen zu fertigen.

Grundsätzlich sind alle Schalungstypen für die Herstellung von Bauteilen aus Recyclingbetonen geeignet. Mit einer «saugenden» Schaloberfläche ist es wie bei den Primärbetonen einfacher, eine die Anforderungen erfüllende Betonoberfläche zu erzielen, als mit einer dichten Schaloberfläche. Bei sehr dichten Schalungen folgt daraus, dass überschüssiges Wasser an der Oberfläche kaum in die Schalung eindringen und damit zu Wolkenbildung führen kann. Ebenfalls führen verschiedene Schalungsöle zu unterschiedlichen Resultaten des Erscheinungsbildes der Betonoberflächen, analog zum Einsatz bei Primärbetonen.

²² Die Art (Abb. 2.14.7) und die Dauer der Nachbehandlung richten sich vorwiegend nach den herrschenden Witterungsbedingungen, der Festigkeitsentwicklung des Betons und den zu schützenden Bauteilen (Geometrie des Bauteils) sowie nach den örtlichen Möglichkeiten. Über die Dauer der Nachbehandlung orientieren die Produktinformationen der Holcim Zement-Dokumentation. (Quelle: Grundlage 15)

4.6 Hinweise zu den Kosten

Für den Bauherrn resultieren keine Mehrkosten aus dem Einsatz von Recyclingbetonen verglichen mit dem Einsatz von Primärbetonen. Die höheren Herstellungskosten der Recyclingbetone infolge der Aufbereitung des Abbruchmaterials werden kompensiert durch die Entsorgungsgebühren, die bei der Anlieferung von Abbruchmaterial in das Betonwerk bezahlt werden müssen. So können die Betonlieferfirmen Recyclingbetone zu den gleichen Konditionen anbieten wie vergleichbare Primärbetone.

Gemäss der Aussage von Baumeistern wird auch bei der Kalkulation nicht zwischen Bauteilen aus Primärbetonen und solchen aus Recyclingbetonen unterschieden, es gibt insofern auch keine Kostendifferenzen bei der Ausführung der Baumeisterarbeiten. Einzig bei Sichtbetonbauten ist gegebenenfalls mit einem leicht höheren Aufwand für die Betonkosmetik zu rechnen.

4.7 Hinweise zur Ökologie

Mit dem Einsatz von Recyclingbetonen kann Bauabbruchmaterial wieder in den Stoffkreislauf integriert werden, sodass Deponieraum eingespart und Kiesabbau reduziert wird. Dank einer guten Aufbereitung des Abbruchmaterials durch Waschen der Komponenten und Ausschwemmen der Feianteile muss auch nicht mit einem höheren Zementgehalt als bei Primärbetonen operiert werden. Daher ist der Einsatz von Recyclingbetonen aus ökologischer Sicht zweifellos sinnvoll und sollte bei jedem Bauprojekt entsprechend ins Auge gefasst werden.

Einzig für hochbeanspruchte, weitgespannte Bauteile ist der Einsatz von Recyclingbetonen auch aus ökologischer Sicht zu hinterfragen. Aufgrund der geringeren Festbetoneigenschaften der Recyclingbetone sind in diesem Fall unter Umständen grössere Bauteilstärken erforderlich. Dieses Mehrvolumen an Beton, das mehr Herstellungsenergie und ein höheres Transportausmass bedeutet, relativiert die ökologischen Vorteile der Recyclingbetone.

4.8 Fazit der Studienverfassenden

Die Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit nehmen auch in der Bauwirtschaft stetig zu. Die öffentlichen Bauherren haben bei der Erfüllung solcher Ansprüche eine gewisse Vorbildfunktion. Bei Betonbauten kann der Forderung eines nachhaltigen Bauens mit dem Einsatz von Recyclingbetonen nachgekommen werden.

Dank der Weiterentwicklung der Recyclingbetone in den vergangenen Jahren weisen diese nahezu die gleichen Eigenschaften auf wie vergleichbare Primärbetone, zumindest bei Betonen mit minimalen Anteilen von Recyclingkomponenten. Durch die Steuerung des Gehalts der Recyclingkomponenten kann den objekt- und bauteilspezifisch geforderten Eigenschaften Rechnung getragen werden. Der Einsatz von Recyclingbetonen sollte daher bei jedem Objekt geprüft werden und überall dort zum Zug kommen, wo dies technisch sinnvoll und möglich ist. Beim Erweiterungsbau der PHTG wurde dies exemplarisch realisiert. Mit Ausnahme der weitgespannten Geschossdecken, die aufgrund der objektspezifischen Rahmenbedingungen mit minimalen Bauteilabmessungen realisiert werden mussten, wurden für alle Betonbauteile Recyclingbetone eingesetzt.

Wir empfehlen den Bauherren, im Rahmen der Projektdefinition und des Projektpflichtenhefts den Einsatz von Recyclingbetonen zur Prüfung vorzugeben und damit das Planungsteam ab den ersten Projektphasen aufzufordern, den möglichen Einsatz von Recyclingbetonen zu berücksichtigen.

Anhang

Grundlagen²³

- 1 Departement für Bau und Umwelt Thurgau: Konzept für den Einsatz von Recyclingmaterial im Hoch- und Tiefbau (2019 bis 2023)
- 2 Kantonales Hochbauamt Thurgau, R. Ledergerber: Empfehlung zum Einsatz von Recyclingbeton, Studie im Auftrag des Kantonalen Hochbauamtes Thurgau
- 3 Begehung der Pädagogischen Hochschule Thurgau mit den Teilnehmern Roland Ledergerber (Kantonales Hochbauamt Thurgau) und Christoph Nay (Dr. Deuring + Oehninger AG)
- 4 Dr. Deuring + Oehninger AG: Empfehlung zum Einsatz von Recyclingbeton im Hochbau – Vorgehensvorschlag, 14. April 2020
- 5 Erweiterungsbau der Pädagogischen Hochschule Thurgau – Interviews mit den am Bau Beteiligten; Teilnehmer: Beat Consoni, Philipp Hubatka, Stefan Luginbühl, Urs Hofer, Christoph Nay (Anhang)
- 6 Beton aus recycelter Gesteinskörnung, KBOB Empfehlung 2007/2, Stand Februar 2012
- 7 Ökologisch Bauen – Merkblätter nach Baukostenplan BKP, eco-bau Nachhaltigkeit im öffentlichen Bau, Ausgabe 2008
- 8 C. Hoffmann: Recyclingbeton zwischen Ökologie und Qualität, tec21 3-4/2005
- 9 Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern: Bauabfälle in der Schweiz – Hochbau, Studie 2015, Schlussbericht, Zürich, 28. September 2015
- 10 Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern: Bauabfälle in der Schweiz – Tiefbau. Aktualisierung 2015, Schlussbericht, Zürich, Mai 2016
- 11 SIA: Merkblatt SIA 2030, Recyclingbeton, 2010
- 12 SN EN 933-11+AC:2009;SN 670 902-11-NA, SN 670 902-11-NA, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung, 2009
- 13 SN EN 206:2013+A1:2016, Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Konformität, 2016
- 14 SIA: Merkblatt SIA 2049, Anforderungen an neue Zemente, 2014
- 15 Holcim (Schweiz) AG: Betonpraxis, 2014
- 16 C. Hoffmann: Recyclingbeton, Wissenswertes für die Anwenderseite, Forschungsergebnisse der Empa, SBJ 3/05 – Schweizer Baujournal, 2005
- 17 S. Schubert, C. Hoffmann: Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat, ASTRA-Forschungsauftrag AGB 25/02; Bericht 645, 2010.
- 18 S. Schubert, C. Hoffmann: Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Mischgranulat, cemsuisse Bericht 2602, 2011
- 19 SN EN 12620, SN EN 12620:2002+A1:2008, Gesteinskörnungen für Beton, 2008
- 20 SN EN 1097-6:2014-04;SN 670903-6:2014-04, SN 670903-6:2014-04, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, 2014
- 21 C. Hoffmann, A. Leemann: Recyclingbeton – aktuelle Erfahrungen und neuste technische Erkenntnisse, Präsentation, 15. Holcim Betontagung, 9. September 2009
- 22 A. Kenel: Durchstanzen von Recyclingbetonplatten. YES Young Engineers Symposium 2018, Hochschule Luzern, 4. Oktober 2018
- 23 Holcim (Schweiz) AG: Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton, Forschungsbericht, ISBN 978-3-9523727-0-8, 2010
- 24 SN EN 197-1: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Zürich 2011

²³ Es gibt zahlreiche Grundlagen (Forschungsergebnisse, Merkblätter und dergleichen) zum Thema Recyclingbeton, die als Basis zur Erarbeitung der Studie beigezogen wurden. Hier sind nur die wesentlichsten Grundlagen aufgeführt.

