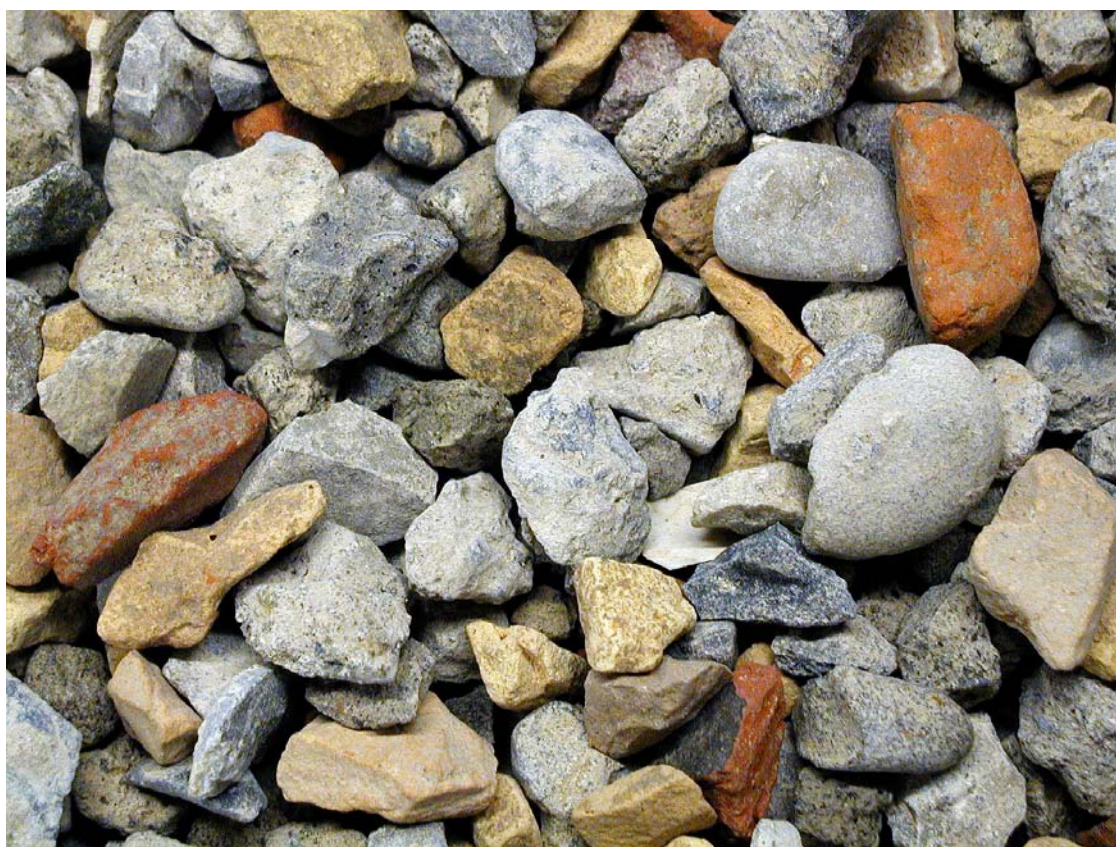


Bericht-Nr. 203600

Materialkenngrössen von Beton aus Mischabbruch

Wir forschen und prüfen für



Impressum

Auftraggeber: Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Fachstelle Ingenieurwesen
Werner Hofmann
Fachstelle nachhaltiges Bauen
Dr. Heinrich Gugerli
Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Projektleitung und Autor:
EMPA
Abteilung Beton / Bauchemie
Cathleen Hoffmann
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf

Laborarbeiten:	EMPA Abt. Beton / Bauchemie Überlandstrasse 129 8600 Dübendorf	LPM AG Urs Mühlethaler Tannenweg 10 5712 Beinwil am See
----------------	---	--

Baustofflieferung: Eberhard Bau AG
Hansruedi Eberhard / Bruno Caprani
Dienstleistungszenter
Breitloostr. 7
8154 Oberglatt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
Gesamtbetrachtung	5
1. Einleitung	9
2. Eigenschaften der Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch	11
2.1 Einleitung	11
2.2 Methodik	11
2.3 Resultate	12
2.3.1 Granulometrie	12
2.3.2 Petrographie	13
2.3.3 Streuung	14
2.3.4 Rohdichte und Wasseraufnahme der Korngemische	15
2.4 Diskussion der Ergebnisse	16
3. Beton mit Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch	17
3.1 Einleitung	17
3.2 Methodik	18
3.3 Resultate	20
3.3.1 Frischbetoneigenschaften	20
3.3.2 Festbetoneigenschaften (separat hergestellte Prüfkörper)	20
3.3.3 Festbetoneigenschaften: (Vergleich separat hergestellte Prüfkörper & Bauwerkbetonproben)	24
3.4 Diskussion der Ergebnisse	30
4. Mögliche Einsatzgebiete des Betons aus Mischabbruchgranulat	33
5. Zusammenfassung	34
6. Literatur	36

Dübendorf, 26. August 2004
Der Projektleiter:

Abteilung Beton / Bauchemie
Der Gruppenleiter:

C. Hoffmann

Dr. A. Leemann

Vorwort

Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat heute – Wissenswertes für den Anwender

Einsatz von Recyclingbeton: Nach wie vor eine Gratwanderung zwischen Ökologie und Qualitätssicherung für verarbeitende Betriebe? Nach wie vor umweltpolitisches Wunschdenken oder zunehmende bis empfehlenswerte Realisierbarkeit für Bauherren, Planer und Architekten? Welches Grundwissen ist gesichert und wo stehen Forschung und Entwicklung?

Es ist eine Tatsache: Die Nachfrage nach vermehrtem Einsatz mineralischer Bauabfälle ist weiterhin ansteigend. So fordern beispielsweise öffentliche Bauträgerschaften bei grösseren Objekten Recyclingbeton vermehrt auch als Konstruktionsbeton einzusetzen. Und: Öffentliche Hochbauämter entwickeln gegenwärtig das gemeinsame Label «eco-bau» für eine gesunde und ökologische Bauweise. Damit soll die verbindliche Umsetzung einer nachhaltigen und Ressourcen schonenden Bauweise bereits in der Planungs- und Realisierungsphase vorgegeben und erreicht werden. Die Tendenz zeigt deutlich, dass dabei Recyclingbeton mehr und mehr eine Rolle spielen wird.

Unsicherheiten vorhanden

Die Folgen dieser Entwicklung zeigen sich wie folgt: Einerseits nimmt der Druck auf alle Beteiligten zu, Bauabfälle verstärkt wieder zu verwerten. Auf der anderen Seite sind branchenweit Unsicherheiten festzustellen, die nicht nur aus betontechnologischer Sicht dem allgemein geforderten Einsatz solcher Stoffe noch entgegenstehen, sondern auch bezüglich den bautechnischen Aspekten.

Nicht zuletzt diese derzeit noch vorhandene Unsicherheit im Umgang mit Recyclingbeton und das daraus resultierende Informationsbedürfnis seitens der Bauindustrie, haben das **Amt für Hochbauten der Stadt Zürich**, die **Empa** mit ihrer **Abteilung Beton/Bauchemie**, die **Firma Eberhard Bau AG** und **das Labor für Prüfung und Materialtechnologie (LPM)** bewogen, eingehende Untersuchungen durchzuführen. Deren Ziel war und ist es,

- die Besonderheiten des Recyclingbetons, bestehend aus 100 % Mischabbruchgranulat, im Vergleich zu konventionellem Beton, bestehend aus natürlichem Kies-Sand aufzuzeigen und
- die daraus resultierenden, heute empfehlenswerten und verantwortbaren Einsatzgebiete abzuleiten.

Die wichtigsten Erkenntnisse, die in diesem Forschungsprojekt gewonnen wurden, sind in der nachfolgenden Gesamtbetrachtung zusammengefasst. Detaillierter wird auf die Untersuchungsmethoden, die Resultate und deren Beurteilung in den anschliessenden Kapiteln 1 bis 3 eingegangen.

Gesamtbetrachtung

Definition von Recyclingbeton

Entsprechend der SN EN 206-1 (2000) wird ein Beton dann als Recyclingbeton bezeichnet, wenn dessen Gehalt an Gesteinskörnung zu mindestens 25 Masseprozent aus Betongranulat und/oder Mischabbruchgranulat im Sinne der BUWAL-Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch, Juli 1997) besteht. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen einem Recyclingbeton hergestellt mit einem Material aus Betongranulat, Mischabbruchgranulat oder Material aus der Bodenwäsche. Betongranulat besteht zu mindestens 95 % aus Kies-Sand und Betonabbruch, während sich Mischabbruchgranulat aus einem Gemisch von Betongranulat, Backstein, Ziegelschrot und künstlichem Kalksandstein zusammensetzt. Bei dem Material aus der Bodenwäsche handelt es sich mehrheitlich um Kies-Sand, welches durch eine physikalisch-chemische Aufbereitung kontaminierten Bodenmaterials gewonnen wird. Die Eigenschaften des Materials aus der Bodenwäsche ist vergleichbar mit natürlichem Kies-Sand (Primärmaterial).

Mischabbruchgranulat

Für die betontechnologische Umsetzung aus Mischabbruchgranulat Beton herzustellen, müssen die massgebenden Eigenschaften des Granulats bekannt sein und vor allem auch dessen Streuung. Bei den Ausgangsmaterialien handelt es sich um mineralische Baustoffe, die beim Rückbau bzw. Abbruch von Hoch-, Tief- und Ingenieurbauwerken gewonnen werden. Die Eigenschaften des Granulats und damit dessen Qualität hängen vom Ausgangsmaterial sowie dem Aufbereitungsprozess ab.

Während dem Recyclingbeton aus Betongranulat heute bereits ein gewisser Etablierungsstatus attestiert werden kann, repräsentiert Mischabbruch-Recyclingbeton schon den nächsten und hochaktuellen Entwicklungsschritt. Das Interesse an Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat ist ausgeprägt vorhanden, dies sowohl auf der planenden und ausführenden Seite, als auch auf der bau- und umweltpolitischen.

Andere Gesteinskörnung

Mischabbruchgranulat weist in seiner stofflichen Zusammensetzung Schwankungen auf. Diese Varianz beeinflusst die Frisch- und Festbetoneigenschaften deutlich. Kornform und vor allem auch die Kornverteilung hängen von der Art der Aufbereitung ab. Durch das Brechen des Materials erhält man ein Granulat, welches nicht wie natürlicher Kies-Sand einen hohen Anteil an kubischen Körnern mit gerundeter Oberfläche aufweist, sondern einen hohen Anteil an nichtkubischen Körnern mit gebrochener Oberfläche (Bild 1 und 2). Die Kornform wirkt sich im lose geschütteten Material auf dessen Hohlraumgehalt aus, der mit 36 - 40 Vol-% wesentlich grösser ist als der des natürlichen Kies-Sandes (Schweizer Mittelland ca. 24 - 27 Vol-%). Entsprechend wird ein erhöhter Anteil an Zement- bzw. Bindemittelleim benötigt, um den Frischbeton gut verarbeiten zu können.

Höhere Wasseraufnahme

Ein entscheidender Punkt bei der Betonherstellung ist die grosse Porosität des Mischabbruchgranulats. Die Wasseraufnahme, welche bei Mischabbruchgranulat bedeutend grösser ist als bei natürlichem Kies-Sand, wird durch Porenstruktur und -volumen des Granulats beeinflusst. Die Wasseraufnahme des Granulats und dessen Rohdichte stehen in direkter Beziehung zueinander. Je kleiner die Rohdichte desto höher ist die Wasseraufnahme. Da bei der Betonherstellung ein Teil des Wassers sogleich von dem Mischabbruchgranulat aufgesogen wird, muss mit einer höheren Wasserdosierung gearbeitet werden.

Festbetoneigenschaften

Die genannten Eigenschaften des Mischabbruchgranulats beeinflussen denn auch die Eigenschaften des Festbetons entscheidend und bestimmen damit die jeweiligen Anwendungsbereiche. Wo eine Anwendung des Betons aus Mischabbruchgranulat sinnreich ist, hängt im Einzelfall also hauptsächlich von dessen Festbetoneigenschaften ab.

- *Druckfestigkeit:*

Die Druckfestigkeit von Beton aus Mischabbruchgranulat ist - wie bei konventionellem Beton - abhängig vom jeweiligen Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert). Aber: Bei vergleichbaren W/Z-Werten unterscheiden sich die Druckfestigkeitswerte von Beton aus Mischabbruchgranulat und konventionellem Beton deutlich. Der Unterschied ist auf das höhere Wassersaugen des Granulats in der Frischbetonphase, auf die geringere Druckfestigkeit des Granulats und auf das unterschiedliche Bindemittelleimvolumen zurückzuführen. Beton aus Mischabbruchgranulat verhält sich bezüglich der Druckfestigkeit indessen „gutmütiger“ gegenüber W/Z-Wert-Schwankungen als konventioneller Beton. Bei einer ökologisch und ökonomisch vertretbaren Zementdosierung (bis 350 kg/m^3) wurden bisher Druckfestigkeiten von bis zu 45 N/mm^2 erreicht.

- *E-Modul (Elastizitätsmodul):*

Beton aus natürlichem Kies-Sand weist eine direkte Beziehung zwischen Druckfestigkeit (f_c) und E-Modul (E) von etwa $E=11000 \cdot \sqrt[3]{f_c}$ auf. Mit steigendem Anteil an Kalksandstein- und Backsteinabbruch wird hingegen das E-Modul bei gleichbleibender Druckfestigkeit kleiner. Beton aus 100% Mischabbruch kann einen E-Modul zwischen $E=5000 \cdot \sqrt[3]{f_c}$ und $8000 \cdot \sqrt[3]{f_c}$ aufweisen. Je kleiner das E-Modul, desto höher wird die Verformung, die ein Bauteil bei Belastung aufweisen wird. So würde beispielsweise eine Decke mit grosser Spannweite, hergestellt mit Beton aus Mischabbruch, bedeutend höhere Durchbiegungen aufweisen, als wenn sie aus konventionellem Beton hergestellt ist.

- *Schwinden*

Aufgrund des höheren Bindemittelleimvolumens und der höheren Wasserdosierung schwindet Beton aus Mischabbruchgranulat stärker als konventioneller Beton. Die Höhe des Schwindmasses ist von der verwendeten Menge an Mischabbruchgranulat abhängig. Das im Vergleich zu konventionellem Beton doppelt so hohe Schwindmass wurde bei dem vollständigen Ersetzen von natürlichem Kies-Sand durch Mischabbruchgranulat gemessen. In der Bauausführung begegnet man diesem Verhalten u.a. dadurch, indem man kleinere Betonierabschnitte wählt.

- *Porosität des Festbetons*

Da im Vergleich zu konventionellem Beton bei Beton aus Mischabbruchgranulat mit einem höheren Bindemittelleimvolumen und höherem W/Z-Wert gearbeitet wird, ist auch das Volumen an Kapillarporen als auch der Kapillarporendurchmesser und demzufolge die Wasserleitfähigkeit grösser. Aus diesem Grund empfiehlt sich hier ein Einsatz eher in Innen- als in ungeschützt exponierten Aussenbereichen.

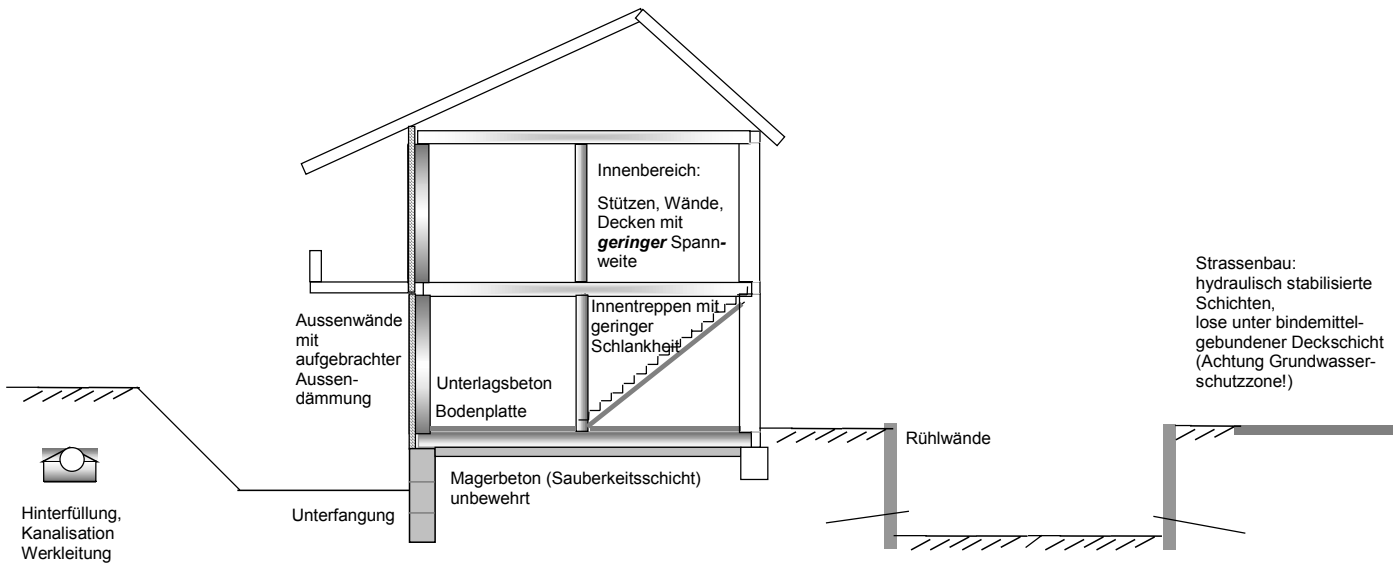
Anforderungen sind zu relativieren

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Recyclingbeton, hergestellt aus Mischabbruchgranulat, qualitative Grenzen aufweist. Er sollte also auch entsprechend seinen Eigenschaften eingesetzt werden. Um eine nutzbringende Verwendung dieses Recyclingbetons zu fördern, erscheint es zudem wichtig, dass bezüglich der Qualitätsanforderungen die «Höhe der Messlatte» auf die vorgegebenen beziehungsweise die realistisch möglichen Zielgrößen und Verwendungsarten abgestimmt ist.

Vergleich der charakteristischen Eigenschaften zwischen Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat und konventionellem Beton:

	üblich verwendeter konventionelle Beton	Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat
Eigenschaften des Granulats:		
Ausgangsmaterial:	Primärmaterial: natürlicher Kies-Sand	Sekundärmaterial: aufbereitete mineralische Bauabfälle bestehend aus Betongranulat, Ziegelschrot, künstlicher Kalksandstein
Kornform, Kornverteilung:	hoher Anteil an kubischen Körnern mit gerundeter Oberfläche	hoher Anteil an nichtkubischen Körnern mit gebrochener Oberfläche
Porosität:		<
Rohdichte:		>
Wasseraufnahme:		<
Hohlraumgehalt:	24 bis 27 Vol-% (Schweizer Mittelland)	36 bis 40 Vol-%
Mischungsherstellung		
Bindemittelleimvolumen		<
Wasserdosierung		<
W/Z-Wert	ca. 0.45 bis 0.60	ca. 0.60 bis 0.80
Verarbeitbarkeit		≈
Festbetoneigenschaften		
Druckfestigkeitsklasse	C 50/60	C 25/30
E-Modul [N/mm ²]		>
Schwinden [‰]		<
Kriechen[‰]		<
Porosität		<

Mögliche Einsatzgebiete des Recyclingbetons aus 100% Mischabbruchgranulat:



Fazit

Das Potenzial für das Herstellen grösserer Mengen an Recyclingbeton - hier im Speziellen aus Mischabbruchgranulat - ist aufgrund der enormen Mengen an Bauschutt und aus umweltpolitischen Gründen (Abnahme der Kiesreserven, begrenzter Deponieraum) ausreichend vorhanden. Eine sinnreiche Wiederverwertung von Bauschutt drängt sich auf. Markt und Nachfrage für Recyclingbeton sind vorhanden und werden weiter gefördert.

Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen, dass die üblichen Beziehungen zwischen den einzelnen Prüfgrößen beim Frisch- und Festbeton aus natürlichem Kies-Sand nicht direkt auf Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat übertragbar sind. Aber: Unter Beachtung der betontechnologischen und bautechnischen Besonderheiten sind interessante Einsatzgebiete für diesen Recyclingbeton vorhanden. Zudem bietet sich dadurch eine sinnreiche Methode, mit Ressourcen haushälterisch umzugehen.

Zu beachten ist jedoch, dass der Einsatz von Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat nicht einen uneingeschränkten oder unverändert anhaltenden Vorteil für die Umwelt bedeuten muss. Alle Faktoren, die Konsequenzen haben können, müssen hierbei bewertet werden, wie der Zementgehalt oder die Zusatzmitteldosierung. Es muss akzeptiert werden, dass dieser Recyclingbeton auch qualitative Grenzen aufweist (siehe Festbetoneigenschaften) und sollte seinen Eigenschaften entsprechend eingesetzt werden. Ebenso ist zu beachten, dass auch die Wiederverwertbarkeit von recycelten Baustoffen nicht unendlich ist. Sie verlieren von Mal zu Mal an Qualität.

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit dieses Recyclingbetons im Vergleich zu konventionellem Beton vergleichbarer Klassierung sind noch weiterzuführen, um letztlich auch die Lebensdauer der entsprechenden Bauteile beurteilen zu können.

1. Einleitung

Neben dem Erstellen von dauerhaften Bauwerken, gilt es auch Möglichkeiten der umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Entsorgung der Bauwerke am Ende ihrer Lebensdauer zu finden.

Aus Abbruchtätigkeiten fallen in der Schweiz gemäss dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) jährlich grosse Mengen an mineralischen Bauabfällen an [1, 2]. Materialmengen, die angesichts der stetig anwachsenden Deponieberge für die Kantone zusehends zu einem Problem werden. Eine interessante Möglichkeit, diese Bauschuttmassen wirtschaftlich wie auch ökologisch zu entsorgen, stellt die Aufbereitung dieses Abbruchmaterials zu Mischabbruchgranulat dar. Dieses Granulat kann als Gesteinskörnung für die Betonherstellung verwendet werden und ersetzt dadurch zum Teil den natürlichen Kies-Sand. Durch das Recycling von mineralischen Bauabfällen können einerseits Kiesressourcen geschont werden. Andererseits kann der Belastung des immer knapper werdenden Deponieraums durch Bauschutt entgegengewirkt werden.



Bild 1:
Eine vermehrte Abbruchtätigkeit ist die Ursache für die steigende Zunahme an Bauabfällen.



Bild 2:
Betonabbruch bzw. Mischabbruch bilden mit wachsender Tendenz die wichtigsten Komponenten des Abfalls im Hochbau.

Aus betontechnologischer Sicht besteht noch Untersuchungsbedarf bezüglich dem allgemeinen Einsatz solcher sekundären Rohstoffe. Zur Förderung der Wiederverwertung aufbereiteten Mischabbruchs müssen die Eigenschaften dieses Sekundärrohstoffes bestimmt werden. Gleichzeitig muss aufgezeigt werden, wie diese Eigenschaften in der Betontechnologie

berücksichtigt werden müssen, damit ein möglichst grosses Anwendungsgebiet für Recyclingbeton aus aufbereitetem Mischabbruch eröffnet werden kann.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, die Praxistauglichkeit und den Einsatzbereich (Expositionsklassen gem. SN EN 206/1) von Beton mit Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch aufzuzeigen.

Die Realisierung dieses Zieles soll in vier Teilphasen verwirklicht werden, die wie folgt formuliert sind:

- Phase 1 (Laboruntersuchung): Ermittlung der Streuung definierter Eigenschaften des Mischabbruchgranulates
- Phase 2 und 3 (Feldversuch): Beurteilung der Mischabbruchgranulat-Kenngrößen und deren Einfluss auf die Rezeptur und Eigenschaften des Recyclingbetons

Die Erhebung der dafür notwendigen Daten wird anhand eines Feldversuches vorgenommen. Im Rahmen dieses Versuches werden die Frischbetoneigenschaften des Betons im Werk und zusätzlich nach dem Transport zur Baustelle an der Einbaustelle ermittelt. Die Festbetoneigenschaften werden an separat hergestellten Prüfkörpern und an aus dem Bauwerk entnommenen Proben bestimmt.

- Phase 4 (Umsetzung in die Praxis): Umsetzung in die Praxis

Phase 1

2. Eigenschaften der Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch

2.1 Einleitung

In dieser ersten Phase werden die für die betontechnologische Umsetzung massgebenden Eigenschaften der Gesteinskörnung untersucht und deren Streuung analysiert.

2.2 Methodik

Zur gezielten Untersuchung von verschiedenen Gesteinskörnungseigenschaften, ihrer Zusammenhänge und deren Einfluss auf die Eigenschaften von Beton, wurden fünf Proben Mischabbruchgranulat 0/32 mm á 50 kg zu unterschiedlichen Zeitpunkten (ca. aller zwei Wochen) aus einem Silo der Firma Eberhard Bau AG entnommen. Mit diesen Probeentnahmen wurde die zeitlich variable Petrographie des aufbereiteten Mischabbruchs erfasst. Die Petrographie beschreibt die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Proben. Dabei wurde der Kalksandstein dem Anteil an Betonabbruch zugerechnet, da eine visuelle Identifikation beider Materialien nur bedingt möglich ist. Betongranulat mit einem Zementsteinanteil < 20 % auf der Oberfläche wurde bei der petrographischen Beschreibung als Kies-Sand definiert.

Mit der granulometrischen Prüfung wird die Korngrößenverteilung untersucht und in Form von sogenannten Siebkurven dargestellt. Die Siebkurve zeigt den Durchgang in Masseprozenten in Funktion der Sieböffnung an. Diese Siebkurven wurden mit „Idealsiebkurven“ verglichen, die eine geeignete Kornabstufung repräsentieren: Empa-Kurve, Fuller-Kurve. Die Empa-Kurve wurde empirisch ermittelt und liefert bei Alluvialkies (natürlich gerundeter Kies-Sand) aus dem Schweizer Mittelland Korngemische mit einem tiefen Hohlraumgehalt. Die Fullerkurve basiert auf der Formel

$$\text{Siebdurchgang} = \sqrt{\frac{\text{Sieböffnung}}{\text{Grösstkorndurchmesser}}} \cdot 100 \%$$

und soll eine gute Packungsdichte ermöglichen. Der ermittelte Hohlraumgehalt der Proben 1-5 wurde mit dem Hohlraumgehalt eines Gemisches aus rundem Kies-Sand, zusammengesetzt nach der Empa-Kurve, verglichen.