Abbildungs- und Quellenverzeichnis

1	Der Weg des Betons vom Rückbau bis zur stofflichen Verwertung oder Deponierung. Die Prozentangaben beziehen sich jeweils auf den Prozess links des Pfeils. Die durchschnittlichen Transportwege zwischen den Prozessen in der Schweiz sind jeweils in km angegeben.	3
2	Betongranulat (Quelle: Grundlage 15)	7
3	Mischgranulat (Quelle: Grundlage 15)	7
4	Natürliche, gerundete Gesteinskörnung (Quelle: Grundlage 15)	7
5	Ofentrockene Rohdichte von rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung (Quelle: Grundlage 15)	9
6	Natürliches Gesteinskorn: Ansicht (Quelle: Grundlage 15)	9
7	Mikroskopische Aufnahme im UV-Licht. Dichte Gesteinskörner erscheinen im UV-Licht dunkel, hingegen der poröse Zementstein hell. (Quelle: Grundlage 15)	9
8	Rezykliertes Gesteinskorn: Ansicht (Quelle: Grundlage 15)	10
9	Mikroskopische Aufnahme im UV-Licht. Die hohe Porosität des Zementsteins innerhalb des rezyklierten Korns wird im UV-Licht durch die sehr helle Farbe deutlich sichtbar. Sie ist höher als diejenige des umgebenden Zementsteines. (Quelle: Grundlage 15)	10
10	Wasseraufnahme (W10) von rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnern unterschiedlicher Korngruppen in Abhängigkeit von der ofentrockenen Rohdichte. (Quelle: Grundlage 15)	10
11	Richtwerte der mittleren Kornfestigkeit von Betongranulat, Mischgranulat und natürlicher Gesteinskörnung. (Quelle: Grundlage 15)	11
12	Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung bei drei Betongranulatproben (Entnahmezeitraum der einzelnen Proben innerhalb von ca. drei Monaten). (Quelle: Grundlage 15)	11
13	Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung bei fünf Mischgranulatproben (Entnahmezeitraum der einzelnen Proben innerhalb von ca. vier Monaten). (Quelle: Grundlage 15)	12
14	Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom w/z-Wert für Recyclingbetone, hergestellt mit CEM II/B-M (T-LL) 42.5 (Optimo 4). (Quelle: Grundlage 15)	14
15	Richtwerte für den Anteil an rezyklierten Gesteinskörnern für unterschiedliche Recyclingbetone. (Quelle: Grundlage 15)	14
16	E-Modul in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen für Recyclingbeton RC-C und RC-M im Vergleich zu Normalbeton, hergestellt mit natürlicher Gesteinskörnung. (Quelle: Grundlage 15)	15
17	Gleichung E-Modul (Quelle: Grundlage 15)	16
18	Abschätzen des E-Moduls von Recyclingbeton gemäss Merkblatt SIA 2030, Seite 10-11, Ziffer 3.2. (Quelle: Grundlage 11)	17
19	Gleichung Schwindverhalten (Quelle: Grundlage 15)	17
20	Gleichung Kriechverhalten (Quelle: Grundlage 15)	18
21	Grenzwerte und Zusammensetzung der neuen Zemente in der Schweiz. Die Gehaltsangaben beziehen sich auf die Summe der Gehalte der Haupt- und Nebenbestandteile (in Massenprozent).	19
22	Fraktion von Mischgranulat zur Herstellung des zertifizierten CH-Portlandzement ZN/D 32,5 R. (Quelle: Grundlage 15)	19
23	Grundriss Ebene -1 (Quelle: Beat Consoni AG)	26
24	Grundriss Ebene 0 (Quelle: Beat Consoni AG)	26
25	Grundriss Ebene +1 (Quelle: Beat Consoni AG)	28
26	Längsschnitt L1 (Quelle: Beat Consoni AG)	29
27	Querschnitt Q1 (Quelle: Beat Consoni AG)	30
28	Querschnitt Q2 (Quelle: Beat Consoni AG)	30
29	Bei der PHTG eingesetzte Betonsorten, gegliedert nach Bauteilen (Quelle: Beat Consoni AG)	33
30	Preisliste RC-C-Beton (Quelle: Toggenburger AG, Preisliste 2020)	35
31	Preisliste Primärbeton (Quelle: Toggenburger AG, Preisliste 2020)	36
32	Einsatzgebiete von Recyclingbetonen (Quelle: Grundlage 11)	39
33	Einsatzgebiete von Recyclingbetonen (Quelle: Grundlage 15)	40

«Der Architekt formuliert die Anforderungen an das Schalungsbild, die Betonoberfläche und damit das Erscheinungsbild. Die technischen Anforderungen an den Recyclingbeton muss der Architekt dem Bauingenieur überlassen.»



Beat Consoni
Beat Consoni AG
Architekt

Worin bestand die Motivation, beim Erweiterungsbau der PHTG den Einsatz von Recyclingbeton zu planen?

Im Rahmen des Wettbewerbs wurde die Materialisierung in Abstimmung mit der Gebäudestruktur und der Nachbarschaft festgelegt. Unser Ziel war es, ein fugenloses, plastisches Gebäude zu realisieren, was praktisch nur mit Beton möglich ist. Im Wettbewerb war die Vertiefung noch nicht so intensiv, dass die Entscheidung zwischen Primärbeton und Recyclingbeton thematisiert wurde. Formal sollte sich das Strukturbild der Fassadenoberfläche des Neubaus von derjenigen des Bestands differenzieren.

Es war eine Vorgabe des Wettbewerbsprogramms, dass das Gebäude die Anforderungen des Minergie-Standards erfüllt. In diesem Zusammenhang hat der Kanton während der Weiterbearbeitung des Projekts die Möglichkeit des Recyclingbetons eingebracht. Dem Architektenteam waren die Eigenschaften des Recyclingbetons damals noch nicht eingehend bekannt, und wir gingen von einer Verwendung in eher nicht anspruchsvollen Bauteilen aus. Der Einsatz von

Recyclingbeton für ein Gebäude dieser Grössenordnung, Komplexität und Spannweiten wurde damals als nicht sinnvoll bis unmöglich erachtet.

Gemäss meiner Einschätzung hatte die damalige Haltung auch mit mangelnden Kenntnissen und Erfahrungen im Umgang mit Recyclingbeton zu tun. Auch war nicht klar, wie der Bauingenieur und der Baumeister auf die Idee reagieren würden, Recyclingbeton als Sichtbeton einzusetzen.

Nach dem Vorschlag des Kantons, die Variante mit Recyclingbeton zu untersuchen, haben wir uns mit Recyclingbeton beschäftigt und ein Produktionswerk besichtigt. Die Einsatzmöglichkeit wurde mit dem Bauingenieur und dem Baumeister besprochen. Dabei stellten wir fest, dass Recyclingbeton eine Möglichkeit für dieses Objekt darstellt. Entsprechend wurden erste Musterflächen mit unterschiedlichen Schalungsstrukturen realisiert. Für uns war das Bild absolut wichtig. Es wurde eine monolithische Lösung ohne Dilatationsfugen angestrebt.

Mir kommt das Erscheinungsbild des Recyclingbetons weicher vor als jenes des Primärbetons. Eventuell steht dies aber auch im Zusammenhang mit der rohen Bretterschalung; die Bretterschalung vermag besser zu kaschieren und verzeiht allfällige Fehlstellen eher. Möglicherweise trägt auch der verwendete Moderozement dazu bei.

Ein 1:1-Vergleich der Musterflächen mit der Tafelstruktur und mit der Bretterstruktur wurde nicht erstellt. Es wurden auch keine direkten Vergleichsmuster mit gleicher Schalung aus Recyclingbeton und Primärbeton angefertigt.