Zur Ermittlung der Wasseraufnahme wurde das Granulat bei 110°C bis zu seiner Massekonstanz getrocknet. Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte unter atmosphärischem Druck.

Die beim Granulat eingesetzten Untersuchungsmethoden sind in Tab. 1 zu entnehmen. Soweit es sich um standardisierte Prüfungen handelt, ist auf die entsprechende Norm beziehungsweise Prüfvorschrift hingewiesen. Abweichungen von den genannten Verfahrensweisen oder ergänzende Erläuterungen sind ebenfalls in dieser Tabelle aufgeführt.

Parameter	Prüfung gemäss	Erläuterung
Petrographie	SIA 162/1, SIA 162/4 SN 670 800c	abweichend zu SIA 162/4 wurde Petrographie ab > 2 mm durchgeführt.
Granulometrie		
Korngrößenverteilung	EN 933-1 SN 670 130 SN 670 810c	
Kornform	SN 670 130, SN 670 810c	
Schüttdichte	EN 1097-3, SN 670 810c	
Wasseraufnahme	EMPA SOP 3973	
Kornrohddichte	EN 1097-6, SN 670 810c	
abschlämbbare Bestandteile	SIA 162/1, SN 670 810c	

Tab. 1: Übersicht der Prüfungen, welche am Mischabbruchgranulat durchgeführt wurden.

2.3 Resultate

2.3.1 Granulometrie

Der untersuchte Mischabbruch der fünf Probeentnahmen weist die folgenden Anteile an den verschiedenen Fraktionen auf:

Probe	0/2 [mm]	2/4 [mm]	4/8 [mm]	8/16 [mm]	16/32 [mm]
1 [M-%]	42	7	15	17	18
2 [M-%]	43	6	14	18	18
3 [M-%]	31	7	18	21	23
4 [M-%]	32	5	16	21	26
5 [M-%]	42	6	15	19	16

Tab. 2: Korngrößenverteilung der fünf Probeentnahmen.

Verglichen mit der EMPA-Kurve und der Fuller-Kurve weisen die Siebkurven der Proben 1, 2 und 5 einen bedeutend höheren Anteil der Fraktion 0.5-4 mm auf (Abb.1).

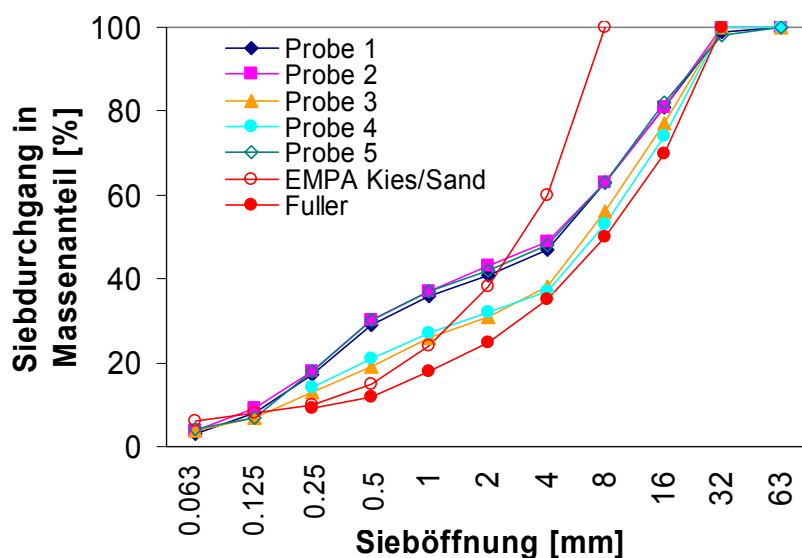


Abb. 1: Korngrößenverteilung der Mischungsproben 1-5.

2.3.1.1 Hohlraumgehalt und Kornform

Der Hohlraumgehalt des lose geschütteten trockenen Granulats liegt bei den fünf Probenmischungen zwischen 34 Vol-% und 37 Vol-%. Im Vergleich dazu weist natürlicher Kies-Sand aus dem Schweizer Mittelland lose geschüttet nur einen Hohlraumgehalt zwischen 24 und 27 Vol-% auf.

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	EMPA-Kurve
Hohlraumgehalt [Vol-%]	34.8	34.1	36.4	36.6	34.5	24.6

Im Gegensatz zum natürlichen Kies-Sand, welches sich durch einen hohen Anteil an kubischen Körnern und gerundeter Oberfläche auszeichnet (Bild 3), weist Mischabbruchgranulat (Bild 4) einen hohen Anteil an nichtkubischen Körnern mit gebrochener Oberfläche auf.



Bild 3: natürlicher Kies-Sand



Bild 4: Mischabbruchgranulat

2.3.2 Petrographie

Bei der Bestimmung der Petrographie wurde die folgende Zusammensetzung der Fraktion 2/32 mm unter Berücksichtigung der entsprechenden Sieblinien ermittelt:

Petrographische Beschreibung	Siebkurve 2/32 mm				
	Probe 1 (Masse-%)	Probe 2 (Masse-%)	Probe 3 (Masse-%)	Probe 4 (Masse-%)	Probe 5 (Masse-%)
Ausbauasphalt	0.1	0.3	0.3	0.3	1.4
Kies-Sand	29.2	21.4	55.3	40.8	41.6
Beton, Kalksandstein	47.9	52.7	31.9	36.1	36.8
Backstein, Ziegel	20.8	23.4	11.0	21.2	17.8
Keramik	0.7	0.9	0.3	1.1	1.8
Unb. Fremdstoffe	0.1	0.1	0.8	0.2	0.6
Eisen,	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
Holz, Papier, Kunststoff etc.	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1
Gips	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Glas	0.2	0.4	0.1	0.2	0.0

Tab. 3: Petrographie der Fraktion 2/32 mm der fünf Probeentnahmen.

Petrographische Beschreibung	Siebkurve 8/32 mm				
	Probe 1 (Masse-%)	Probe 2 (Masse-%)	Probe 3 (Masse-%)	Probe 4 (Masse-%)	Probe 5 (Masse-%)
Kies-Sand, Betonabbruch, Kalksandstein	71.1	69.9	89.4	79.6	77.4
Ausbauasphalt	0.0	0.6	0.2	0.1	1.5
Backstein/Ziegel	28.2	27.5	9.7	19.7	20.2
Fremdstoffe	0.2	0	0.6	0.1	0.8

Tab. 4: Petrographie der Fraktion 8/32 mm der fünf Probeentnahmen.

Zuschlag	klassifizierter Recycling-Beton (Masse-%)	Probe				
		1	2	3	4	5
Mischabbruchgranulat > 8 mm	<3.0	n. erf. ¹	n. erf. ¹	n. erf. ¹	n. erf. ¹	n. erf. ¹
Fremdstoffe > 8 mm (ohne Gips)	<0.3	erfüllt	erfüllt	n. erf. ¹	erfüllt	n. erf. ¹

¹n. erf. = nicht erfüllt

Zuschlag	nicht klassifizierter Recycling-Beton (Masse-%)	Probe 1 - 5
Ausbauasphalt > 8 mm	<7.0	erfüllt
Fremdstoffe > 8 mm (ohne Gips)	<0.5	teilw. erfüllt

Tab. 5: Beurteilung der Petrographie des untersuchten Granulats bezüglich Anforderungen nach SIA 162/4 bezüglich Mischabbruch.

Zuschlag	Mischabbruchgranulat (Masse-%)	Mischabbruch Probe 1 - 5
Kies-Sand + Betonabbruch + Mischabbruch > 8 mm	>97.0	erfüllt
Ausbauasphalt > 8 mm	<3.0	erfüllt
Fremdstoffe > 8 mm (ohne Gips)	<0.3	teilw. erfüllt

Tab. 6: Anforderung und Beurteilung nach Richtlinie BUWAL (1997a):

2.3.3 Streuung

Die fünf untersuchten Proben weisen deutliche Unterschiede in ihrer Petrographie auf (Tab. 3 und Abb. 2). Der Anteil an Kies-Sand beträgt zwischen 20 und 55 Masse-%. Die Gehalte an Beton- und Kalksandsteingranulat liegen zwischen 32 und 53 Masse-%. Der Anteil an Backsteingranulat und Ziegelbruch schwankt zwischen 11 Masse-% und 23 Masse-%.

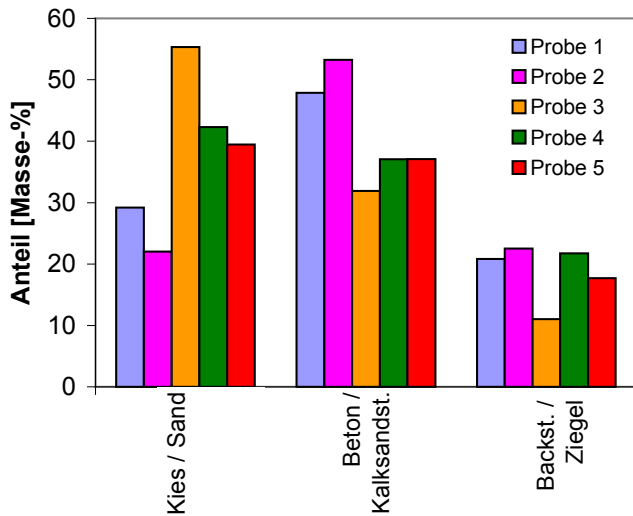


Abb. 2: Schwankungsbreite der Hauptbestandteile bei den untersuchten fünf Probeentnahmen.

2.3.4 Rohdichte und Wasseraufnahme der Korngemische

Die Wasseraufnahme des Granulats der untersuchten fünf Korngemische steht in direkter Beziehung zu ihrer Rohdichte (Abb. 3). Aufgrund der grossen Schwankungsbreite der Petrographie (Abb. 2) variiert die Rohdichte zwischen 1900 und 2400 kg/m³ und die Wasseraufnahme entsprechend zwischen 4 und 12 %.

Die Wasseraufnahme nimmt nach 1 Minute mit einer weiteren Wasserlagerung bis zu 30 Minuten nur noch geringfügig zu.

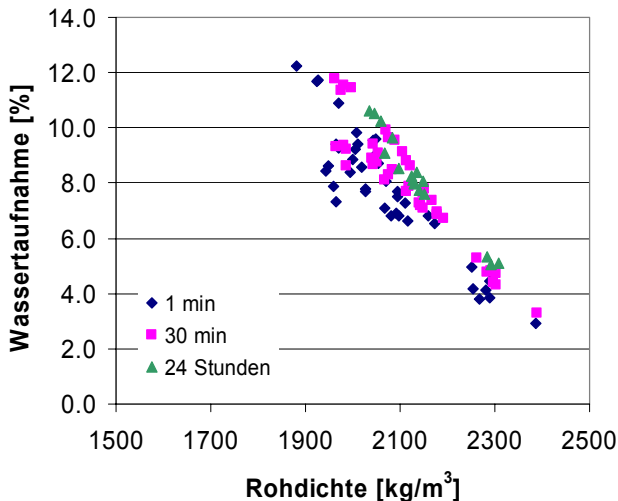


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Rohdichte und Wasseraufnahme der verschiedenen Einzelfractionen der fünf verschiedenen Mischabbruchproben.

Die Wasseraufnahme des Granulats zeigt eine Änderung mit ihrer Korngrösse und Rohdichte (Abb. 4). Feine Fraktionen weisen eine höhere Wasseraufnahme und eine tiefere Rohdichte auf als grössere Fraktionen.

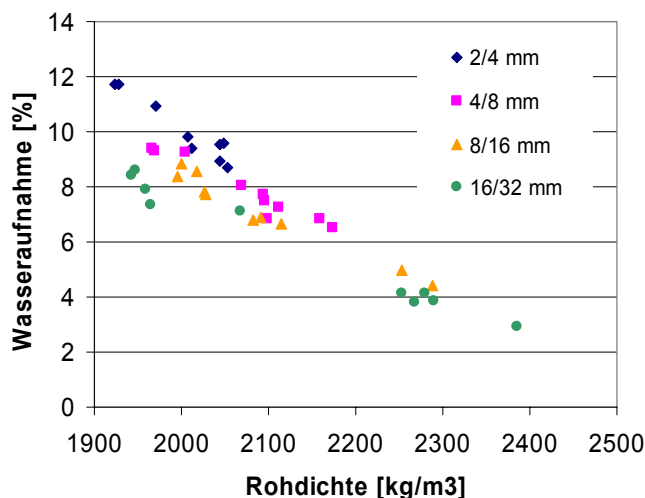


Abb. 4: Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Rohdichte für verschiedene Fraktionen nach 1 min Wasserlagerung.