Bestanden Zweifel, Recyclingbeton auch für Sichtbetonbauteile zu verwenden?

Die Zweifel konnten durch die Erstellung der erwähnten Musterflächen zerstreut werden.

Bei welchen Bauteilen bestand die grösste Skepsis, Recyclingbeton einzusetzen?

Hier gilt es, zwischen den ästhetischen und den technischen Anforderungen zu unterscheiden. Bei den weitgespannten Bauteilen bestand eine gewisse Skepsis aus technischer Sicht, bei der Fassade aus ästhetischer Sicht. Die technischen Fragen mussten wir dem Bauingenieur überlassen. Bei der Fassade war uns der einheitliche Charakter wichtig. Wir wollten für alle Fassadenbereiche den gleichen Beton einsetzen – nicht einmal Recyclingbeton, einmal Primärbeton. Dies ist auch gelungen.

Gab es Bauteile, bei welchen Sie den Einsatz von Recyclingbeton verweigerten?

Aus meiner Perspektive konnte bei allen sichtbaren Betonbauteilen Recyclingbeton eingesetzt werden.

Sind Sie mit dem erreichten Resultat zufrieden? Gibt es etwas, das Sie stört?

Grundsätzlich bin ich mit dem Resultat zufrieden.

Manche Punkte führten zu «Unsicherheiten»: Bei vergleichbaren Objekten haben wir keine Fensterbänke ausgeführt. Bei der PHTG sind die horizontalen Flächen des materialmässig unterschiedlich zusammengesetzten Recyclingbetons mit einer Oberflächenbeschichtung versehen worden.

Beim Ausschalen gab es vor allem bei feinen Einlagen gewisse Probleme aufgrund der Brüchigkeit. Daher sollte beim Einsatz von Recyclingbeton auf kleine Einlagen und Aussparungen verzichtet werden. Ebenso ist mit einer grösseren Anzahl von Lunkern zu rechnen.

Wenn dasselbe Objekt ein zweites Mal ausgeführt werden könnte, würden Sie wieder die gleichen Bauteile in Recyclingbeton planen? Welche würden Sie nicht mehr in Recyclingbeton projektieren? Wo würden Sie aufgrund der gemachten Erfahrungen zusätzlich Recyclingbeton vorsehen?

Das Thema der Brüstungen und deren Abdeckungen wäre aus meiner Sicht vertiefter zu untersuchen. Wie sich der Recyclingbeton langfristig verhalten wird, kann ich aber nicht beurteilen.

Welche Punkte sind bei der Projektierung der Verwendung von Recyclingbeton aus Ihrer Sicht zu beachten?

Es können keine allgemeinen Regeln definiert werden; jedes Objekt stellt einen Prototyp dar. Wichtig ist die Zusammenarbeit zwischen der Bauherrschaft, dem Architektenteam, dem Bauingenieurteam und dem Baumeister. Es müssen alle am gleichen Strick ziehen. Die Arbeiten sind gemeinsam zu entwickeln und zu entscheiden. Aktuelle Techniken und Errungenschaften sollen in den Entwicklungsprozess einfließen, beurteilt und verarbeitet werden. Immer wieder nach neuen Lösungen zu suchen, ist aber auch mit einem entsprechenden Planungsaufwand verbunden.

Welche Punkte sind in der Ausschreibung beim Einsatz von Recyclingbeton zu beachten?

Das Architekturbüro formuliert die Anforderungen an das Schalungsbild, die Betonoberflächenklasse und damit das Erscheinungsbild. Die Formulierung der technischen Anforderungen an den Recyclingbeton muss man den Bauingenieuren überlassen. Zu beachten ist sicher der Aufwand für das Ausbessern der Lunkern und Kanten.

Hat der Einsatz von Recyclingbeton den Planungsaufwand des Architektenteams vergrößert?

Aufgrund der damaligen Unkenntnisse der Details von Recyclingbeton mussten wir uns intensiver mit dem Material befassen. Dieser Punkt stellte einen gewissen Mehraufwand dar. Ansonsten muss jedoch nicht von einem Mehraufwand bei der Planung gesprochen werden.

Welche Bauteile können oder sollten aus Ihrer Sicht nicht aus Recyclingbeton gefertigt werden?

Es gibt keine Bauteile, die nicht aus Recyclingbeton gefertigt werden könnten. Entscheidender sind die technischen Rahmenbedingungen betreffend Einsatzmöglichkeiten des Recyclingbetons. Diese sind aber durch die Bauingenieurfirma zu beurteilen.

Gibt es weitere Hinweise, die bei Objekten mit Recyclingbeton zu berücksichtigen sind?

Mich interessiert die Langzeitwirkung des Recyclingbetons bezüglich Verwitterung und dergleichen. Darüber kann ich zum heutigen Zeitpunkt noch kein Urteil bilden.

«Es gibt wenig Erfahrung über das Langzeitverhalten von Recyclingbeton, insbesondere wenn der Anteil von Recyclingmaterial sehr gross ist. Gerade in Bezug auf die Frost-Tausalz-Einwirkung und die Karbonatisierung sind die Erfahrungen gering.»



Philipp Hubatka
Bänziger Partner AG
Bauingenieur

Worin bestand die Motivation, bei diesem Objekt den Einsatz von Recyclingbeton zu planen?

Die Anforderungen an nachhaltiges Bauen wird seitens der Bauherrschaft, vor allem bei öffentlichen Bauherrschaften, laufend grösser. Bei Betonbauten kann dieser Forderung mit dem Einsatz von Recyclingbeton Rechnung getragen werden.

Haben Sie bereits bei anderen Objekten Recyclingbeton eingesetzt oder dessen Einsatz zumindest in Erwägung gezogen?

Vor dem Bau der PHTG verfügten wir über Erfahrungen mit Recyclingbeton bei untergeordneten Bauteilen (z.B. Magerbeton), bei denen auch Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat (RC-M) eingesetzt werden kann. Recyclingbeton für hochbeanspruchte Bauteile hatten wir zuvor noch nicht eingesetzt.

Bestanden Zweifel, Recyclingbeton auch für Sichtbetonbauteile einzusetzen?

Bei der Sichtbetonfassade stellte der tiefe E-Modul des Recyclingbetons einen Vorteil dar. Ursprünglich war geplant, die Fassade vorzuspannen, um das angestrebte monolithische Bild ohne Dilatationen zu erreichen. Im Rahmen der vertiefteren Projektierung wurde auf diese Vorspannung verzichtet. Der Bewehrungsgehalt wurde entsprechend erhöht.

Bei der Fassade wurden bis zu 25 m lange Etappen betoniert. Der Bauunternehmer wollte möglichst grosse und wenige Etappen realisieren. Wir haben dies rechnerisch geprüft. Neben dem tiefen E-Modul bot bei der PHTG auch der Bauablauf einen Vorteil. Die Fassade wurde vorgängig betoniert, weshalb keine Verbindung mit bereits betonierten Bauteilen bestand, sodass die Schwindverformungen praktisch zwangsfrei erfolgen konnten. Wäre eine Etappe misslungen, wäre zudem ein relativ einfacher Rückbau möglich gewesen, da keine Verbindung zu anderen Bauteilen bestand. Auf einen solchen Rückbau konnte aber verzichtet werden.

Es wurden keine Schwindprüfungen für diesen Beton durchgeführt.

Bei welchen Bauteilen bestand die grösste Skepsis, Recyclingbeton einzusetzen?

Gewählt wurden schlanke Deckenkonstruktionen. Diese Entscheidung ist in der Projektentwicklung getroffen worden, um die geforderte Raumhöhe zu erreichen und die Gesamtgebäudehöhe einzuhalten, wie sie durch die Denkmalpflege vorgeschrieben war.

Ein Stützenraster mit Betonflachdecken wurde umgesetzt, um beim Innenausbau grösstmögliche Flexibilität gewährleisten zu können. Bei den schlanken Bauteilen können Deformationen entstehen, die durch den geringeren E-Modul des Recyclingbetons gegenüber jenem des Primärbetons noch grösser ausfallen.

Die Bauingenieure sind darauf angewiesen, dass das Betonwerk den E-Modul auf Basis von Versuchen angeben kann, sodass nicht nur auf die Norm abgestellt werden muss, sondern gegebenenfalls den Berechnungen höhere Werte zugrunde gelegt werden können.

Die Grössenordnung der Deformationen war entscheidend zur Beurteilung, welche Bauteile in Recyclingbeton ausgeführt werden können. Bei den Sichtbetonbauteilen wurde zudem der Forderung des Architektenteams nach Einheitlichkeit entsprochen. Sämtliche Sichtbetonbauteile wurden in Recyclingbeton ausgeführt.

Die vorgespannten Betondecken wurden in Primärbeton ausgeführt. Im Bereich der Pausenhalle gibt es aber auch vorgespannte Sichtbetonbauteile. Es galt also einen Kompromiss zu finden zwischen der Anforderung des Bauingenieurs, hochbeanspruchte Bauteile in Primärbeton auszuführen, und dem Anspruch des Architekten an ein einheitliches Erscheinungsbild.

Die Stützen waren als vorfabrizierte Elemente ange-dacht; im Rahmen der Ausführungsplanung wurden diese dann aber auch in Recyclingbeton projektiert, um die Einheitlichkeit zu gewährleisten, was aber teilweise eine Vergrösserung des Stützenquerschnitts nach sich zog.

Gab es Bauteile, bei welchen Sie den Einsatz von Recyclingbeton verweigerten?

Es gab keine Bauteile, bei welchen wir den Einsatz von Recyclingbeton verweigerten. Es wurde aber bei allen Bauteilen geprüft, ob der Einsatz von Recyclingbeton sinnvoll ist und welche allfälligen Massnahmen damit verbunden waren, z.B. grössere Bauteilstärken. In Rücksprache mit dem Architekten wurde so definiert, welche Bauteile in Recyclingbeton und welche in Primärbeton ausgeführt wurden.

Sind Sie mit dem erreichten Resultat zufrieden? Gibt es etwas, das Sie stört?

Wir sind mit dem erreichten Resultat zufrieden.

Wenn dasselbe Objekt ein zweites Mal ausgeführt werden könnte, würden Sie die gleichen Bauteile in Recyclingbeton planen? Welche würden Sie nicht mehr in Recyclingbeton projektieren? Wo würden Sie aufgrund der gemachten Erfahrungen zusätzlich Recyclingbeton vorsehen?

Wir würden wieder die gleichen Bauteile in Recyclingbeton ausführen.

Welche Punkte sind bei der Projektierung der Verwendung von Recyclingbeton aus Ihrer Sicht zu beachten?

Das Team und insbesondere auch die Bauingenieure sollten sich bei einem Einsatz von Recyclingbeton frühzeitig mit den Grundlagen und Randbedingungen auseinandersetzen – am besten bereits in der Projektierung, nicht erst in der Submission. Dabei gilt es zu klären, welche Möglichkeiten der Markt bietet, denn Recyclingbeton ist nicht gleich Recyclingbeton. Die exakten Eigenschaften sind abzufragen und so früh wie möglich mit der Lieferfirma zu klären.

Welche Punkte sind in der Ausschreibung beim Einsatz von Recyclingbeton zu beachten?

Die Eigenschaften des Recyclingbetons sind klar zu definieren und später auch zu kontrollieren, so etwa der minimale oder maximale Anteil der Recyclingkomponenten, auch in Abhängigkeit des erforderlichen E-Moduls; die Definition des Recyclinganteils schränkt auch die Auswahl des Angebots ein.

Das Betonwerk, von dem das Bauunternehmen den Recyclingbeton beziehen wird, muss in der Submission abgefragt werden. Zudem soll sichergestellt sein, dass über die gesamte Bauzeit das gleiche Betonwerk gewählt wird. Ansonsten sind die Eigenschaften wie bei Primärbetonen zu beschreiben (Druckfestigkeit, Expositions-klasse etc.). Der Zementgehalt sollte in der Submission ebenfalls abgefragt werden.

Welche Punkte sind in der Ausführung beim Einsatz von Recyclingbeton zu beachten?

Aus meiner Sicht gibt es bei der Verarbeitung keine wesentlichen Unterschiede zwischen Primärbeton und Recyclingbeton.

Hat der Einsatz von Recyclingbeton Ihren Planungsaufwand vergrössert?

Ich stimme hier mit dem Architekten Beat Consoni überein, dass die Auseinandersetzung mit dem Material einen Mehraufwand mit sich brachte. In der Planung gab es jedoch keinen Mehraufwand.

Welche Bauteile können oder sollten aus Ihrer Sicht nicht aus Recyclingbeton gefertigt werden?

Grundsätzlich gibt es keine Bauteile, die nicht aus Recyclingbeton ausgeführt werden könnten. Die Dimensionierung hat natürlich unter Berücksichtigung der entsprechenden Betoneigenschaften zu erfolgen. Objektspezifisch gilt es dann zu entscheiden, ob der Einsatz von Recyclingbeton für das jeweilige Bauteil sinnvoll ist oder nicht.

Waren Ihnen die Eigenschaften von Recyclingbeton bereits bekannt oder mussten diese zuerst erforscht werden?

Wir hatten vor dem Bau der PHTG noch keine grossen Erfahrungen mit Recyclingbeton. Entsprechend mussten die Betoneigenschaften zuerst untersucht werden. Wir konnten uns aber zum Glück auf das Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton», Ausgabe 2010 sowie die Angaben des Betonwerks abstützen.

Gibt es noch Wissenslücken, was die Eigenschaften von Recyclingbeton anbelangt? Falls ja, welche?

Es gibt derzeit wenig Erfahrungen über das Langzeitverhalten von Recyclingbeton, insbesondere wenn der Anteil an Recyclingmaterial sehr gross ist. Bei kleinen Recyclinganteilen ist der Einfluss auch entsprechend gering. Ich spreche da vom Langzeitverhalten von E-Modul, Kriechverhalten, Rissbildung, Verhalten in verschiedenen Atmosphären (bewittert, Innenbereich, erdberührt) und weitere. Gerade in Bezug auf die Frost-Tausalz-Einwirkung oder die Karbonatisierung sind die Langzeiterfahrungen gering.

Wurde für einzelne Bauteile auch der Einsatz von RC-M geprüft oder war der Einsatz von Anfang an auf RC-C beschränkt? Falls ja, was waren die Gründe, weshalb der Einsatz von RC-M verworfen wurde? Falls nein, wieso wurde der Einsatz von RC-M nicht geprüft?

RC-M wurde beispielsweise bei Sauberkeitsschichten (Magerbeton) oder bei Negativbeton verwendet. Teilweise wurde auch Grabenaushub für Leitungen mit RC-M, also im Sinne von Recyclingkies, verwendet. Für die tragenden Betonkonstruktionen wurde aber auf den Einsatz verzichtet. Das hat verschiedene Gründe, drei davon sind:

– Die Auswirkungen auf die Sichtbetonqualität: Ein Mischabbruchgranulat enthält in der Regel einen grossen Anteil an Ziegelabbruch. Dieses kommt als rotes Granulat zum Vorschein und verändert den Charakter und das Aussehen des Sichtbetons. Zudem besteht das Risiko von Qualitätsunterschieden, Farbveränderungen oder Wolkenbildung, was bei Sichtbeton unerwünscht ist.

– Die Tragstruktur sollte möglichst dicht und widerstandsfähig sein, beispielsweise ist in erdberührten Bereichen eine wasserdichte Betonkonstruktion erstellt worden. Nach meinem Wissensstand gibt es keinen wasserdichten Beton mit Mischabbruchgranulat.

– Beton mit Mischabbruchgranulat ist für statische Einwirkungen wenig geeignet, weil der E-Modul noch kleiner ist als bei Betonabbruch. Für Bauteile, die nur auf Druck ausgelegt sind, wie Wände und Stützen, mag das einen untergeordneten Einfluss haben. Bei Bauteilen auf Biegung, wie Decken und Träger, hat dies wiederum zur Folge, dass grössere Verformungen stattfinden und entweder die Vorgaben nicht erfüllt werden können oder die Bauteile verstärkt werden müssen, was zu einem höheren Materialverbrauch führt. Ob dies mit dem Gedanken, die Ressourcen zu schonen, im Einklang ist, wage ich zu hinterfragen.