2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Eigenschaften des Mischabbruchgranulats hängen vom Ausgangsmaterial ab. Die durch die unterschiedliche Herkunft bedingte grosse Schwankungsbreite der Petrographie (Abb. 2) [vgl. 6] bewirkt eine grosse Varianz der Rohdichte und des Wasseraufnahmeverhaltens des Granulats (Abb. 3). Diese Varianz basiert auf den unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Materialien, die beim Mischabbruch hauptsächlich Kies-Sand, Kalksandstein, Betonabbruch und Backstein sind. So ist beispielsweise die Wasseraufnahme des Backsteingranulats aufgrund seiner hohen Porosität und geringen Rohdichte bedeutend grösser als das von Betonabbruchmaterial [3]. Andere Untersuchungen zeigen, dass sich mit steigendem Ziegelanteil das „Nachsaugverhalten“ des Granulats verstärkt [7]. Da dieses Nachsaugverhalten dem Wurzel-Zeit-Gesetz entspricht, kann dieses auf die Kapillarporosität des Backsteins zurückgeführt werden. Die in dieser ersten Phase untersuchten Materialien nehmen einen grossen Teil des Wassers innerhalb der ersten Minute auf (Abb. 3). Nach dieser Zeit wird nur noch in geringem Masse weiteres Wasser aufgesaugt.

Neben der Porenstruktur wird die Wasseraufnahme auch durch die Granulometrie des Mischabbruchgranulats beeinflusst. Eine höhere Wasseraufnahme konnte mit der Abnahme der Korngrösse festgestellt werden (Abb. 4). Diese ist zum einen auf die grössere spezifische Oberfläche kleiner Fraktionen zurückzuführen, zum anderen auf den höheren Anteil an Zementstein in den kleineren Fraktionen.

Von der Art der Aufbereitung hängen Kornform und Kornverteilung des Mischabbruchgranulats ab. Durch das Brechen der Materialien erhält man ein Granulat, welches nicht wie natürlicher Kies-Sand einen hohen Anteil an kubischen Körnern mit gerundeter Oberfläche aufweist sondern einen hohen Anteil an nichtkubischen Körnern mit gebrochener Oberfläche. Aufgrund dessen ist der Hohlraumgehalt des lose geschütteten Mischabbruchgranulats (ca. 36 Vol-%) bedeutend grösser als der von natürlichem runden Kies-Sand (24-26 Vol-%). Entsprechend wird ein erhöhter Anteil an Zement- bzw. Bindemitteln benötigt, um den Frischbeton gut verarbeiten zu können werden [10].

Der Vergleich der Ergebnisse aus den petrographischen Untersuchungen mit den Anforderungen aus SIA 162/4 zeigt, dass der untersuchte Mischabbruch normgemäss nur für nichtklassifizierten Beton eingesetzt werden dürfte. Erste Ergebnisse aus Vorversuchen weisen jedoch darauf hin, dass es keine betontechnologischen Gründe gibt, mineralische Bauabfälle nicht auch für klassifizierten Beton einzusetzen [10].

Phase 2 und 3

3. Beton mit Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch

3.1 Einleitung

Der Recyclingbeton – hergestellt aus aufbereitetem Mischabbruchgranulat - ist ein noch zu optimierender Betontyp. Kenntnisse und praktische Erfahrungen bezüglich seinen mechanischen Eigenschaften und seiner Dauerhaftigkeit sind noch gering. Diese sind jedoch notwendig, um für diesen Recyclingbeton klare Kriterien für den jeweiligen Einsatz in der Praxis definieren zu können.

Wie die Ergebnisse aus Phase 1 zeigen, weist Mischabbruchgranulat im Vergleich zu natürlichem Kies-Sand folgende Unterschiede auf:

- eine grosse Varianz der stofflichen Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs
- einen höheren Anteil an nicht kubischen Körnern mit gebrochener Oberfläche
- einen höheren Hohlraumgehalt des lose geschütteten Gesteinsgranulats
- ein saugendes Granulat als Gesteinskörnung

Aufgrund dieser Eigenschaften weist der Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat einen hohen Zementleim- bzw. Bindemittelleimbedarf auf [10].

In welchen Bereichen eine Anwendung des Betons aus Mischabbruchgranulat absehbar ist, wird hauptsächlich von seinen Festbetoneigenschaften bestimmt.

Welchen Einfluss die charakteristischen Eigenschaften des Mischabbruchgranulats auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften haben, wurde in einem Feldversuch und in den ihm vorangegangenen Vorversuchen untersucht. Während der Vorversuche wurden separat hergestellte Prüfkörper für Laboruntersuchungen hergestellt. Bei dem Feldversuch wurde mit Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat ein Kranbahnfundament erstellt (Bild 3 und 4). Aus diesem Bauteil wurden Bohrkerne zur Prüfung des Bauwerkbetons entnommen.



Bild 3: Erstellen einer Kranbahn mit Beton aus Mischabbruchgranulat.



Bild 4: Verdichtungsarbeiten

3.2 Methodik

Vorversuche, Feldversuch

Mit den Chargen 1-4, die in Phase 1 für die Untersuchung der Eigenschaften des Mischabbruchgranulates verwendet wurden, erfolgte gleichzeitig die Herstellung von vier Betonmischungen (M1 bis M4) im Betonwerk (Tab. 7). In Vorbereitung des am 18.02.2004 und 25.02.2004 stattgefundenen Feldversuches wurde am 06.02.2004 ein Vorversuch durchgeführt, bei welchem die Mischungen M5 und M6 hergestellt wurden. Die Betonmischungen des Feldversuches sind mit M7 und M8 bezeichnet.

Der Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch wurde ein Feinanteil (0-2 mm) aus natürlichem Sand zugemischt. Als Bindemittel kam bei den Mischungen M1 bis M4 als Zement ein CEM II 32.5 und als Zusatzstoff Steinkohleflugasche zur Anwendung. Die Mischung M5 bis M8 enthielten einen CEM II 42.5 und keinen Zusatzstoff. Jeder Mischung wurde ein Hochleistungsverflüssiger zugegeben, dessen Dosierung sich auf den Bindemittelgehalt bezieht. Ein Frostschutzmittel wurde nur bei der Herstellung der Mischung M8 verwendet.

	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8
Sand 0/2 mm [M-%] ¹	20	15	14	20	9.5	10	10	10
Sand 0/4 mm [M-%] ¹	26	20	20	27	36	36	36	36
Sand 4/8 mm [M-%] ¹	9	17.5	18	8	10	10	10	10
Sand 8/16 mm [M-%] ¹	20	23	22	20	19.5	19	20	20
Sand 16/32 mm [M-%] ¹	25	25	25	25	25	25	24	24
Zuschlag total [kg/m] ¹	1775	1762	1778	1771	1797	1803	1600	1606
Zement [kg/m]	328	323	351	351	325	325	325	325
Zusatzstoff (SFA) [kg/m]	25	21	100	98	-	-	-	-
Verflüssiger [M-%] ²	0.9	0.95	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
Frostschutzmittel [M-%] ²	-	-	-	-	-	-	-	1.0
Wasser [l/m ³]	221	175	222	221	185	182	195	182
WZ-Wert	0.67	0.54	0.63	0.63	0.57	0.65	0.60	0.65
WB-Wert ³	0.65	0.53	0.57	0.57	-	-	-	-

¹ M-%: Masseprozent des Zuschlages

² M-% des Bindemittels

³ Zusatzstoff zu 40% angerechnet

Tab. 7: Verwendete Mischrezepturen.

Prüfungen

Frischbetoneigenschaften

Die Verarbeitbarkeit des Recyclingbetons aus Mischabbruchgranulat wurde entsprechend SIA 162/1 Nr. 20 und Nr. 21 charakterisiert (Tab. 10 und Tab. 11). Eine Beurteilung der Mischungen M1-M4 erfolgte direkt nach der Betonherstellung sowie 30 min nachher (Tab. 11). Bei den beiden Feldversuchen erfolgte eine Frischbetonkontrolle direkt nach der Herstellung im Betonwerk sowie nach dem Transport an der Einbaustelle - 30 min und 150 min nach Betonherstellung (Tab. 11).

Festbetoneigenschaften

Von den Mischungen M1 bis M8 wurden separat Prüfkörper hergestellt, um die in Tab. 8 aufgeführten Festbetoneigenschaften entsprechend SIA 162/1 zu untersuchen.

Prüfung	Alter [d]	Lagerung	Abmessungen [mm]	Norm
Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]	3,7,14, 28	20°C, 70 % rLF	150 x 150 x 150	SIA 162/1 Nr. 1
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	3,7,14,28	20°C, 70 % rLF	120 x 120 x 360	
E-Modul [N/mm ²]	3,7,14,28	20°C, 70 % rLF	120 x 120 x 360	SIA 162/1 Nr. 3
Schwinden ϵ_s [‰]	91, 360	20°C, 70 % rLF	120 x 120 x 360	SIA 162/1 Nr. 4
Kriechen ϵ_c [‰]	91, 360	20°C, 70 % rLF	120 x 120 x 360	SIA 162/1 Nr. 4
Porosität (Skap)	28	20°C, 70 % rLF	200 x 200 x 200	SIA 162/1 Nr. 7

Tab. 8: Prüfplan für Bestimmung der Festbetoneigenschaften an separat hergestellten Prüfkörper. Prüfungen ausgeführt durch die EMPA.

In Ergänzung zu den Untersuchungen an den separat hergestellten Prüfkörpern (Ausführung EMPA) erfolgte die Prüfung des Bauwerkbetons (Kranbahnfundament) durch das Prüflabor LPM (Tab. 9). Dafür wurden Bohrkern \varnothing 50 mm und 100 mm horizontal aus dem Bauwerk entnommen.

Bei den Porositätsuntersuchungen wurde die Porosität des Aussenbetons und des Kernbetons bestimmt und miteinander verglichen. Als Aussenbeton ist hierbei der Betonbereich definiert, der sich bis 50 mm unterhalb der Betonoberfläche (Schalungsfläche) erstreckt. Als Kernbeton wird der Beton bezeichnet, welcher sich 50 mm unterhalb der Betonoberfläche und tiefer befindet. Es wurden einerseits die Gesamtporosität (n) des untersuchten Betons ermittelt. Andererseits wurde der Gehalt an Poren gemessen, der durch das kapillare Saugen nicht füllbar ist ($n-U_E$) - so genannte Luftporen. Ebenfalls wurde der maximal erreichbare Wassergehalt am Ende des Aufsaugversuchs ermittelt (U_E).

Bei der Messung des statischen Elastizitätsmoduls (E-Modul) wurde der Lastbereich so gewählt, dass mit einer Unterspannung von 0.5 N/mm² und einer Oberspannung von 12 N/mm² gearbeitet wurde. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei 1.0 N/mm²/sec.

Um den mutmasslichen Verlauf der Betonkarbonatisierung in Erfahrung zu bringen, wurde ein Schnellverfahren entsprechend Cementbulletin Nr. 8 (1988) zur Beurteilung durchgeführt. Die Berechnung der theoretischen Karbonatisierungstiefe Y nach 50 Jahren erfolgte überschläglich mittels der Formel $Y=K \cdot T^{0.5}$. Der CO₂-Gehalt im Laborversuch war 83.5% (C1) und in der Atmosphäre 0.033% (c1).

Der Einfluss wechselnder Feuchtebedingungen auf das zeitabhängige Verformungsverhalten wurde entsprechend der Versuchsanweisung AA 5.1-601-1 (Prüflabor LPM) untersucht.

Die lineare Wärmedehnung α des untersuchten Bauwerkbetons wurde bei einem Temperaturbereich von -20°C und +60°C gemessen.

Bei der Prüfung des Frostwechselverhaltens von Betonprüfkörpern wird die Frostbeständigkeit des Betons untersucht. Als Mass für die Frostbeständigkeit dient die Anzahl der Frostwechsel N_{50} , die einen Abfall des statischen Elastizitätsmoduls um 50 % bewirkt. Kriterien für die Beurteilung sind folgende Grenzwerte: Hohe Frostbeständigkeit: $N_{50} > 100$, Tiefe Frostbeständigkeit: $N_{50} < 20$.

Prüfung	Alter [d]	Norm
Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]	7, 28	SIA 162/1 Nr. 2
Porosität (innen, aussen)	28	SIA 162/1 Nr. 5
statischer E-Modul [N/mm ²]	28	SIA 162/1 Nr. 3
Beschleunigte Karbonatisierung [‰]	ca. 35 Tage	entspr. Cementbulletin Nr. 8 (1988)
hygrische Dehnung (feucht-trocken Zyklen)	ca. 35 Tage	entspr. Arbeitsanweisung AA 5.1-601-1 (LPM)
Frostwechselverhalten	28	SIA 162/1 Nr. 8

Tab. 9: Prüfplan für Bestimmung der Festbetoneigenschaften des Bauwerkbetons. Prüfungen ausgeführt durch das Prüflabor LPM.

Die Prüfkörper wurden in einem Klimaraum bei einer Temperatur von 20°C \pm 2°C und bei einer relativen Luftfeuchte von > 90 % gelagert.

3.3 Resultate

3.3.1 Frischbetoneigenschaften Prüfwerte direkt nach Herstellung

	M 1	M 2	M 3	M 4	M5	M6	M7	M8
WZ-Wert	0.75	0.76	0.74	0.75	0.86	0.88	0.87	0.81
WB-Wert	0.73	0.74	0.66	0.67	-	-	-	
Ausbreitmass AM	50	44	51	43	34	35	54	36
LP-Gehalt LP	3.4	3.3	3.8	3.8	3.2	3.5	3	6.4
Verdichtungsmass VM	1.03	1.09	1.03	1.08	1.07	1.1	1.04	1.05
Rohdichte	2136	2162	2129	2140	2134	2144	2161	2113
Wassergehalt	245	247	245	263	280	285	282	263

Tab. 10: Frischbetoneigenschaften direkt nach Herstellung.