Stufen Sie die Dauerhaftigkeit von Bauteilen aus RC-C gleichwertig ein wie von jenen aus Primär-beton?

Diese Frage ist schwierig zu beantworten, zumal ich keine Forschung betreibe, sondern Planer bin. Wie bereits erwähnt, vermute ich, dass die Langzeitwirkung von Recyclingbetonen noch zu wenig erforscht ist und Wissenslücken bestehen. Grundsätzlich bin ich der Ansicht, dass die Dauerhaftigkeit nicht massgeblich anders sein kann. Die Frage könnte man noch ausweiten: Wie sieht es in 100 Jahren aus, wenn sich der Zyklus mehrere Male wiederholt und das Abbruchgranulat immer und immer wieder in den Prozess zurückgeführt wird?

Wie sind Sie mit den im Vergleich zu Primär-beton grösseren Verformungen bei Recyclingbeton umgegangen?

Die Deformationen wurden anhand des E-Moduls des eingesetzten Recyclingbetons ermittelt und die Bauteilabmessungen unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften dimensioniert.

Sind die Normvorgaben für den Einsatz von Recyclingbeton klar und ausreichend?

Ja. Für den «einfachen» Einsatz von Recyclingbeton sind diese genügend. Es ist zu vermerken, dass die Angaben der Herstellerfirmen genauso wichtig sind, denn wenn auf dem Markt kein Angebot besteht, dann nützen die normativen Vorgaben wenig. Für spezielle Bauteile mit erhöhten Anforderungen gibt es noch zu wenig Normvorgaben, für diese Anwendungen wären Voruntersuchungen anzuordnen. In der Regel sind solche Voruntersuchungen risikobehaftet und kostspielig und daher nicht unbedingt praxistauglich.

Sind die technischen Angaben der Betonlieferfirmen zu den Recyclingbetonen klar und ausreichend?

Im Fall der PHTG konnte die Betonlieferfirma die erforderlichen technischen Angaben zur Verfügung stellen.

Gibt es Einschränkungen bei der Verwendung von Recyclingbeton im Baugrund, für Bodenplatten und Aussenwände?

Aus meiner Sicht gibt es diesbezüglich keine allgemeingültigen Einschränkungen. Selbstverständlich ist der Einsatz objektspezifisch und unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen und Eigenschaften sauber zu prüfen.

Wurden bestehende Planungsgrundlagen wie beispielsweise eco-BKP als Ergänzung zum CRB für die Ausschreibung des Objekts genutzt?

Nein. Wenn ich mich zurückerinnere, dann war dies nie ein Thema, und ich könnte auch nicht sagen, warum nicht.

Bedarf es technischer Empfehlungen wie Merkblätter, um die Ausschreibung von Recyclingbeton sicher vornehmen zu können?

Das wäre bestimmt hilfreich, zumal der Anteil an Betonabbruchgranulat doch einen grossen Einfluss auf die Preisgestaltung haben kann. Auch in Bezug auf die Eigenschaften wäre es sicherlich von Vorteil, wenn es so etwas gäbe.

Wäre eine technische Wissensvermittlung in Form von Veranstaltungen oder Broschüren wünschenswert?

Da die Thematik in letzter Zeit doch an Bedeutung gewonnen hat, gibt es bereits Fachveranstaltungen, an denen über die neusten Erkenntnisse und Erfahrungen referiert wird. Auch Broschüren oder Angebote von Betonlieferfirmen sind vorhanden. Es braucht vielleicht beim einen oder anderen Ingenieurunternehmen einen kleinen Stups, um sich überhaupt mit dem Thema zu befassen.

Gibt es weitere Hinweise, die bei Objekten mit Recyclingbeton zu berücksichtigen sind?

Bei der PHTG wurde nur unterschieden zwischen Recyclingbeton und Primärbeton. Ich könnte mir vorstellen, künftig Recyclingbeton mit unterschiedlichen Eigenschaften bei einem Objekt einzusetzen, indem der Recyclinganteil abhängig von den statischen Anforderungen abgestuft wird.

«Beim Einsatz von Recyclingbeton besteht eine grössere Gefahr, dass Kanten beim Ausschalen brechen. Darauf kann reagiert werden, indem die Bauteile länger eingeschalt bleiben.»



Stefan Luginbühl
Stutz AG
Baumeister

Welche Punkte sind bei der Submission von Bauteilen in Recyclingbeton aus Ihrer Sicht zu beachten?

Wichtig ist, dass die Anforderungen genau definiert werden und dass der geforderte Recyclinganteil sowie der erforderliche E-Modul angegeben werden.

Wurde das ausführende Personal beim Bau der PHTG vorgängig von der Bauführung darüber informiert, dass Recyclingbeton anstatt eines konventionellen Betons verwendet wird? Wenn ja, bestanden Vorurteile oder Unsicherheiten im Umgang mit Recyclingbeton?

Das eingesetzte Personal stand dem Einsatz von Recyclingbeton sehr offen gegenüber. Natürlich ist der Baumeister gefordert zu überlegen, welche Equipe er für ein solches Objekt einsetzen will.

Bestanden Zweifel, Recyclingbeton auch für Sichtbetonbauteile einzusetzen?

Der eingesetzte Polier hatte grosse Erfahrungen bei der Realisierung von Sichtbetonbauteilen aus Primärbeton. Aufgrund dieser Erfahrungen kam auch der Vorschlag für die grossen Etappen bei der Sichtbetonfassade. Es war aber auch für uns ein gewisses Testen.

Können Sichtbetonbauteile in Recyclingbeton mit den gleichen Bauteilstärken projiziert werden wie solche aus Primärbeton oder gibt es bei der Verarbeitung Einschränkungen?

Sichtbauteile mit Recyclingbeton sollten mit Stärken > 25 cm, besser sogar 30 cm projiziert werden. Das gilt aber gleichermassen auch für Primärbeton. Für Sichtbetonbauteile empfehle ich einen Beton mit 0/16 Korn, unabhängig ob Recyclingbeton oder Primärbeton.

Bei welchen Bauteilen bestand die grösste Skepsis, Recyclingbeton einzusetzen?

Bei Sichtbetonbauteilen mit Bauteilstärken < 25 cm. Ich empfehle für Sichtbauteile Bauteilstärken \geq 25 cm, besser 30 cm vorzusehen.

Gab es Bauteile, bei welchen Sie den Einsatz von Recyclingbeton verweigerten?

Wir verweigerten bei keinen Bauteilen den Einsatz von Recyclingbeton.

Welche Punkte sind bei der Ausführung von Bauteilen in Recyclingbeton aus Ihrer Sicht zu beachten?

Beim Einsatz von Recyclingbeton besteht eine größere Gefahr, dass Kanten beim Ausschalen brechen. Darauf kann reagiert werden, indem die Bauteile länger eingeschalt bleiben. Aussparungen und Einlagen sollten nach Möglichkeit konisch ausgebildet werden, sodass diese besser entfernt werden können. Einer guten Nachbehandlung der Bauteile ist besondere Beachtung zu schenken. Die Verarbeitbarkeit des Recyclingbetons ist aber praktisch identisch wie jene des Primärbetons; die Schalung ist sauber vorzubereiten und zu wässern. Entscheidend ist das Handwerk des Poliers. Es sollten aber nicht zu schlanke Bauteile vorgesehen werden. Den Aufwand der Betonkosmetik stufen wir beim Recyclingbeton etwas höher ein als beim Primärbeton.

War es erforderlich, vorgängig ein Referenzbauteil baustellenseitig zu erstellen, um allfällige Besonderheiten im Umgang mit Recyclingbeton kennenzulernen?

Die Erstellung von Referenzflächen empfiehlt sich auf jeden Fall. Dabei sollte es sich nicht einfach um irgendeine Wand handeln, sondern es sollten Referenzflächen erstellt werden, bei welchen die analogen Details ausgebildet werden, wie diese später bei den Sichtbetonbauteilen geplant sind. Nur so ist es möglich, die Eigenschaften zu definieren und gemeinsam mit dem Bauherrn, dem Architektenteam und den Bauingenieuren anhand der Referenzbauteile zu beurteilen.

War die Ausführung aufgrund des Einsatzes von Recyclingbeton arbeitsintensiver?

Für den Baumeister resultiert durch den Einsatz von Recyclingbeton ein gewisser Mehraufwand. Dieser ist aber überschaubar.

War die Ausführung aufgrund des Einsatzes von Recyclingbeton teurer? Mit welcher Abweichung in Prozent ist durch den Einsatz von Recyclingbeton gegenüber Primärbeton zu rechnen?

Der Einsatz von Recyclingbeton resultiert für den Baumeister in einem leicht höheren Aufwand im Vergleich zum Einsatz von Primärbeton. In der Regel wird aber bei der Kalkulation nicht zwischen Primär- und Recyclingbeton unterschieden. Für die Bauherrschaft resultieren keine Mehrkosten durch den Einsatz von Recyclingbeton.

Sind Sie mit dem erreichten Resultat bei der PHTG zufrieden? Gibt es etwas, das Sie stört?

Wir stufen das Resultat als sehr gelungen ein.

Wenn dasselbe Objekt ein zweites Mal ausgeführt werden könnte, würden Sie wieder die gleichen Bauteile in Recyclingbeton zur Ausführung empfehlen? Welche würden Sie nicht mehr in Recyclingbeton projektieren? Wo würden Sie aufgrund der gemachten Erfahrungen zusätzlich Recyclingbeton empfehlen?

Wir würden das Objekt wieder gleich umsetzen.

Welche Bauteile können oder sollten aus Ihrer Sicht nicht aus Recyclingbeton gefertigt werden?

Aus meiner Sicht gibt es keine Bauteile, die nicht aus Recyclingbeton ausgeführt werden können. Es gilt aber die vorherigen Hinweise bezüglich Schlankheit und Einlagen zu berücksichtigen.

Wie schätzen Sie die Kenntnisse im Umgang mit Recyclingbeton im Allgemeinen ein? Besteht ein Bedarf an technischer Wissensvermittlung in Form von Veranstaltungen oder Broschüren?

Veranstaltungen und Broschüren halten wir nicht zwingend für erforderlich. Eine Broschüre für Planerinnen und Planer wäre eventuell sinnvoll.

Gibt es weitere Hinweise, die bei Objekten mit Recyclingbeton zu berücksichtigen sind?

Bei Sichtbetonbauteilen ist die Bemusterung sehr wichtig, ebenso der Schutz der Brüstungen mit Flüssigkunststoff sowie der vertikalen Bauteile mit einer Tiefenhydrophobierung.

«Das Schliessen des Stoffkreislaufs war eine Hauptmotivation, in die Recyclingbeton-Produktion einzusteigen.»



Urs Hofer
Betonexperte/Verkaufsleiter
Möckli Beton AG

Führen Sie Muster, die für gleiche Schalungen einmal in Recyclingbeton und einmal in Primärbeton gefertigt wurden, um einen direkten Vergleich der Oberflächeneigenschaften aufzuzeigen?

Nein, solche Muster wurden bislang nicht hergestellt. Möckli Beton hat den Recyclingbeton seit sieben Jahren im Programm. In dieser Zeit wurden verschiedene Objekte mit unterschiedlichen Schalungssystemen erstellt und auch Objekte, die nicht als Sichtbetonbauten projiziert waren. Die weicher wirkende Oberfläche beim Erweiterungsbau der PHTG ist wohl auf die Schalung sowie den helleren Modero-Zement und die teilweise sehr gute Beleuchtung der Räume zurückzuführen.

Welche Punkte sind bei der Submission von Bauteilen in Recyclingbeton aus Ihrer Sicht zu beachten?

Die Hersteller sind verpflichtet, in ihrem Angebotskatalog den E-Modul der Produkte anzugeben. Grundsätzlich: Je höher der Anteil der Recyclingkomponenten ist, desto tiefer liegt der E-Modul des Betons. Würde Möckli Beton einen Recyclingbeton mit dem minimal geforderten Anteil von Recyclingkomponenten anbieten, würde ein E-Modul von 30'000 bis 32'000 N/mm² erreicht. Möckli Beton setzt aber auf einen Recyclinganteil > 65 % (70 bis 100 %). Bei diesem Beton liegt der mittlere E-Modul bei 25'000 N/mm². Dank diesem hohen Recyclinganteil ist unser Novo-Con-Beton aber nachhaltiger. Es sollte nur gewaschenes Material verwendet werden. Dies kann aber nicht direkt gefordert werden. Es kann aber über die Definition des Recyclinggehalts gesteuert werden. Wird ein Recyclinggehalt von über 60 % gefordert, kann dies nur mit gewaschenem Material erreicht werden.

Bestanden vor Ausführung der PHTG bereits Erfahrungen in der Herstellung von Recyclingbeton?

Ja, Möckli Beton stellt bereits seit sieben Jahren Recyclingbeton her.

Wie wird der Bezug von Rückbaumaterial und aufbereiteter rezyklierter Gesteinskörnung in ausreichender Menge und normkonformer Qualität sichergestellt? Sind Sie hinsichtlich Recycling in der Wertschöpfungskette selbst tätig, beispielsweise als Rückbauer oder Aufbereiter?

Als Rückbauer nein, als Aufbereiter ja. Möckli Beton nimmt selber Abbruchmaterial entgegen und bereitet dieses so auf, dass es für NovoCon-Beton RC-C und RC-M verwendet werden kann.

Welche betontechnologischen Besonderheiten waren im Vergleich zu Primärbeton zu gewährleisten, um Konstruktionsbeton mit den ausgeschriebenen Anforderungen herstellen zu können? War zum Beispiel die Bereitstellung von Einzelfraktionen statt eines Korngemischs der rezyklierten Gesteinskörnung erforderlich?

Zur Herstellung von NovoCon-Beton wird bei Möckli Beton ausschliesslich mit gewaschenen und sortierten Einzelkomponenten gearbeitet. Backsteine werden mittels optischem Sortierverfahren von Betonteilen getrennt. Beim Erweiterungsbau der PHTG wurde auf Standardrezepturen des NovoCon-Konstruktionsbetons zurückgegriffen. Einzig beim Zement wurde aufgrund der architektonischen Anforderungen von Optimo zu Modero gewechselt.

Beeinflusste die Herstellung des Recyclingbetons die werkseitige Betonproduktion in dieser Zeit, etwa durch eine geringere Produktionsmenge der konventionellen Betone aufgrund allfälliger längerer Mischzeiten des Recyclingbetons oder erhöhter Anzahl an werkseitigen Frischbetonprüfungen?

Nein. NovoCon-Beton gehört bei Möckli Beton zum Tagesgeschäft. Zwischen 50 % und 60 % des bei Möckli Beton produzierten Betons besteht aus NovoCon-Produkten.

Wurde ein zusätzliches Qualitätssicherungskonzept für den Zeitraum der Herstellung des Recyclingbetons eingeführt, um die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften sicherzustellen?

Möckli Beton stellt standardmässig Recyclingbeton her und führt die erforderlichen Prüfungen entsprechend der technischen Vorgaben laufend durch. Für die PHTG war entsprechend kein zusätzliches Qualitätssicherungskonzept erforderlich.

Generiert das Angebot von Recyclingbeton einen Wettbewerbsvorteil im Vergleich zur Konkurrenz?

Diese Frage kann man sicher und zunehmend mit Ja beantworten. Die Nachfrage nach nachhaltigen Produkten nimmt tendenziell zu. Möckli Beton hat sich für ein hochwertiges Aufbereitungsverfahren entschieden und verfügt bereits über mehrjährige Produktionserfahrung.

Ist aufgrund der fachlichen Kompetenz, Recyclingbeton herstellen und anbieten zu können, ein positiver Effekt auf die Reputation der Firma erkennbar?

Die Reputation des Unternehmens Möckli Beton AG profitiert sicher vom hochwertigen NovoCon-Image. Der Begriff Recycling klingt leider in der Wahrnehmung vieler nicht Detailkundiger eher etwas abschreckend, weshalb man sich für den Brand NovoCon entschieden hat.

Bestanden Zweifel, Recyclingbeton auch für Sichtbetonbauteile einzusetzen?