Vergleich zwischen Prüfwerten direkt und 30 min sowie 150 min nach Betonherstellung

	M1	M1 ¹	M 2	M2 ¹	M3	M3 ¹	M 4	M4 ¹	M7	M7 ¹	M7 ²	M8 ¹	M8 ²
WZ-Wert	0.75		0.76		0.74		0.75		0.87	0.87			
WB-Wert	0.73		0.74		0.66		0.67		-				
Ausbreitmass AM [cm]	50	51	44	39	51	48	43	40	54	42	29		29
LP-Gehalt LP [%]	3.4	2.4	3.3		3.8		3.8		3	3.8			
Verdichtungsmass VM	1.03	1.03	1.09		1.03		1.08		1.04	1.02	1.18		1.18
Rohdichte [kg/m ³]	2136	2140	2162		2129		2140		2161	2139			
Wassergehalt [kg/m ³]	245		247		245		263		282				

¹: Wert 30 min nach Herstellung, ²: Wert 150 min nach Herstellung

Tab. 11: Frischbetoneigenschaften zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

3.3.2 Festbetoneigenschaften (separat hergestellte Prüfkörper)

Druckfestigkeit

Bei einem gegebenen WZ-Wert erreicht der Beton aus Mischabbruchgranulat eine höhere Festigkeit als der konventionelle Beton (Abb. 5).

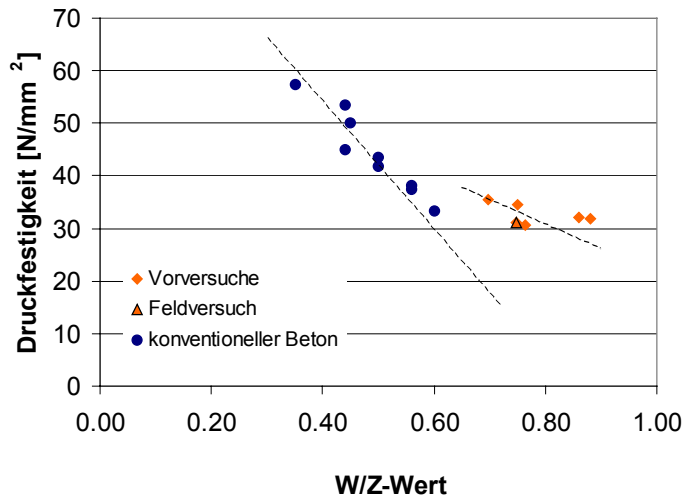


Abb. 5: Druckfestigkeit (28 Tage) in Abhängigkeit des W/Z-Wertes; Werte für konventionellen Beton aus [13].

Druckfestigkeit/E-Modul

Der Beton aus Mischabbruch weist bei einer gegebenen Druckfestigkeit (f_c) ein um etwa 40 % tieferes E-Modul (E) auf als konventioneller Beton (Abb. 6). Die Werte entsprechen beim konventionellen Beton etwa der Beziehung

$$E = 11000 \cdot \sqrt[3]{f_c}$$

und bei den hier untersuchten Betonen aus Mischabbruch in etwa der Beziehung

$$E = 7000 \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad (\text{vgl. SIA 262}).$$

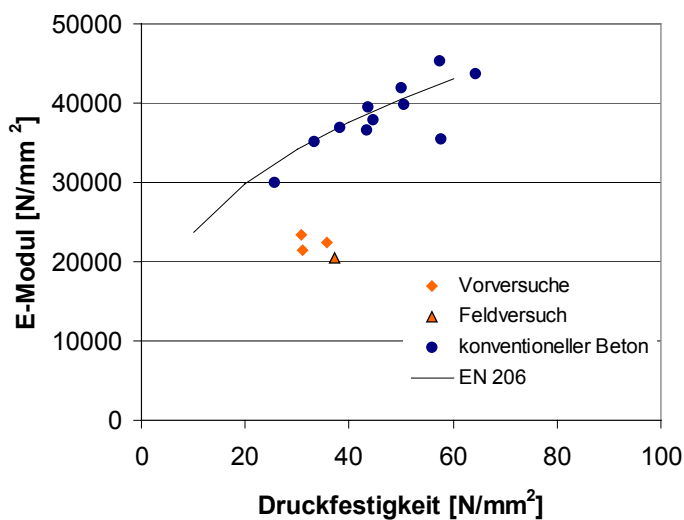


Abb. 6: E-Modul in Abhängigkeit der Druckfestigkeit (28 Tage). Die schwarze Linie entspricht dem Verhältnis von Druckfestigkeit zu E-Modul nach EN 206 für konventionellen Beton.

Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit des Betons aus Mischabbruchgranulat ist bei vergleichbarer Druckfestigkeit mit der des konventionellen Betons praktisch vergleichbar (Abb. 7).

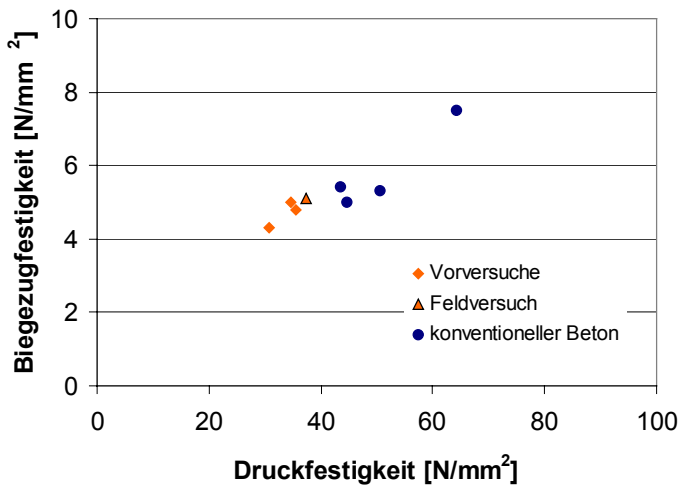


Abb 7: Biegezugfestigkeit im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit der Druckfestigkeit.

Schwind- und Kriechverhalten

Das Schwindmass vergrößert sich mit steigendem Bindemittelvolumen, weshalb die Werte für den Beton aus Mischabbruchgranulat höher liegen als für konventionellen Beton (Abb. 8). Bei konstantem Bindemittelgehalt - jedoch steigendem Wassergehalt - ist ebenfalls eine Zunahme des Schwindens zu beobachten (Abb. 10). Im Vergleich zum konventionellen Beton ist das Schwindmass des Betons aus Mischabbruchgranulat sowohl nach 28 Tagen als auch nach 91 Tagen doppelt so gross (Abb. 9).

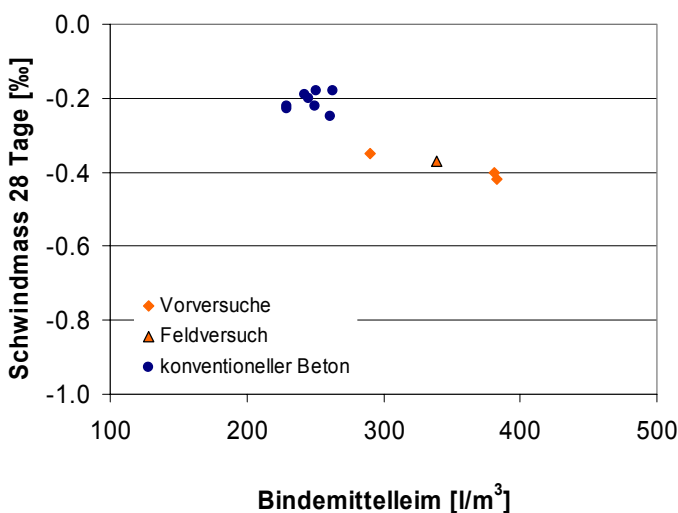


Abb. 8: Schwindmass im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit des Bindemittelvolumens.

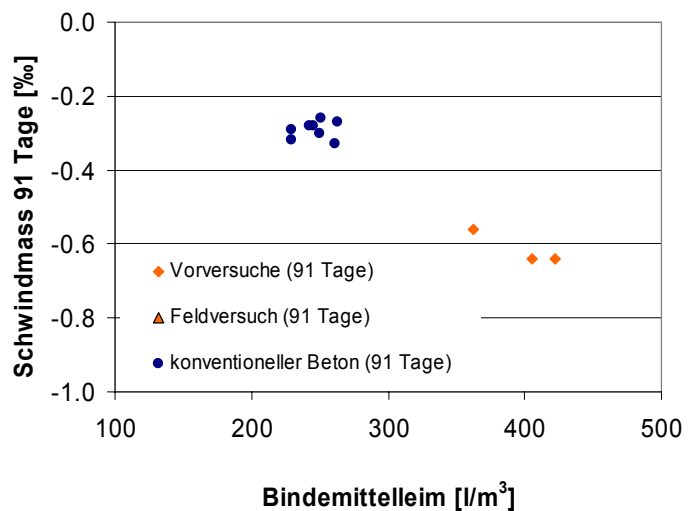


Abb. 9: Schwindmass im Alter von 91 Tagen in Abhängigkeit des Bindemittelvolumens.

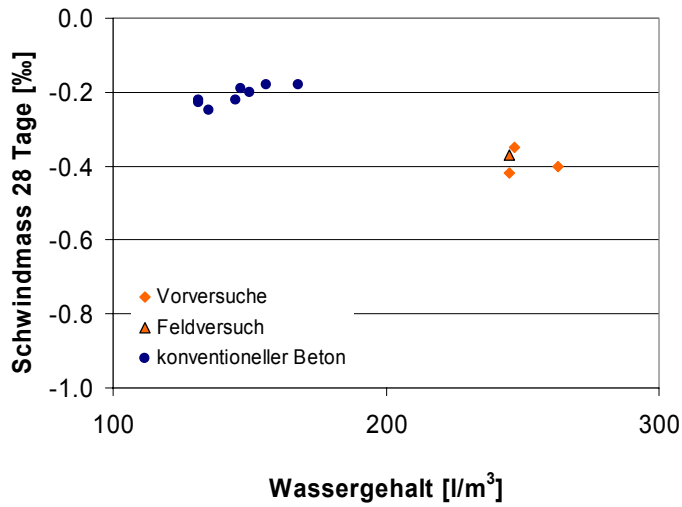


Abb. 10: Schwindmass im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit des Wassergehaltes.

Mit steigendem Bindemittelleimvolumen vergrößert sich auch das Kriechmass (Abb. 11). Aus diesem Grund liegen die Werte des Betons aus Mischabbruchgranulat höher als die des konventionellen Betons. Das Kriechmass nimmt ebenfalls mit steigendem Wassergehalt zu (Abb. 13). Im Vergleich zum konventionellen Beton ist das Kriechmass des Betons aus Mischabbruchgranulat sowohl nach 28 Tagen als auch nach 91 Tagen in etwa doppelt so gross (Abb. 12).

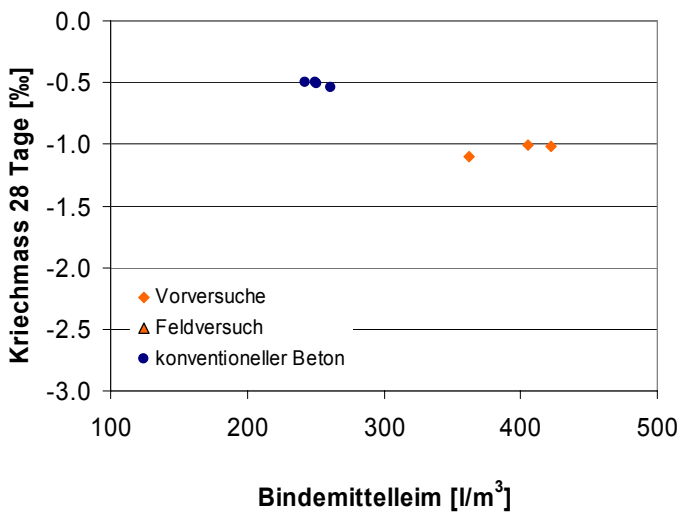


Abb. 11: Kriechmass im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit des Bindemittelvolumens.

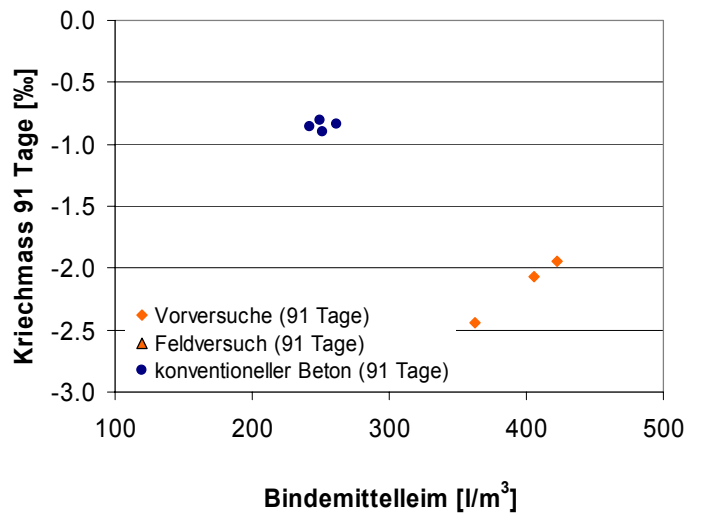


Abb. 12: Kriechmass im Alter von 91 Tagen in Abhängigkeit des Bindemittelvolumens.