Nein, es bestanden diesbezüglich keine Zweifel.

Wie ist das Verhältnis der Kosten von Primärbeton zu Recyclingbeton und warum gibt es Unterschiede?

In der Produktion entstehen Zusatzkosten infolge des Brech-, Sortier- und Waschprozesses sowie durch die Wiederverwendung von schwierig verwertbaren Komponenten im Zementwerk oder durch die Entsorgung in der KVA, auf einer Innerstoff- oder Reaktordeponie, je nach Belastung des Materials. Dadurch resultieren Mehrkosten von ca. 40 bis 50 Franken pro Kubikmeter Beton. Die Zementindustrie kann in der Zwischenzeit aber die ausgewaschenen Feinstkomponenten als Rohmehlersatz in die Produktion einfliessen lassen. Auf der anderen Seite erhält die Produktionsfirma Entsorgungsgebühren für das Abbruchmaterial. Möckli Beton bietet Primär- und Recyclingbeton zu gleichen Konditionen an.

Aus welchem Umkreis wird Ihnen das Abbruchmaterial für die Herstellung von Recyclingbeton geliefert?

Das Abbruchmaterial stammt hauptsächlich aus den Kantonen Thurgau, Zürich, St.Gallen und Schaffhausen. Das Material wird ausschliesslich mittels Gegenfuhren zur Aufbereitung in Eschenz geführt.

Wie stufen Sie die Ökobilanz von Recyclingbeton gegenüber Primärbeton ein?

Da möchte ich zunächst auf die von der Energie- und Ressourcen-Management GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC erhobene Ökobilanz hinweisen (siehe Seite 62). Zudem gilt es, mit der Mär vom höheren Zementanspruch des Recyclingbetons aufzuräumen. Die Aufbereitung der Recyclingkomponenten ist analog zum Wandkies entscheidend. Möckli Beton wäscht die Recyclingkomponenten, sodass nicht gewünschte Feinstanteile ausgewaschen werden.

Deshalb muss bei der Verwendung von gewaschenen Komponenten nicht mit einem höheren Zementgehalt als beim Primärbeton operiert werden. Ebenso ist es wichtig, dass der Recyclinganteil thematisiert wird. Der Recyclinganteil sollte möglichst hoch gehalten werden. Herstellerfirmen mit einfacher Aufbereitung ohne Wasch- und Sortierprozess scheiden so aus dem Wettbewerb, dafür steigen Qualität und Image des Recyclingprodukts Beton. Die Menge der Zusatzmittel im NovoCon-Konstruktionsbeton ist sehr gering (ca. 1.0 bis 1.5 kg pro m³ mehr als bei Primärbeton). Zudem werden nur Zusatzmittel mit FSHBZ-Gütesiegel verwendet.

Wird dank dem Einsatz von Recyclingbeton graue Energie eingespart?

Die Treibhausgasemissionen werden mit NovoCon-Beton nur leicht reduziert, gemäss UMTEC-Ökobilanz ca. 3 bis 4 %. Der Stoffkreislauf kann jedoch zu über 99 % geschlossen werden. Dies ergibt laut UMTEC eine Reduktion der Umweltbelastung um bis zu 33 %.

Besteht die Motivation, Recyclingbeton zu produzieren, in erster Linie darin, Landressourcen zu schonen?

Das Schliessen des Stoffkreislaufs war eine Hauptmotivation, in die Recyclingproduktion einzusteigen. Die Schonung der Ressourcen geht damit natürlich einher.

Welche Punkte sind beim Transport von Recyclingbeton aus Ihrer Sicht besonders zu beachten?

Das Saugverhalten der Recyclinggesteinskörnungen wird bei der Herstellung über die Rezeptur berücksichtigt. Beim Transport sind keine besonderen Massnahmen notwendig.

Gibt es Hinweise zur Nutzung als Kran- oder als Pumpbeton?

NovoCon-Konstruktionsbeton kann als Kran- wie als Pumpbeton verwendet werden.

Welche Punkte sind bei der Verarbeitung von Recyclingbeton zu beachten?

Aus meiner Sicht sind grundsätzlich alle Schalungstypen für die Herstellung von Bauteilen aus Recyclingbeton geeignet. Für die Verarbeitung zu Sichtbeton empfiehlt sich eine sehr plastische Konsistenz. Wichtig ist, dass der Beton trotz dieser plastischen Konsistenz gleich intensiv verdichtet wird wie ein Primärbeton in Regelkonsistenz, da Recyclingbeton eher zu Lunkernbildung neigt, was auf dessen grösseren Luftporenanteil zurückzuführen ist. Mit einer «saugenden» Schaloberfläche ist es einfacher, eine schöne Betonoberfläche zu erzielen, als mit «dichten» Schaloberflächen. Trennmittel können ebenfalls zu unterschiedlichen Resultaten des Erscheinungsbildes der Betonoberflächen führen. Der Recyclingbeton ist weicher als der Primärbeton. Zudem wurde bei der PHTG mit Modero-Zement gearbeitet, der deutlich weniger schnell abbindet. Darum ist beim Ausschalen grössere Vorsicht geboten, die Bauteile sind entsprechend länger eingeschalt zu belassen. Bei Recyclingbeton mit einem hohen Recyclinganteil wird mit einem Stabilisierer gearbeitet. Dessen Dosierung ist temperaturabhängig. Damit kann eine einwandfreie Verarbeitung gewährleistet werden.

Welche Bauteile können oder sollten aus Ihrer Sicht nicht aus Recyclingbeton gefertigt werden? Welche Expositionsklassen können mit Recyclingbeton nicht erfüllt werden?

Aus meiner Sicht gibt es keine allgemeingültigen Einschränkungen, dass Bauteile nicht aus Recyclingbeton gefertigt werden können. Bei der Projektierung sind natürlich jeweils die entsprechenden Materialeigenschaften zu berücksichtigen.

Gibt es weitere Hinweise, die bei Objekten mit Recyclingbeton zu berücksichtigen sind?

Recyclingbeton ist ideal geeignet auch für den Einsatz von wasserdichten Betonbauteilen, da infolge des tieferen E-Moduls eine geringere Rissanfälligkeit besteht.

Möckli Beton stellt eine Zunahme der Nachfrage nach NovoCon-Recyclingbeton fest. Anfänglich wurde die Nachfrage mittels preislicher Anreize gefördert. Seit 2017/2018 bietet Möckli Beton keine «Subventionen» beim Recyclingbeton mehr an. In der Zwischenzeit hat sich der «Greta-Effekt» bemerkbar gemacht. Architekturbüros zeigen vermehrt Interesse, Recyclingbeton zu verwenden. Wir stellen fest, dass die grösste Skepsis für den Einsatz von Recyclingbeton in der Regel bei den Bauingenieurfirmen liegt. Ich führe dies auf die Tatsache zurück, dass die Bauingenieure in der Verantwortung für das Betontragwerk stehen, durch den Einsatz von Recyclingbeton einen gewissen Mehraufwand haben, da sie sich mit diesem Material befassen müssen, und auch ein grösseres Risiko tragen, deswegen aber kein grösseres Honorar bekommen. Die Bauherren sollten bereit sein, diesen Mehraufwand bei der Projektierung zu entschädigen.



ZUVERLÄSSIG SEIT 1933.

Faktenblatt Ökologie NovoCon

PROJEKTTEAM

Energie- und Ressourcen-Management GmbH

Dr. Stefan Rubli von der Energie- und Ressourcen-Management GmbH verfügt im Ressourcenmanagement von Baustoffen, im Speziellen in der Durchführung von Materialflussanalysen von Aufbereitungsanlagen im Baubereich, über langjährige Erfahrung. Er hat die Datenerhebung der In- und Outputflüsse vorgenommen, die Materialflussanalyse erstellt und plausibilisiert. Sie dient als Grundlage für die Ökobilanzierung.