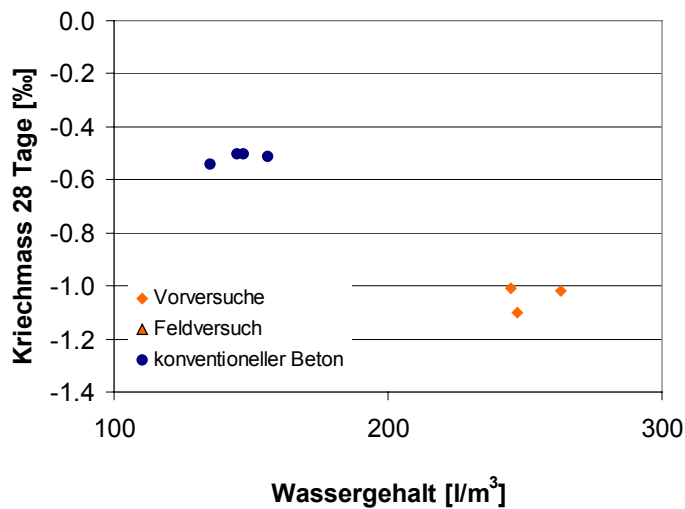


Abb. 13: Schwindmass im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit des Wassergehaltes.

3.3.3 Festbetoneigenschaften: (Vergleich separat hergestellte Prüfkörper & Bauwerkbetonproben)

3.3.3.1 Mischung M7 (Feldversuch 18.02.2004)

Rohdichte/Druckfestigkeit

Die separat hergestellten Prüfkörper (Tab. 12) weisen nach 7 Tagen etwa 60 % der 28-Tage-Druckfestigkeit auf. Die Rohdichtewerte sind im Vergleich zu den 7-Tage-Resultaten nach 28-Tagen ca. 4 % grösser.

Prüfkörperbezeichnung	Probenalter	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1A	7 Tage	2120	22.9
1B		2110	24.2
1C		2120	23.9
Mittelwert		2120	23.7
Standardabweichung		5	0.7
2A	28 Tage	2040	42.2
2B		2050	41.6
2C		2070	40.3
Mittelwert		2050	41.4
Standardabweichung		16	1.0

Tab. 12: Druckfestigkeit und Rohdichte des Betons bestimmt an separat hergestellten Prüfkörpern (150/150/150 mm).

Der Vergleich zwischen den Druckfestigkeiten von Bauwerkassenbeton und -kernbeton verdeutlicht, dass die Druckfestigkeit des Aussenbetons in etwa 5% geringer ist als die des Kernbetons (Tab. 13). Im Vergleich zu den separat hergestellten Prüfkörpern (Tab. 12) ist die Druckfestigkeit des Bauwerkbetons in etwa 14 % (Aussenbereich) beziehungsweise 11% (Kernbeton) geringer. Die Werte der separat hergestellten Prüfkörper streuen weniger als die Prüfwerte des Bauwerkbetons. Die nach 28 Tagen gemessene Rohdichte der separat hergestellten Prüfkörper ist mit der des Bauwerkbetons vergleichbar.

Prüfkörperbezeichnung	Probenalter	aussen	Kernbereich	aussen	Kernbereich
		Rohdichte [kg/m ³]	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
A1/ K1	28 Tage	2052	2001	37.0	36.2
A2/ K2		2060	2025	34.0	32.0
A3/ K3		2020	2052	29.9	36.3
A4/ K4		2026	2010	36.2	30.5
A5/ K5		2051	2133	31.5	45.6
A6/ K6		2056	2091	37.9	35.2
A7/ K7		2078	2079	37.5	41.3
A8/ K8		2059	2058	35.9	36.8
A9/ K9		2000	2063	33.7	37.0
A10/ K10		2118	2100	39.3	39.4
Mittelwert		2052	2061	35.3	37.1
Standardabweichung		31	39	2.8	4.1

Tab. 13: Druckfestigkeit und Rohdichte des Bauwerkbetons: Aussen- und Kernbereich.

Porosität der Bauwerkbetonproben (Aussen- und Kernbereich)

Bei den untersuchten Bohrstellen sind nur geringe Unterschiede in der Porosität zwischen Aussen- und Kernbeton zu erkennen. Tendenziell sind jedoch die durchschnittlichen Porositätswerte des Aussenbetons leicht höher als die des Kernbetons (Tab.14).

Prüfkörperbezeichnung	aussen	Kernbereich	aussen	Kernbereich	aussen	Kernbereich	aussen	Kernbereich
	U _E [Vol-%]	U _E [Vol-%]	n [Vol-%]	n [Vol-%]	n-U _E [Vol-%]	n-U _E [Vol-%]	RD 105°C	RD 105°C
∅ A1	24.8	24.5	30.3	29.9	5.5	5.4	1887	1894
∅ A2	26.0	24.7	30.3	30.4	4.3	5.7	1889	1881
∅ A3	21.8	26.4	26.2	31.9	4.4	5.5	1994	1852
Standardabweichung	2.2	1.1	2.4	1.1	0.7	0.2	61.3	21.5

Tab. 14: Porosität des Bauwerkbetons: Aussen- und Kernbereich.

Schnellkarbonatisierung

Die Ergebnisse des Schnellverfahrens deuten darauf hin, dass nach 50 Jahren eine Karbonatisierungstiefe von 23 mm zu erwarten ist (Tab. 15).

Proben	Prüfkörper	Dauer des Versuches T [Tage]	Karbonatisierungstiefe Y [mm]	Karbonatisierungskoeffizient K [mm*Jahr ^{-0.5}]
A1 – A3 Wand Aussenseite 0-50 mm Profil	Zylinder ∅ 50 mm / H 50 mm	9	26	3.27
		16	30	2.83
		25	36	2.72
K1 – K3 Wand Kernbereich 200-250 mm Profil	Zylinder ∅ 50 mm / H 50 mm	9	27	3.39
		16	32	3.02
		25	42	3.17

Gerechnete theoretische Karbonatisierungstiefe Y nach 50 Jahren: $Y=K \cdot T^{0.5}$
 Oberfläche (Wand Aussenseite), $K=3.27$

Tab. 15: Prüfergebnisse des Versuches der Schnellkarbonatisierung.

Hygrische Dehnung (Längenänderung Feucht-Trocken-Zyklen)

Die Längenänderung ΔL des untersuchten Recyclingbetons aus Mischabbruchgranulats nach dessen Austrocknung und Wassersättigung beträgt $\Delta L=0.69\text{‰}$ (Tab. 16).

Lagerungsdauer [Tage]	Längenänderungen L [%] in Abhängigkeit unterschiedlicher Lagerungsart	
	Wasserlagerung +20°C	Trockenschrank +60°C
3	0.52	
7	0.54	
14	0.56	
28	0.59	
35		0.04
56	0.73	

Tab. 16: Hygrische Dehnung des untersuchten Bauwerkbeton.

Statischer E-Modul

Der Bauwerkbeton weist bei den ermittelten Druckfestigkeiten (f_c) (Tab. 13) ein um etwa 50 % tieferes E-Modul (E) auf als konventioneller Beton (Abb. 6). Die Werte entsprechen bei dem hier untersuchten Bauwerkbeton in etwa der Beziehung

$$E=5500 \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad (\text{vgl. SIA 262}).$$

Prüfkörperbezeichnung	Probenalter	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
1.	29 Tage	2073	17300
2		2096	18800
3		2058	18300
4		2113	20600
5		2059	16000
Mittelwert		2080	18200
Standardabweichung		22	1.5

Tab. 17: Statisches E-Modul: Bauwerkbeton.

Lineare Wärmedehnung

Die lineare Wärmedehnung α des untersuchten Bauwerkbetons liegt bei $11.2 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{K}$ und ist vergleichbar mit der eines konventionellen Betons [14,15].

Gefügeuntersuchung

Die mikroskopische Gefügeuntersuchung des Festbetons (M7) verdeutlicht, dass ein homogener Gefügebau des Betons ohne wesentliche Entmischungen zwischen Oberflächen- und Kernbeton vorliegt (Bild 5). Der Zementstein weist eine mittlere bis hohe, ungleichmässige Dichte auf. Es sind nur wenige Risse (Breite $\leq 0.05\text{mm}$) vorhanden, welche meist kornumlaufend und ohne Richtungsorientierung verlaufen. Der Zement ist zu ca. 70-80 % hydratisiert. In der Bindemittelmatrix liegen feinkugelige Einzelporen (Luftporen) mit einem Durchmesser von 0.1-1.5 mm eng verteilt vor. Das Granulat als solches weist relativ kantige Poren und wenige Risse auf. Um die Granulate sind keine Verschmutzungen oder sonstige Fremdanteile (z.B. Holz) erkennbar. Eine Anreicherung von Luftporen befindet sich um die Backsteingranulate. Der Verbund von Zementstein und Granulat (Interface) weist nur wenige Risse und Kapillarstörungen auf.

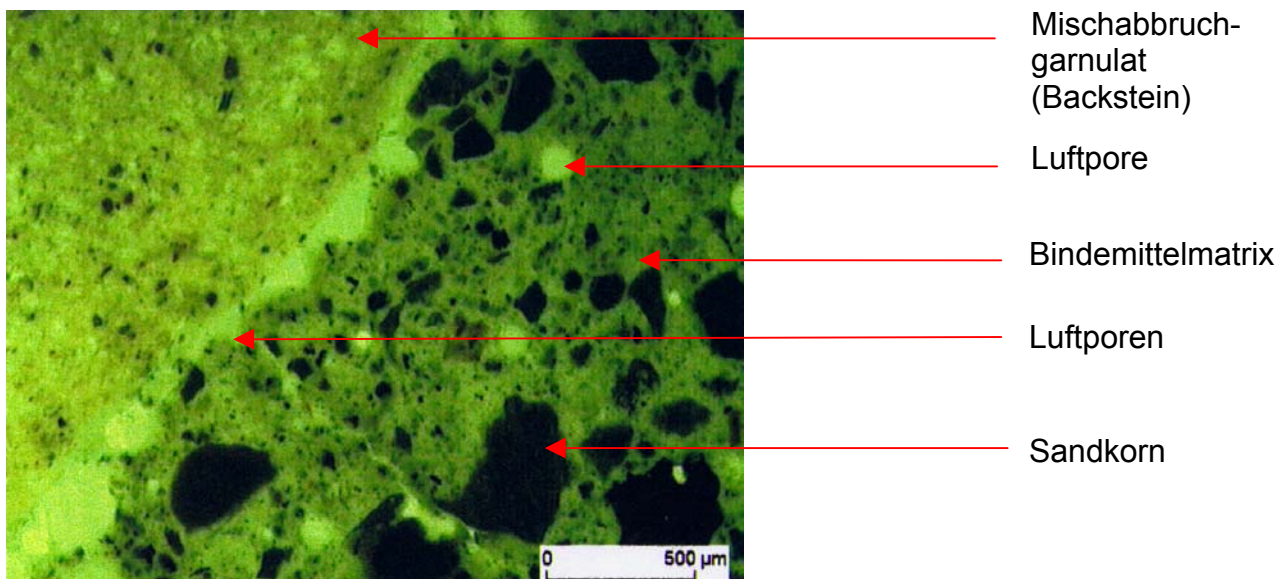


Bild 5: mikroskopische Gefügebildung des Bauwerkbetons (Vergrößerung ca. 40-fach Fluor)

3.3.3.2 Mischung M8 (Feldversuch 25.02.2004)

Rohdichte/Druckfestigkeit

Die separat hergestellten Prüfkörper (Tab. 18) aus Mischung M8 weisen nach 7 Tagen etwa 80 % der 28-Tage-Druckfestigkeit auf. Die Rohdichte gemessen nach 7 Tagen ist vergleichbar mit der Rohdichte gemessen nach 28 Tagen.

Prüfkörperbezeichnung	Probenalter	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
1A	7 Tage	2050	31.2
1B		2030	31.5
1C		2000	28.9
Mittelwert		2030	30.5
Standardabweichung		27	1.7
2A	28 Tage	2010	38.6
2B		2010	38.6
2C		2010	38.6
Mittelwert		2010	38.6
Standardabweichung		2	0

Tab. 18: Druckfestigkeit und Rohdichte des Betons bestimmt an separat hergestellten Prüfkörpern (150/150/150 mm).

Der Vergleich zwischen den Druckfestigkeiten von Bauwerkassenbeton und -kernbeton verdeutlicht, dass die Druckfestigkeit des Aussenbetons im Mittel gering grösser ist als die des Kernbetons (Tab. 19). Im Vergleich zu den separat hergestellten Prüfkörpern (Tab. 18) ist die Druckfestigkeit des Bauwerkbetons in etwa 10 % (Aussenbeton) beziehungsweise 5% (Kernbeton) geringer. Die nach 28 Tagen gemessene Rohdichte der separat hergestellten Prüfkörper ist mit der des Bauwerkbetons vergleichbar.

		aussen	Kernbereich	aussen	Kernbereich
Prüfkörperbezeichnung	Probenalter	Rohdichte [kg/m ³]	Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
O1 / K1	28 Tage	2060	2003	42.5	38.2
O2 / K2		2045	1988	41.7	38.4
O3 / K3		3109	2022	44.5	40.7
O4 / K4		2074	2022	37.2	40.6
O5 / K5		1977	2023	37.7	43.0
Mittelwert		2053	2012	41.1	40.2
Standardabweichung		44	14	2.5	1.8

Tab. 19: Druckfestigkeit und Rohdichte des Bauwerkbetons: Aussen- und Kernbereich.

Porosität der Bauwerkbetonproben (Aussen- und Kernbereich)

Der Bauwerkbeton weist bei der untersuchten Bohrstelle nahezu identische Porositätswerte zwischen Aussen- und Kernbereich auf.

aussen		Kernbereich	aussen		Kernbereich	aussen		Kernbereich
Prüfkörperbezeichnung	U _{E-} [Vol-%]	U _{E-} [Vol-%]	n [Vol-%]	n [Vol-%]	n-U _{E-} [Vol-%]	n-U _{E-} [Vol-%]	RD 105°C	RD 105°C
Ø A1	23.0	23.2	30.7	30.6	7.7	7.4	1873	1870

Tab. 20: Porosität des Bauwerkbetons: Aussen- und Kernbereich.

Statischer E-Modul

Bei den ermittelten Druckfestigkeiten (f_c) (Tab. 18) weist der Bauwerkbeton ein um etwa 45 % tieferes E-Modul (E) auf als konventioneller Beton (Abb. 6). Die Werte entsprechen bei dem hier untersuchten Beton in etwa der Beziehung

$$E = 6000 \cdot \sqrt[3]{f_c} \quad (\text{vgl. SIA 262}).$$

Prüfkörperbezeichnung	Probenalter	Rohdichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]
1.	28 Tage	2003	18900
2		2108	23000
3		2065	19800
Mittelwert		2059	20600
Standardabweichung		43	1.8

Tab. 21: Statisches E-Modul: Bauwerkbeton.

Frostwechselverhalten

Bei den im Labor simulierten Frostwechseln (N_{50}) konnte bei den untersuchten Bauwerkbetonproben eine hohe Frostbeständigkeit mit $N_{50} = 120$ nachgewiesen werden.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Frischbetoneigenschaften

Werden bestimmte Faktoren bei der Betonherstellung mit Mischabbruchgranulat beachtet, ist eine vergleichbar gute Verarbeitbarkeit wie beim konventionellen Beton erreichbar [vgl. 11]. Das in Kapitel 1 angesprochene Wassersaugen des Mischabbruchgranulats kann die Verarbeitbarkeit negativ beeinträchtigen. Die während des Produktionsprozesses stark schwankende Kernfeuchte des Mischabbruchgranulats lässt die Wasseraufnahme des Granulats im Frischbeton nur ungenügend kalkulieren. Infolge dieses stärkeren Wassersaugens muss im Vergleich zu konventionellem Beton bei der Betonherstellung mit einer höheren Wasserdosierung gearbeitet werden (Tab. 7). Um die Wasserdosierung so gering wie möglich zu halten (siehe Kapitel 2.3.2 Auswirkungen auf das Schwinden), werden Hochleistungsverflüssiger verwendet. Die Verwendung dieser Hochleistungsverflüssiger trägt dazu bei, eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen und diese auf Grund ihrer verzögernden Wirkung über eine längere Zeit zu gewährleisten [12]. Unter Beachtung dieser Faktoren war es in diesem Forschungsprogramm möglich, gut verarbeitbare Betonmischungen zu produzieren. Die Abnahme der Verarbeitbarkeit mit der Zeit (vgl. Tab 11) ist mit der eines konventionellen Betons vergleichbar.

Festbetoneigenschaften der separat hergestellten Prüfkörper

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Beton aus Mischabbruch ist - wie bei konventionellem Beton - abhängig vom jeweiligen Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert). Doch bei vergleichbaren W/Z-Werten unterscheiden sich die Druckfestigkeitswerte von Beton aus Mischabbruchgranulat und konventionellem Beton deutlich - ersichtlich am unterschiedlichen Gradientenverlauf (Abb. 5). Der Unterschied ist auf das verschiedenartige Saugverhalten der Gesteinskörnung in der Frischbetonphase, auf die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und auf das unterschiedliche Zementleimvolumen (bzw. Bindemittelleimvolumen) zurückzuführen. Generell wirkt sich ein grosses Volumen an Zementleim und damit eine höhere Schichtdicke an Zementstein zwischen den Gesteinskörnern tendenziell eher negativ auf die Druckfestigkeit aus. Doch durch die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung in der Frischbetonphase wird eine Verbesserung des Verbundes zwischen Zementstein und Korn bewirkt. Indem das Mischabbruchgranulat Wasser vom Zementleim aufsaugt wird die Zementsteinqualität verbessert (geringerer wirksamer W/Z-Wert). Bei einer Veränderung des WZ-Wertes um 0.1 ändert sich die 28-Tage-Druckfestigkeit des Betons aus Mischabbruch um etwa 3 N/mm². Konventioneller Beton weist hingegen eine Änderung der 28-Tage Druckfestigkeit von rund 9 N/mm² bei einer Änderung des WZ-Wertes um 0.1 auf. Das heisst, Beton aus Mischabbruchgranulat verhält sich bezüglich der Druckfestigkeit „gutmütiger“ gegenüber W/Z-Wert-Schwankungen als konventioneller Beton.

Druckfestigkeit/E-Modul

Beton – hergestellt mit natürlichem Kies-Sand - weist eine direkte Beziehung zwischen Druckfestigkeit und E-Modul auf. Mit steigendem Anteil an Kalksandstein- und Backsteinabbruch wird hingegen das E-Modul bei gleichbleibender Druckfestigkeit kleiner. So weisen die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Betone aus 100% Mischabbruchgranulat einen um ca. 40% geringeren E-Modul auf. Je kleiner das E-Modul, desto höher wird die Verformung, die ein Bauteil bei Belastung aufweisen wird. Aus diesem Grund würde beispielsweise eine Decke mit grosser Spannweite, hergestellt mit Beton aus Mischabbruchgranulat, bedeutend höhere Durchbiegungen aufweisen, als wenn sie mit konventionellem Beton hergestellt ist.

Biegezugfestigkeit

Der entscheidende Faktor für die Biegezugfestigkeit von Beton ist wie bei der Druckfestigkeit der WZ-Wert bzw. W/B-Wert (Abb. 7). Aus diesem Grund verhält sich die Biegezugfestigkeit des Betons aus Mischabbruch gleich der des konventionellen Betons.

Schwinden/Kriechen

Aufgrund des höheren Zementsteinvolumens weist der Beton aus Mischabbruchgranulat ein höheres Schwindmass auf als Beton aus natürlichem Kies-Sand. Dieser Effekt wird noch weiter verstärkt, weil der Wassergehalt ebenfalls höher ist. Das geringe E-Modul des Mischabbruchgranulats beeinflusst ebenfalls das Schwindverhalten. Die Gesteinskörnung setzt der Verkürzung des Zementsteins einen Widerstand entgegen, dessen Grösse von der Steifigkeit des Gesteinskorns bestimmt wird. Diese steigt mit zunehmendem E-Modul der Gesteinskörner und zunehmendem Volumenanteil der Gesteinskörnung an. Bei Verwendung von Mischabbruchgranulat ist der Steifigkeitsbeitrag des Granulats gegenüber einer normalen Gesteinskörnung gemindert. Damit steigt die zu erwartende Schwindverformung unter sonst gleichen Bedingungen an.

Ein gleiches Verhalten zeigt der Beton aus Mischabbruchgranulat beim Kriechen (Abb. 11-13). Zu beachten ist, dass durch das Kriechen unter Umständen Schwindspannungen verringert werden können.

Wird ein konventioneller Beton mit einer Druckfestigkeit von ca. 35 N/mm² mit einem Beton aus Mischabbruchgranulat gleicher Druckfestigkeit verglichen, weist der Beton aus 100% Mischabbruchgranulat ein um ca. 50% grösseres Schwinden und Kriechen auf. Dieses Verhalten ist in der Bauausführung zu berücksichtigen. Der Beton ist gewissenhaft nachzubehandeln und es sind kleinere Betonierabschnitte zu wählen.

Für die untersuchten Betonmischungen können folgende Feststellungen zusammengefasst werden:

- Die Druckfestigkeit des Recyclingbetons aus Mischabbruchgranulat ist wie konventioneller Beton vom W/Z-Wert abhängig. Beton aus Mischabbruchgranulat verhält sich jedoch bezüglich der Druckfestigkeit „gutmütiger“ gegenüber W/Z-Wert-Schwankungen als konventioneller Beton.
- Bei vergleichbarer Druckfestigkeit ist das E-Modul des Betons aus 100% Mischabbruchgranulat ca. 40 % geringer als das von konventionellem Beton. Das hat höhere Verformungen von Bauteilen (z.B. Durchbiegungen von Decken) zur Folge.
- Im Vergleich zum konventionellen Beton ist das Schwinden des Betons aus 100% Mischabbruchgranulat grösser aufgrund des höheren Bindemittelmischvolumens und Wassergehalts.

Vergleich separat hergestellter Prüfkörper mit Bauwerkbeton

Die in diesem Projekt erhaltenen Resultate verdeutlichen, dass Unterschiede in der Qualität des Bauwerkbetons und der Qualität von separat hergestellten Prüfkörpern, welche während der Frischbetonkontrolle hergestellt wurden, bestehen können. Transport, Einbau (Verdichtung) und Nachbehandlung beeinflussen die Betonqualität [vgl. 16]. So weist zum Beispiel der untersuchte Bauwerkbeton durchschnittlich knapp 10% tiefere Druckfestigkeiten auf als die separat hergestellten Prüfkörper (vgl. Tab. 12 und 13 sowie Tab. 18 und 19). Die Streuung der Prüfwerte ist bei dem Bauwerkbeton höher als bei den separat hergestellten Prüfkörpern. Der Vergleich der in diesen Feldversuchen erhobenen Festbetoneigenschaften zwischen separat hergestellten Prüfkörpern und Bauwerkbeton zeigt jedoch auch, dass mit einem Beton aus Mischabbruchgranulat ein gut verarbeitbarer Beton hergestellt werden kann. Gewissenhaft eingebaut und nachbehandelt, kann mit diesem Beton ein Bauwerk erstellt werden, in welchem die Betoneigenschaften nur gering schwanken und sich die Bauwerkqualität nur gering von der der separat hergestellten Prüfkörper unterscheidet.

Der Vergleich der Druckfestigkeits- und Porositätswerte zwischen Aussenbeton und Kernbeton als auch die mikroskopische Gefügeuntersuchung (Bild 5) verdeutlichen, dass beide Betonbereiche vergleichbare Zusammensetzung und Eigenschaften aufweisen. Daraus ist einerseits zu schlussfolgern, dass mit den Mischungen M7 und M8 Betonmischungen konzipiert wurden, die eine geringe Neigung zur Entmischung zeigen. Andererseits verdeutlichen diese Resultate, dass der Beton in der Schalung nicht überverdichtet wurde, so dass lokale Entmischungen und ein Ansammeln von Feinanteilen in der Aussenbetonschicht vermieden wurden. Die Dauerhaftigkeit eines Bauwerks gegenüber aggressiven Umwelteinflüssen hängt im wesentlichen von der Qualität

der relativ dünnen Aussenbetonschicht (Überdeckungsbeton ca. 3cm) ab. Diese Schicht soll die Bewehrung gegen Korrosion schützen, die infolge Karbonatisierung des Betons, durch Chloride eintreten kann [17].

Unter Karbonatisierung versteht man den Prozess der Umwandlung von Calciumhydroxid, bedingt durch das Eindiffundieren von Kohlendioxid in den Beton, zu Calciumcarbonat. Damit verbunden ist eine Absenkung des pH-Wertes auf Werte unter neun. Dadurch geht die Passivierung des Stahls verloren und der Korrosionsprozess wird nicht mehr unterbunden. Massgebend für den Korrosionsschutz ist die Karbonatisierungstiefe und damit für die Schutzdauer die Karbonatisierungsgeschwindigkeit [5]. Die Karbonatisierung hängt u.a. zum einen von der Porosität des Zementsteins ab und zum anderen von dem Granulat. Die Untersuchungen zum Karbonatisierungsverhalten des Recyclingbetons aus Mischabbruchgranulat zeigen, dass ein praktisch identisches Verhalten im Karbonatisierungsfortschritt (Betrachtungszeitraum von 50 Jahren) gegenüber eines konventionellen Betons derselben Festigkeitsklasse auftritt (Tab. 15).

Die Wärmedehnzahl des Betons wird im wesentlichen von der Wärmedehnzahl des Granulats bestimmt, weil das Granulat in der Regel etwa 70% des Betonvolumens einnimmt [14]. Obwohl der Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat ein von der Morphologie und von den Materialeigenschaften anderes Granulat enthält als Beton hergestellt mit natürlichem Kies-Sand, weisen beide Betontypen eine vergleichbare lineare Wärmedehnung in einem Temperaturbereich von -20°C und $+60^{\circ}\text{C}$ auf.