Hochschule für Technik Rapperswil HSR Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC

Thomas Pohl ist Geschäftsführer vom UMTEC und Ökobilanzspezialist der HSR. Er greift auf eine langjährige Erfahrung in der Erstellung von Umweltbilanzen im Bereich der Abfalltechnik und Recycling in angewandten Forschungsprojekten zurück. Das UMTEC verfügt über ausgewiesene Kompetenz in den Bereichen Abfallwirtschaft und Ökobilanzierung von Rohstoffkreisläufen.

www.energie-ressourcen.ch www.umtec.ch/www.hsr.ch

Rahmenbedingungen Ökobilanz

- Funktionale Einheit: Produktion von 1m3 Konstruktionsbeton
- Systemgrenze: «Cradle-to-Gate» -> von der Ressourcengewinnung bis zum Werkstar
- Datengrundlage: Massenflussanalyse von Dr. Stefan Rubli mit Bezugsjahr 2018
- Verwendete Umweltdatenbank: Ecoinvent 3.8 Cut-off-Prozesse
- Umweltbilanzmethoden: Methode der ökologischen Knappheit 2013 (UBP-Methode) und Treibhausgasemissionen
- Multi-Output-Prozess-Allokation: Allokation nach Massenflüsse

Bezeichnet Konstruktionsbeton	Primäre ÖP Konstruktionsbeton	ÖP Konstruktionsbeton (inkl. 32% RC)	Rezykliertes Konstruktionsbeton (inkl. 65% RC)
RC-Gehalt [%]	0	32%	65%
RC-Konzentrationsfaktor [kg/m³]	0	465	2 913
Schicht [cm]	2,40	2,40	2,40
Zementgehalt [kg/m³]	302	302	302
Bestandteil	OPH-30-M1	OPH-30-M1	OPH-30-M1
Quelle/Erzeugerangabe	Fahrner-Industrie "Ökobilanz: Nachhaltige Baustoffherstellung für Beton"	Fahrner-Industrie "Ökobilanz: Nachhaltige Baustoffherstellung für Beton"	Beton-Werkstoff und Beton-AG

LINK: https://www.fahrner-industrie.ch/dam/oc/document/_/_/publikationen/opus/04/04_04_02_01_01.pdf

Methode Ökobilanz

Methode der ökologischen Knappheit (UBP-Methode)

Diese Ökobilanzmethode wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer einzigen Kenngröße (Umweltbelastungspunkte) zusammenzufassen. Es handelt sich um eine Ökobilanzmethode, bei der neben den bereits bestehenden Belastungen der umweltspezifischen Ziele der Schweiz berücksichtigt werden. Je grösser die Umweltbelastung eines Produktes ist, desto mehr Umweltbelastungspunkte erzeugt seine Bewertung. Diese Ökobilanzierungsmethode beruht auf dem Vergleich der aktuellen Belastung der Umwelt (aktueller Fluss, „Ist-Menge“) mit der gesellschaftspolitisch als zulässig angesehenen Belastung (kritischer Fluss, „Toleranzmenge“). Das Verhältnis von aktuellem zu kritischem Fluss resp. der „Ist-Menge“ zur „Toleranzmenge“ wird als ökologische Knappheit bezeichnet. Diese Methode wird auch Umweltbelastungspunkte-Methode (kurz UB-P-Methode) genannt. Denn diese Ökobilanzierungsmethode berücksichtigt eine grosse Anzahl an Wirkungskategorien, welche anhand einer Gewichtung, basierend auf politischen Zielen der Schweizer Umweltschutzgesetzgebung abgeleitet, ein gesamtgewichtetes eindimensionales Ergebnis in der Einheit UB-P liefert. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt auch besonders hilfreich als Entscheidungsgrundlage in verschiedenen Geschäftsbereichen privatswirtschaftlicher Unternehmen.

Treibhausgasemissionen

Diese Umweltwirkungskategorie berücksichtigt vor allem klimaschutzrelevante Emissionen eines Produktes oder Prozesses über den gesamten Lebenszyklus. Die Bewertung wird anhand eines Charakterisierungsfaktors in kg CO₂-Äquivalente vorgenommen. Diese Methode wird im angrenzenden Zustand häufig verwendet. Schadensfissionen lassen sich mit dieser Methode nur ungenügend abbilden.

Resultate Ökobilanz

Abb. 1 zeigt das Resultat der Ökobilanz mittels UB-P-Methode für zwei Referenzbetone (Seite 1 und 2) aus der Literatur (Bericht von Holcim: «Ökobilanz rezyklierter Gesteinskörnung für Betone») und für den NovoCon Konstruktionsbeton der Firma Möckli Beton AG (Seite 3). Der NovoCon Konstruktionsbeton der Firma Möckli Beton AG scheidet in der Ökobilanz bei einem RC-Anteil von 65% ein Viertel besser ab als der Primärkonstruktionsbeton aus der Literatur. Liegt der RC-Gehalt der Gesteinskörnung bei 100% so scheidet die Ökobilanz des NovoCon Konstruktionsbetons sogar ein Drittel besser ab als der Primärkonstruktionsbeton aus der Literatur.

Ebenfalls zeigt die Ökobilanz, dass RC-Beton nicht gleich RC-Beton ist. Denn die zweite Säule in Abb. 1 welche den RC-Beton aus der Literatur darstellt, scheidet ökologisch deutlich nachteiliger ab als der NovoCon Konstruktionsbeton von Möckli Beton AG. Die rezyklierte Gesteinskörnung beim Literatür-RC-Konstruktionsbeton stammt aus einer Trockenaufbereitung wie sie in der Schweiz vielerorts üblich ist. Die Firma Möckli Beton AG geht zur Schliessung von Ressourcenkreisläufen einen Schritt weiter und bereitet den angelieferten Mischabbruch in einem ausgeklügelten Verfahren mass auf, sodass der gesamte Mischabbruch wieder eingesetzt werden kann. Dies schont einerseits Primärressourcen (Kies) und andererseits den immer knapper werdenden Deponieraum. Die Gesamt-Umweltbilanz mittels der Umweltbelastungspunkte-Methode spricht für den NovoCon Konstruktionsbeton.

Auch die Auswertung der Ökobilanz für die Treibhausgasemissionen zeigt den ökologischen Vorteil des NovoCon Konstruktionsbetons in Abb. 2 auf. Bei der Treibhausgasemissionsbilanz ist der Unterschied etwas kleiner, da bei dieser Methode die CO₂-intensive Zementherstellung stark in den Vordergrund rückt und die ökologische Gütschrift des Recyclings der Gesteinskörnung reduziert. Die Tendenz des ökologischen Vorteils bleibt jedoch erhalten in der Gesamtbewertung. Im Gegensatz zur Methode der Treibhausgasemissionsbilanz betrachtet die UB-P-Methode nicht nur klimarelevante Emissionen, sondern auch Schadstoffemissionen in Luft, Wasser und Boden sowie Ressourcen-, Energie- und Landverbräuche, weshalb der Abbau natürlicher Gesteinskörnung in der UB-P-Methode stärker ökologisch pönalisiert wird als bei den Treibhausgasemissionen.

Kurz und bündig: Der NovoCon Konstruktionsbeton der Firma Möckli Beton AG lohnt sich auch in ökologischer Hinsicht.

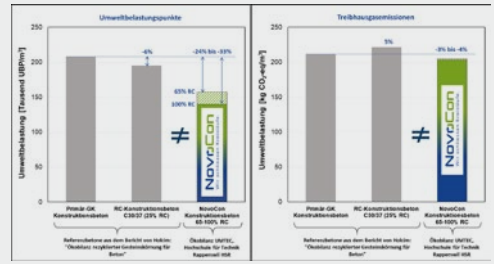


Abbildung 1: Resultat der Ökobilanz mittels UB-P-Methode für zwei Referenzbetone (Seite 1 und 2) und den NovoCon Konstruktionsbeton der Firma Möckli Beton AG (Seite 3). Der NovoCon Konstruktionsbeton spart rund 24% bis 33% jährlich vom RC-Gehalt zuzüglich 65% bis 100% der Umweltbelastung gegenüber einem Primärkonstruktionsbeton ein.



Kantonales Hochbauamt
Verwaltungsgebäude Promenade
8510 Frauenfeld

T +41 58 345 64 25
F +41 58 345 64 30
www.hochbauamt.tg.ch

Amt für Umwelt
Verwaltungsgebäude Promenade
8510 Frauenfeld

T +41 58 345 51 51
F +41 58 345 52 52
www.umwelt.tg.ch