Bei wechselnden Feuchtebedingungen (Feucht-Trockenzyklen) zeigt der in diesem Projekt untersuchte Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat ein praktisch vergleichbares zeitabhängiges Verformungsverhalten wie ein konventioneller Beton (Tab. 16).

Die mikroskopische Gefügeuntersuchung liess erkennen, dass um das Backsteingranulat Ansammlungen von Luftporen vorhanden sind (Bild 5). Diese Ansammlungen entstehen, wenn Wasser aus dem Frischbeton die Luft im Granulat verdrängt [10]. Dieses vorhandene Makroporenverhältnis trägt zu der hohen Frostbeständigkeit des Recyclingbetons der Mischung M8 bei. Die Erkenntnis, dass ein Beton mit einem Granulat, dessen Prüfung der Frostempfindlichkeit nach gängigen Prüfnormen nicht besteht, durchaus frostbeständig sein kann, wird durch Untersuchungsergebnisse unterschiedlicher Quellen bestätigt [10,19,21].

Anhand der Vergleichsuntersuchungen zwischen Bauwerkbeton und separat hergestellten Prüfkörper ist ersichtlich, dass mit Mischabbruchgranulat ein Beton hergestellt werden kann, welcher eine gute Verarbeitbarkeit und eine geringe Neigung gegenüber Entmischungen aufweist. Wie für konventionellen Beton gilt auch für Recyclingbeton hergestellt aus Mischabbruchgranulat, dass eine homogene und gute Betonqualität erreichbar ist, wenn der Beton nicht überverdichtet wird und eine Nachbehandlung erfolgt. Druckfestigkeiten von ca. 40 N/mm^2 sind erreichbar und der Beton kann eine hohe Frostbeständigkeit aufweisen. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen entspricht der in diesem Projekt mit 100% Mischabbruchgranulat hergestellte und untersuchte Bauwerkbeton gemäss SN EN 206-1 einer Klassifizierung von C30/37 XF1. Diese Ergebnisse können jedoch nicht verallgemeinert werden, da die Qualität der aufbereiteten Gesteinskörnung (Granulometrie, Zusammensetzung, Streuung), die Betonherstellung, die -verarbeitung (Einbau, Nachbehandlung) einen grossen Einfluss auf die Betonqualität hat.

4. Mögliche Einsatzgebiete des Betons aus Mischabbruchgranulat

Mit dem in diesem Projekt hergestellten Beton - mit seinen zuvor beschriebenen Eigenschaften – sind folgende mögliche Einsatzgebiete denkbar:

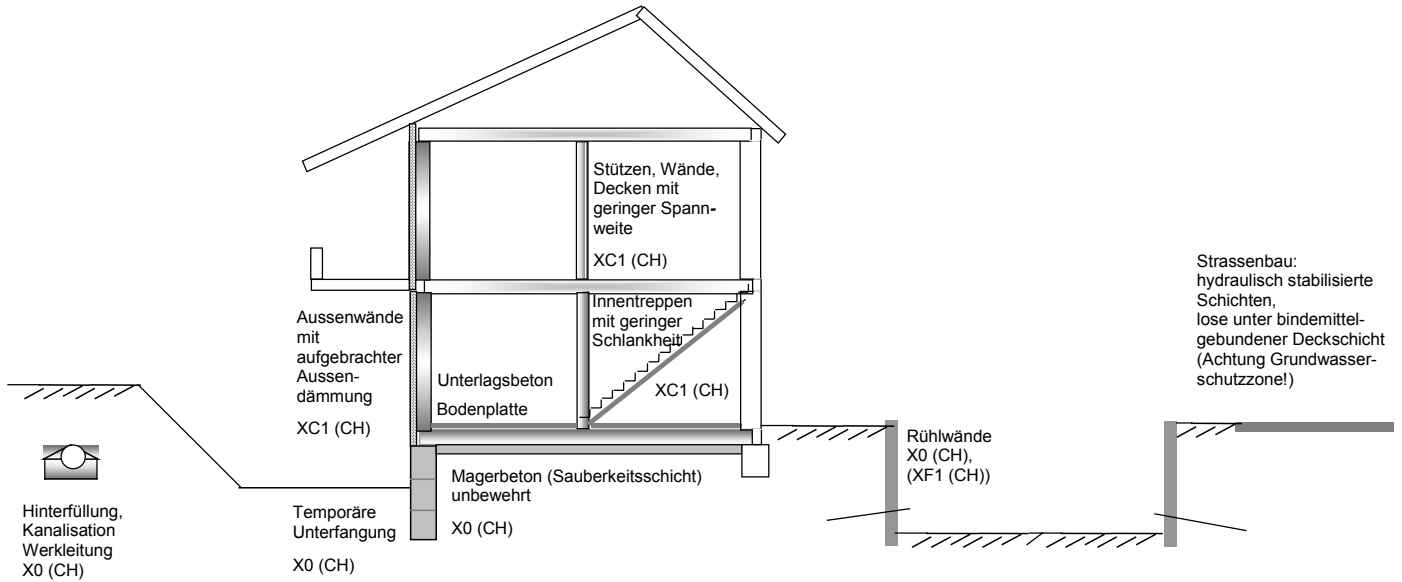


Bild 6: Mögliche Einsatzgebiete von Recyclingbeton hergestellt aus 100% Mischabbruchgranulat.

5. Zusammenfassung

Mit der zunehmenden Notwendigkeit nach Bauen, dass einem sinnvollen Stoffkreislauf Rechnung trägt, wird eine Wiederverwertung der alten Bausubstanz immer wichtiger. Zwar sollte die Umnutzung alter Gebäude im Vordergrund stehen. Doch das hohe Alter der bestehenden Bausubstanz und die immer kürzer werdenden Innovationszyklen, die jeweils neue Anforderungen an die Bauwerke stellen, sorgen für eine Zunahme der Abbruchmassen [vgl. 1,2]. Um eine Lagerung dieser enormen Mengen auf Deponien zu vermeiden, werden neue Möglichkeiten der Wiederverwertung gesucht. Ein mögliches Einsatzgebiet dieser Materialien stellt die Nutzung als Betonzuschlag dar. Dies spart nicht nur Deponieraum, sondern trägt auch zur Schonung der natürlichen Ressourcen bei [18].

Ziel des vorliegenden Projektes war es, die Praxistauglichkeit und den Einsatzbereich (Expositionsclassen gem. SN EN 206/1) von Beton mit Zuschlag aus aufbereitetem Mischabbruch aufzuzeigen. Im Hinblick auf dieses Projektziel wurden die Eigenschaften definierten Mischabbruchgranulats und deren Streuung untersucht und die Mischabbruchgranulat-Kenngrössen und deren Einfluss auf die Rezeptur und Eigenschaften des Recyclingbetons beurteilt. Hierfür wurden Laboruntersuchungen und Feldversuche durchgeführt.

Die Eigenschaften des Betons hängen sehr eng mit denen des verwendeten Zuschlags zusammen. Bei aufbereitetem Material, das nicht aus einem homogenen Vorkommen stammt, schwanken die Eigenschaften des Granulats (siehe Kapitel 2). Im Hinblick darauf ist einerseits eventuell eine Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes bei den statischen Berechnungen sinnvoll [vgl. 18]. Andererseits sind die in diesem Forschungsprojekt ermittelten Betoneigenschaften nicht vorbehaltlos auf jeden Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat übertragbar. Frisch- wie auch Festbetoneigenschaften hängen wie bereits oben erwähnt sowohl sehr eng mit denen des verwendeten Zuschlags als auch mit der Herstellung und Verarbeitung des Betons zusammen.

Bezüglich des in diesem Projekt hergestellten und untersuchten Recyclingbetons können folgende Aussagen gemacht werden:

Die Beurteilung der Frisch- und Festbetoneigenschaften (siehe Kapitel 3) verdeutlichen, dass mit einem Beton aus Mischabbruchgranulat ein gut verarbeitbarer Beton hergestellt werden kann (Kapitel 3.3.1). Gewissenhaft eingebaut und nachbehandelt, können Bauteile mit homogener Betonqualität erstellt werden. Erfüllt das rezyklierte Material die in [8] formulierten Anforderungen bezüglich Sulfat- und Chlorid-Gehalt, gibt es keine betontechnologischen Gründe, Beton aus Mischabbruchgranulat nicht auch für klassifizierten Beton einzusetzen. Mit diesem Beton sind Druckfestigkeiten von maximal 40 N/mm^2 erreichbar, was einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 entspricht. Der Beton könnte uneingeschränkt für die Umgebungsklassen X0 (unbewehrter Beton, bewehrter Beton bei sehr tiefer Luftfeuchtigkeit) und XC1 (Bauteile im Gebäudeinneren bei geringer Luftfeuchtigkeit) verwendet werden. Bedingt durch den niedrigen Elastizitätsmodul treten bei Beton aus Mischabbruchgranulat grössere Durchbiegungen auf [vgl. Kapitel 3]. Auf Grund dieser höheren Verformung sollte der Nachweis auf Gebrauchstauglichkeit anhand von genauen Berechnungen der Durchbiegung geführt werden.

Bei Vorhandensein eines ausreichend hohen Makroporenverhältnisses kann der Beton eine hohe Frostbeständigkeit aufweisen, so dass einer Anwendung dieses Betons für Bauteile mit senkrechten Oberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind (Expositionsklasse XF1), nichts widerspricht.

Auf Grund der nicht immer bekannten Herkunft des Ausgangsmaterials und dessen chemischen Bestandteilen, ist der Einsatz rezyklierten Materials bei Bauteilen die einem Angriff durch aggressive chemische Umgebung ausgesetzt sind (XA1 bis XA3) nicht empfehlenswert.

Mit dem Forschungsprojekt konnte ersichtlich gemacht werden, dass Beton aus Mischabbruchgranulat als klassifizierter Beton für dauerhafte Bauwerke einsetzbar ist. Zu beachten ist jedoch, dass dieser Beton im allgemeinen nicht für anspruchsvolle Ingenieurbauten wie zum Beispiel Brücken zu verwenden ist [vgl. Kapitel 3 und [18]]. Untersuchungen zeigen ausserdem auf [18], dass nach dem momentanen Stand der Forschung der Beton aus Mischabbruchgranulat ebenfalls nicht für Bauteile mit nicht ruhender Belastung verwendet werden kann, bei denen ein Ermüdungsnachweis verlangt wird [18].

Der Beton aus Mischabbruchgranulat kann Anwendung im normalen Hochbau und bei Foundationen finden und wird in naher Zukunft bei diesen Anwendungen sicherlich auch wirtschaftlich interessant.

6. Literatur

- [1] BUWAL: Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege, Band 1: Kennwerte, Bern, 2001
- [2] BUWAL: Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege, Band 2: Kantonale Werte, Bern, 2001
- [3] EMPA-Bericht-Nr. 167'065: Kernfeuchte und Rohdichte von porösen Gesteinskörnungen, August 1999
- [4] J. Drahms et al.: Wasseraufnahme und Rohdichte von Betonbruch, Ergebnisse und Untersuchungen an wiederaufbereitetem Beton, Beton, August, 1996
- [5] P. Gröbl, A. Nealen: Industrielle Betonherstellung zur Erstellung von Bauwerken unter Verwendung von Beton mit Sekundärzuschlägen aus Bauschutt, Zwischenbericht, September 1998
- [6] Ch. Müller, Beton als kreislaufgerechter Baustoff, DafStb, 2001
- [7] Ch. Müller, U. Wiens: Verwertung mineralischer Bauabfälle im Beton, Aschener Baustofftag, März 1998
- [8] BUWAL: Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (Ausbausphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch), Juli 1997
- [9] SIA 162/4: Recyclingbeton, 1994
- [10] A. Leemann, H. Olbrecht: Beton aus mineralischen Bauabfällen, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 24, Juni 1999
- [11] N. Kashino, Y. Takahashi: Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete., Proceedings of the second international RILEM symposium on reuse of demolition waste, Tokyo, Japan, November 1988
- [12] A.L.A. Fraaij et al: Performance of concrete with recycled aggregates, Recycled Aggregate Concrete, 2000
- [13] C. Hoffmann, A. Leemann: Selbstverdichtender Beton (Teil 1) Herstellungskonzept und Dauerhaftigkeit von selbstverdichtendem Beton, EMPA-Bericht 201845, Juli 2003
- [14] Weigler, Karl: Beton, 1989
- [15] Hampe et al.: Stahlbeton Grundlagen, 1993
- [16] Hp. Olbrecht: Einfluss des Vibrierens auf die Festbeton-Eigenschaften, Schweizer Baublatt, 4-7, 1998
- [17] R.J.Torrent et al.: On site Evaluation of the permeability of the "Covercrete", Third CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Nice, France 1994
- [18] Frank Roos: Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1, Dissertation, München 2001
- [19] S. Wies, W. Manns: Frostwiderstand von rezyklisiertem Zuschlag aus Altbeton und mineralischem baustoffgemischen (Bauschutt). Abschlussbericht zu den Teilprojekten D702 und

D/04 des Gemeinschaftsforschungsvorhaben Baustoffkreislauf im Massivbau. FMPA Stuttgert, 1999

[20] R.M.Salem, G. Burdette: Role of chemical und mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete, ACI Materials Journal Vol. 95 No. 5, 1998

[21] I.B. Topcu: Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete, Cement and Concrete Research Vol. 27 No. 12, 1997